

国立天文台
サイエンスロードマップ報告書
最終案
(2026年2月版)

2026年2月17日

サイエンスロードマップ策定委員会

Executive Summary

国立天文台は、これまで可視光から電波までさまざまな波長帯での大型地上観測施設の建設・運用や計算環境の基盤整備などを通じて、天文学の発展を牽引してきた。しかし近年研究環境の大幅な変化や予算の制約が非常に大きくなるという状況の下、限られたリソースで最大の科学的成果を上げるためには中長期的科学戦略に基づく計画的・選択的な研究推進が不可欠となりつつある。

本サイエンスロードマップ(SRM)は、こうした問題意識を背景に、国立天文台が今後取り組むべき研究・開発活動を体系的に整理し、将来の実施計画策定に対する戦略的指針を与えることを目的として策定されたものである。その中で、日本の天文学全体の中長期的方向性を見据えつつ、共同利用機関としての国立天文台が果たすべき役割を踏まえて、特に第5期中期計画期間(2028年~2033年)中、及びその先に向けてどのようなサイエンスをどのように推進していくかを示した。

SRM策定は、国立天文台内外の有識者からなるサイエンスロードマップ策定委員会(SRM委員会)が主導して行った。SRM委員会は、日本の天文学コミュニティ全体からのサイエンスとそれを実行するプロジェクトの提案を募集した。その結果、43の提案が寄せられた。これら提案は、国立天文台将来シンポジウムでのプレゼンテーションと議論、およびSRM委員会によるヒアリングなどを経て、SRM委員会で評価が行われた。その経緯はタウンミーティング及び将来シンポジウムなどを通じてコミュニティと共有され、可能な限り透明性の高い議論を経て評価が進められた。

これと並行して主に国立天文台の研究者が主導して、世界的な天文学の動向を7つの分野(宇宙論、銀河形成と進化、恒星・高密度天体・極限物理・マルチメッセンジャー、太陽と星、星惑星形成、惑星系と生命探査)に分けて取りまとめた。これらは本報告書の第2章にまとめられている。

各提案は、上述した世界的な天文学の動向の中に位置付けられ、プロジェクトの性質に基づいて4つのカテゴリー(地上望遠鏡プロジェクトの提案・宇宙望遠鏡・探査機プロジェクトへの協力の提案・その他の国立天文台内組織の提案・国立天文台の設備を利用する提案)に分けられた。そのなかで科学的重要性、国立天文台として実施する意義、国際競争力、実現可能性、人材育成への貢献など多面的な観点から評価が行われ、3つの優先度(国立天文台として実施する優先度が極めて高い、優先度が高い、更なる検討が必要)に分類された。ただし、国立天文台の既存の大型施設を利用し装置開発と観測研究を推進する提案については、優先度はそれぞれが利用を想定する上位の大型施設の将来計画と整合的に議論されるべきである。今回のロードマップでは個別に評価は行ったものの、優先度付けは行っていない。その結果国立天文台として実施する優先度が高いとして選ばれた提案は、地上望遠鏡プロジェクトの提案が7件(うち4件が現行のプロジェクト)、宇宙望遠鏡・探査機プロジェクトへの協力の提案が4件(うち2件が現行のプロジェクト)、その他の国立天文台内組織の提案が3件(うち1件が現行のプロジェクト)であった。これらについては本報告書の第3章にまとめられている。

このSRMに基づき、第5期中期計画期間を対象とした国立天文台の実施計画が策定される。実施計画策定にあたっては、予算・研究開発体制の整備・人材の育成・国内外の研究機関との連携といった実務的観点から、より厳密な実現性の評価と資源配分が行われる。本SRMは、第5期中期計画期間を主な対象としつつも、数十年規模の長期的視野を持って国立天文台の将来像を描くものである。

明確な科学戦略の下で研究資源を最適配分し、国立天文台が日本および世界の天文学研究に持続的に貢献するための基盤を提供することが、本SRMの本質的な意義である。

目次

Executive Summary	2
目次.....	3
第一章	
サイエンスロードマップの背景と目的、手続き.....	6
§1.1 国立天文台サイエンスロードマップの背景.....	6
§1.2 国立天文台サイエンスロードマップの目的と位置付け.....	7
§1.3 サイエンスロードマップ策定手続き.....	7
§1.4 実施計画へ向けて.....	9
第二章 世界的な天文学の動向.....	11
§2.1 宇宙論.....	11
§2.1.1 当該分野の目的.....	11
§2.1.2 当該分野の目標.....	11
§2.1.3 現在までの到達点.....	12
§2.1.4 今後の世界的動向.....	18
§2.1.5 参考文献.....	21
§2.2 銀河形成と進化.....	23
§2.2.1 当該分野の目的.....	23
§2.2.2 当該分野の目標.....	23
§2.2.3 現在までの到達点.....	24
§2.2.4 今後の世界的動向.....	31
§2.2.5 参考文献.....	34
§2.3 恒星・高密度天体・極限物理・マルチメッセンジャー天文学.....	36
§2.3.1 当該分野の目的.....	36
§2.3.2 当該分野の目標.....	36
§2.3.3 現在までの到達点.....	37
§2.3.4 今後の世界的動向.....	41
§2.3.5 参考文献.....	43
§2.4 太陽.....	45
§2.4.1 当該分野の目的.....	45
§2.4.2 当該分野の目標.....	45
§2.4.3 現在までの到達点.....	46
§2.4.4 今後の世界的動向.....	48
§2.4.5 参考文献.....	50
§2.5 星惑星系形成.....	52
§2.5.1 当該分野の目的.....	52
§2.5.2 当該分野の目標.....	52
§2.5.3 現在までの到達点.....	52
§2.5.4 今後の世界的動向.....	57

§2.5.5 参考文献.....	60
§2.6 惑星系と宇宙における生命.....	64
§2.6.1 当該分野の目的.....	64
§2.6.2 当該分野の目標.....	64
§2.6.3 現在までの到達点.....	65
§2.6.4 今後の世界的動向.....	71
§2.6.5 参考文献.....	77
第三章 国立天文台の科学戦略.....	79
§3.1 SRM提案優先度の策定手順と結果.....	79
§3.1.1 提案の募集.....	79
§3.1.2 提案の評価.....	81
§3.1.3 提案の優先度.....	83
§3.2 分野ごとの科学戦略.....	86
§3.2.1 宇宙論.....	90
§3.2.2 銀河形成と宇宙進化.....	93
§3.2.3 高密度天体・極限物理・マルチメッセンジャー天文学.....	95
§3.2.4 太陽と星.....	97
§3.2.5 星惑星系形成.....	99
§3.2.6 惑星系と宇宙における生命.....	102
§3.3 第5期中期計画における実施提案.....	105
§3.3.1 地上望遠鏡プロジェクトの提案.....	105
§3.3.2 宇宙望遠鏡・探査機プロジェクトへの協力の提案.....	109
§3.3.3 その他の天文台内組織の提案.....	111
§3.3.4 天文台の設備を利用する提案.....	114
§3.4 共通基盤の整備.....	116
§3.4.1 国立天文台のセンター.....	116
§3.4.2 科学研究部.....	116
§3.5 第6期中期計画以降に向けて.....	118
補足資料.....	120
§A.1 執筆者.....	120

第一章

サイエンスロードマップの背景と目的、手続き

§1.1 国立天文台サイエンスロードマップの背景

国立天文台は、東京大学東京天文台時代に建設した岡山天体物理観測所(現ハワイ観測所岡山分室)の188cm望遠鏡を皮切りに、木曾観測所(現東京大学木曾観測所)1mシュミット望遠鏡、野辺山宇宙電波観測所の45m電波望遠鏡や野辺山ミリ波干渉計、水沢観測所(現水沢VLBI観測所)VERA、ハワイ観測所すばる望遠鏡、アルマ望遠鏡などの大型天文観測施設を建設し、共同利用に供してきた。また、天文学研究専用の計算機群(アテルイシリーズなど)の整備を行ってきた。さらにJAXAと協力してひので衛星を打ち上げ、スペース天文学にも活動の場を拓げた。こうした大型計画は、その時々コミュニティからの要請に基づいて計画が立てられ、主として毎年の概算要求によって文部省・文部科学省からの建設および運用予算を得て、建設・運用を行ってきた。しかしながら、それぞれの計画の選択は、コミュニティからの要請に国立天文台が自らもコミュニティの一部として半ば受動的に対応しつつ、国立天文台内部での閉じた議論で最終決定がなされてきた側面があったことは否定できない。天文学の発展に向けて中長期的な戦略的な視点はあったものの、国立天文台の大型施設整備を含む研究・開発活動に対する戦略的かつ包括的な議論は不十分であったと言わざるを得ない。

一方、国立天文台を取り巻く環境、特に予算面での状況は、アルマ望遠鏡建設時あたり(2010年ごろ)から徐々に悪化し始め、2020年代に入って急速に厳しいものとなった。野心的な大型プロジェクト(野辺山45m望遠鏡、すばる望遠鏡、アルマ望遠鏡など)を立案しコミュニティと一体となって推進することで大型予算を獲得し、さらに次の発展への足がかりとして多様な研究開発を推進することができた時代は過ぎ去った。国立天文台は、明確な科学戦略を打ち立て、それに基づいてメリハリをつけてプロジェクトを推進せざるを得ない立場に立たされている。限られた予算で最大限の成果を挙げるためには、中長期的なビジョンもあいまいなままに、内部に閉じたプロセスによって、進めるべきプロジェクトを選択・推進するというようなやり方では、全く対応できなくなっているのである。

そこで、国立天文台では、2018年度より科学戦略委員会を設置し、中長期的な国立天文台の将来計画の議論を実施してきた。この背景には、上に述べた国立天文台に内在する問題の解決の必要性に加え、天文学の急速な進展と国際的な研究競争の激化がある。次世代望遠鏡の開発や大規模観測プロジェクトの計画が進む中、日本が世界の天文学研究においてリーダーシップを維持するために、国立天文台には、長期的な視野と多様な観点に基づいた戦略的な計画が不可欠である。こうした戦略的計画の立案には、コミュニティに開かれた場での検討および議論が必要である。また、研究資源の最適な配分や人材育成の観点からも、科学的な優先順位を明確にしなければならない。こうした状況を踏まえ、国立天文台は研究者コミュニティとの連携を通じて将来計画―国立天文台のサイエンスロードマップおよびその実施計画―を策定することとした。

§1.2 国立天文台サイエンスロードマップの目的と位置付け

国立天文台のサイエンスロードマップ(以下、SRM)の目的は、国立天文台が今後取り組むべき研究・開発を体系的に整理し、その後策定される実施計画に対して戦略的かつ包括的な指針を与える事である。

国立天文台のSRMは、より大きな枠組みとしての日本の天文学全体が進むべき方向性の中で、国立天文台が果たすべき役割を考慮して策定する。このため、まず、各分野の大目標とそれに向かう国内外の動向を整理することにした。その上で、日本の共同利用機関としての国立天文台の人的・物理的・技術的リソースの活用に関する提案を、日本の天文学コミュニティ全体からボトムアップ的に広く募集することとした。これらの提案を天文台が推進する重要性を、世界的な天文学の動向の文脈の中で評価し、優先度を決めて体系化することで、国立天文台の将来像を打ち出す。また、中長期的な戦略を考える上での今後の課題についても明らかにする。

SRMの記述は、科学的な整理や体系化に主眼を置く。ただし、提案の優先度については、科学的な重要性にとどまらず、国立天文台で実施する意義や国際的競争力、さらには次世代研究者育成など多面的な視点を入れて、その戦略性も重視する。荒唐無稽な夢物語とならないよう、実現可能性もある程度考慮する。ただし、全体を具体的な予算の枠に収めることはせず、天文台の可能性の幅を示す。

SRMの策定後、実際のリソース配分や実施体制を決める実施計画が策定される。SRMは、実施計画の策定において重要な資料となる。実施計画は、SRMに掲載されたさまざまなプロジェクトの科学的な重要性を踏まえながら、必要なリソースや技術的成熟度等の観点から実現性をより厳密に評価し、国立天文台全体のリソースと照らし合わせ、国内外の研究機関との連携や人材育成体制も考慮して策定される(このため、SRMで優先度が高い順に提案が実行されるとは限らない。また、情勢に応じて、緊急度が高い重要計画が持ち上がってきた場合には、たとえSRMに掲載されていない場合でも、そちらを優先して実施する体制を取ることもありうる)。

本SRM、そしてその先にある実施計画という二段階の検討により、国立天文台の科学的な活動を戦略的に推進する。なお、本SRMは、主として第5期中期計画期間に推進すべきサイエンス計画の記述に重きを置いており、これに対応した実施計画は第5期中期計画期間におけるものであることに留意されたい。サイエンスの発展は日進月歩であり、第5期中期計画期間中でさえ、大きな潮流が生まれる可能性がある。同時に、数十年のスパンで俯瞰しながら、より長期の戦略を常に練ることも重要である。したがって、本SRMも、その有効性については常に検討し、必要に応じて改訂をしていくべきものであり、これに基づいた実施計画も、継続性および安定性を保ちながらも、適宜見直しを行う必要がある。

§1.3 サイエンスロードマップ策定手続き

SRMは、以下のような流れで、可能な限り将来シンポジウムやタウンミーティングなどコミュニティに開かれた場での議論を経て策定した。

国立天文台科学戦略委員会が、2024年10月18日を締切として、SRMへの提案の意向表明書(Letter Of Intent; LOI)を天文学コミュニティ全体から広く募集し、43件の提案書が寄せられた。今回のSRMへの提案は、目前に控える第5期中期計画(2028~2033年度)に何らかの活動を計画している提案を対象とした。

その後、SRM策定委員会が2024年11月14日に設置された。SRM策定委員会は、ほぼ同数の台内と台外の有識者からなり、専門分野や所属コミュニティについても多様な委員構成となっている。天文学の各コミュニティ団体とのリエゾンとなる委員を含むことで、各コミュニティとの意思疎通の円滑化を目指した。SRM委員会では、SRM策定の具体的な流れやSRMの位置付け、SRM報告書の構成などについて議論された。また、コミュニティからの提案の評価軸 (§3参照) や優先度の段階分けの粒度を3段階程度とすること(不掲載・SRMに掲載・優先度が高いとしてSRMに掲載)などを決めた。これらのSRM策定プロセスについては、科学戦略委員会・SRM委員会による国立天文台将来シンポジウムやタウンミーティングの開催、台内委員会での情報共有、各種研究会での発表などによって周知が図られた。

SRM委員会では、2025年1月31日を締切として、LOIを提出した各グループから「国立天文台サイエンスロードマップ掲載計画提案書」(以下、単に「提案書」)を受け取った。その後、各提案書をより深く理解するための質問事項を提案グループに送り、それらへの回答を軸とした1時間程度のヒアリングを2025年3月末から7月にかけて開催した。そして、提案書とヒアリングに基づき各提案を評価し、SRMへの掲載の可否と優先度、そして科学的な位置付けについて議論を行い、2025年11月の開催の委員会で優先度を三段階に分類する方針が確認された。この三段階の優先度は、2025年12月に開催された将来シンポジウムで提示され、そこで挙がった意見も踏まえて以下の三段階に整理された。

- A) 「国立天文台で実施する提案としての優先度が極めて高い」
- B) 「国立天文台で実施する提案としての優先度が高い」
- C) 「国立天文台で実施するには更なる検討が必要」

また、将来シンポジウムでの議論とその後のSRM委員会の議論を経て、プロジェクトの規模や質と
いう以下の軸も追加して分類することとした。

- 1) 地上望遠鏡プロジェクトの提案
- 2) 宇宙望遠鏡・探査機プロジェクトへの協力の提案
- 3) その他の国立天文台内組織の提案
- 4) 国立天文台の設備を利用する提案

SRM委員会では、SRM報告書の素案を2025年11月に公開し、コミュニティからの意見収集を行なった。**SRM報告書の最終案は2026年2月にタウンミーティングでコミュニティに提示され、意見収集を行なったのちに2026年2月のSRM委員会で最終案が決定される。最終案は2026年3月下旬の国立天文台臨時運営会議にて承認される予定である。**

なお、これらヒアリングとそれに引き続き議論において、利益相反が生じる委員の取り扱いには以下の通りとした。まずあるSRM提案について、提案グループのメンバーである委員および自身が利益相反があると自己申告した委員については利益相反があるとした。これら利益相反がある委員は

- 1. 該当するSRM提案のヒアリングにはSRM委員としては出席しない
- 2. 該当するSRM提案の評価に関する議論には参加しない

こととした。

§1.4 実施計画へ向けて

SRMに基づいて、国立天文台内のリソースを考慮した国立天文台の実施計画が策定される。これには、必要な予算の確保、開発体制の整備、人材の育成、国内外の研究機関との連携などが含まれる。特に、次世代望遠鏡の建設や大規模観測プロジェクトの推進には、長期的な資金計画と技術開発が不可欠であり、先行投資なども必要になるだろう。また、若手研究者の育成や多様な人材の参画を促進することで、持続可能な研究体制の構築を目指している。さらに、国際共同研究の推進により、日本の天文学が世界の研究潮流に貢献し、リーダーシップを発揮することを目指す。また、これらプロジェクトについては、コンプライアンスおよびハラスメントへのしっかりした対応が必要である。実施計画策定にあたっては、これらの観点を十分に考慮することが求められる。

第二章 世界的な天文学の動向

§2.1 宇宙論

宇宙論は宇宙全体の起源と進化を議論する学問である。宇宙開闢から現在までの進化を量子論、一般相対性理論などの基礎物理学をはじめとするあらゆる物理学と数学を用いて理論的に解明し、天文・宇宙観測と実験を用いてそれを検証する。宇宙全体の進化を議論する上で、時々刻々と変化する宇宙を構成する基本的な要素の正体とそのエネルギー状態を解明することが必須である。また、宇宙初期には、地上実験では到達不可能なテラ電子ボルト(TeV)を大きく越える温度、もしくはエネルギー、そして強い重力が実現される。そのため、素粒子論の標準模型を超える新理論や一般相対性理論を超える重力理論などを初期宇宙の現象に適用することにより、天文・宇宙観測からそれらの理論を検証することが期待される。

§2.1.1 当該分野の目的

宇宙を構成する基本的な要素の正体とそのエネルギー状態を明らかにし、宇宙全体の起源と進化を解明する。初期宇宙に標準理論を超える新理論を適用することにより観測的にそれらを検証する。

§2.1.2 当該分野の目標

■ 宇宙の誕生と進化の解明 **Clarifying the birth and evolution of the Universe**

宇宙論は宇宙全体の起源と進化を解明する学問であり、量子論や一般相対性理論などのあらゆる基礎物理と数学を基礎として、その理論を構築し、それを観測・実験を用いて検証する。宇宙誕生時のインフレーションからビッグバン、物質の無からの生成(バリオン数/レプトン数生成)、素粒子・原子核が果たす役割、原始密度ゆらぎから大規模構造の形成、さらには初期重力波の存在を探り、宇宙の進化の統一的な描像を明らかにする(図2.1.1)。

■ 宇宙を構成する基本的な要素の解明 **Clarifying the components of the Universe**

宇宙論の重要な目標の一つは、時々刻々と変化する宇宙を構成する基本的要素の正体とそのエネルギー状態を解明することである。具体的には、元素の起源、大規模構造の進化、ダークマターやダークエネルギーの性質と時間変化、宇宙におけるニュートリノの役割、さらにハッブル定数問題や σ_8 問題など観測データ間の不一致を解決することが挙げられる。

■ 自然の実験場として新しい物理学を探る **A natural laboratory for exploring new physics**

宇宙論は、初期宇宙において地上実験では到達できない超高エネルギー・強重力環境が実現されたことを利用し、新しい物理を探る自然の実験場としての役割を果たす。素粒子に働く力の統一理論や一般相対性理論を超える重力理論を宇宙現象に適用し、インフラトンやダークマター、ダークエネルギーの正体を、観測を通じて検証することが期待される。

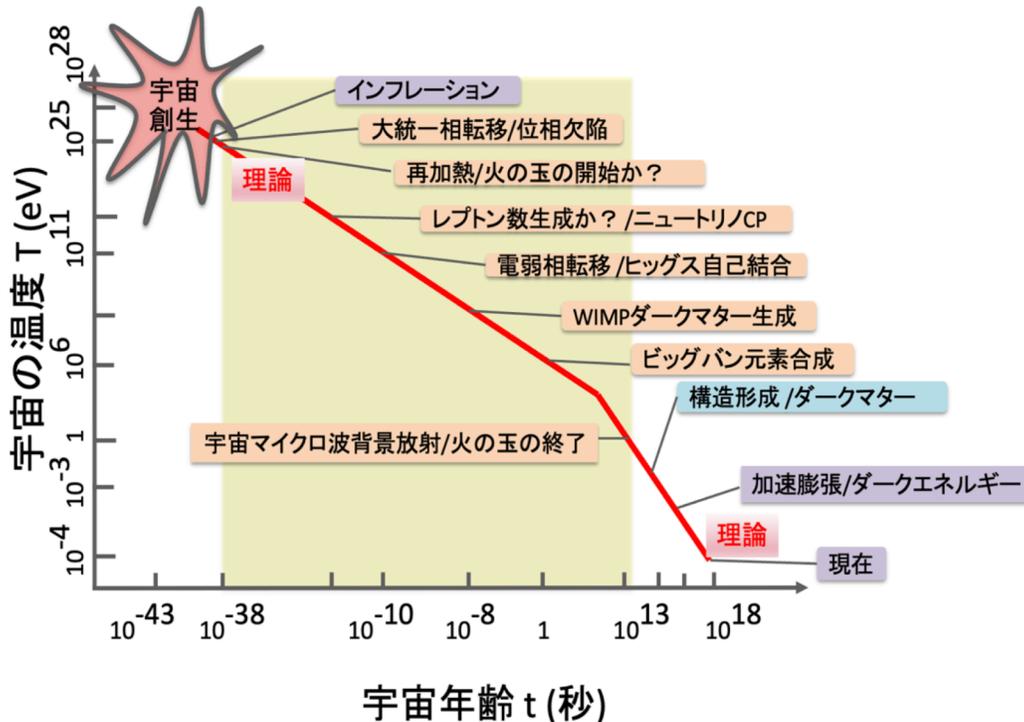


図2.1.1：宇宙の進化の様子。横軸は宇宙年齢(秒)を表し、縦軸は宇宙の温度もしくはエネルギーを電子ボルト(eV)で示す。宇宙は138億年前に誕生し、インフレーションによる加速膨張と、その後の再加熱によってビッグバンの火の玉宇宙として膨張し、大統一理論(GUT Theory)や電弱理論(Electroweak Theory)などによる様々な相転移を経験してきた。その間に物質の無からの生成(バリオン数/レプトン数生成)、ダークマター生成、ビッグバン元素合成を経験してきた。誕生から約4万年後には物質が放射より優勢となり、約38万年後には、宇宙マイクロ波背景放射(CMB)の最終散乱が起こり、宇宙は透明となり火の玉が終了した。その後、宇宙最初の星形成、銀河・銀河団形成へと続き、約70億年前からダークエネルギーが支配的となり加速膨張期に入っている (Navas et al. 2024)。

§2.1.3 現在までの到達点

■ 宇宙の誕生と進化の解明

宇宙は約138億年前に誕生し、直後にインフレーションと呼ばれる急膨張を経験したとする描像が広く受け入れられている。この過程で量子ゆらぎが古典的な密度ゆらぎに転換され、それが後の銀河や銀河団の形成の種となったのである。宇宙マイクロ波背景放射(CMB)はこの痕跡を保持しており、COBE衛星による初検出、WMAP衛星による精密測定、そしてPlanck衛星による宇宙論パラメータのサブパーセント精度での決定を通じて、 Λ CDMモデルが標準的宇宙論のモデルとして確立した。CMB観測の結果は、ゆらぎのスペクトルが大スケールでスケール不変かつほぼガウスのことを示し、インフレーション理論の主要な理論予測と極めて整合的であった(図2.1.2)。さらに、ビッグバン元素合成(BBN)の理論は、観測されるヘリウム4、重水素などの軽元素の存在比と高精度で一致し、ビッグバン宇宙モデルの理解を支えている。銀河サーベイでは、2dF、SDSS、BOSS、eBOSS、DES、Subaru Hyper Suprime-Cam (HSC)、DESIなどが広域にわたり銀河分布を測定し、銀河・銀河団の大規模構造の成長が初期密度ゆらぎの重力的進化として説明可能であることを明らかにした。バリオン音響振動(BAO)の検出は宇宙膨張の歴史を測定する標準距離指標として機能している。また、BICEP/Keck(図2.1.2)、ACT、SPT、POLARBEARによる地上でのCMB偏光観測が進み、背景重力

波、密度/温度ゆらぎの非ガウス性や重力レンズ効果への制限が強化された(図2.1.3)。ACTはPlanck衛星の観測よりインフレーション起源の原始スカラーゆらぎのスペクトル指数が大きいと報告しており将来の追観測が待たれる。銀河団の観測において、Chandra、XMM-Newton、XRISMといったX線衛星、Planck、ACT、SPTによるスニヤエフ-ゼルドビッチ(SZ)効果の観測を通じてその進化の歴史が追跡され、独立の宇宙論的制限が得られている。近年はLiteBIRD(日本)、Simons Observatory(米国)が開発中であり、インフレーション起源の原始背景重力波の直接検出が期待される。また、NANOGrav、EPTA、PPTA、InPTA、それらを束ねる国際的な共同研究IPTA、アレイ型MeerKAT・CHIMEを加えたパルサータイミング法による原始背景重力波の探索、さらに、EDGESとSARAS-3による高赤方偏移21cm線吸収線のグローバルシグナルの探索、CHIMEやMeerKATなどによる遠方銀河に付随する21cm線信号の統計的検出など、着実に成果がもたらされている。中国のFASTを含むCPTAはパルサータイミング探索や21cm観測で成果を挙げはじめ、Tianlai計画は21cm線を用いた再電離期・暗黒時代の観測を進めている。

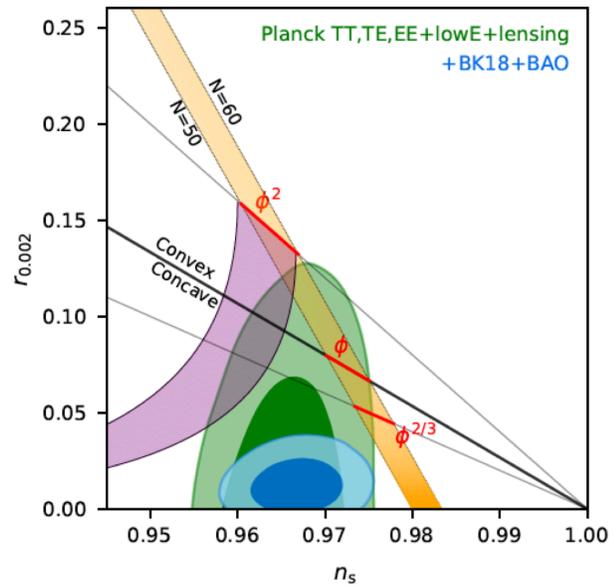


図2.1.2：縦軸はテンソルゆらぎ/スカラーゆらぎ比 (r)、横軸はスカラーゆらぎのスペクトル指数 (n_s)。Planck衛星実験によるCMBからの制限に、BICEP/KECK 2018による地上実験の結果を追加すると、 r への上限は $r < 0.036$ となる。これは、インフレーションが起きたエネルギースケールの上限がGUTのスケール 10^{16} GeV以下であることを示している (Ade et al. 2021)。

これらの観測の積み重ねにより、宇宙誕生から現在に至るまでの進化像は精密に描き出されつつある(図2.1.1)。しかし、後述するように宇宙の無からの創生、消えた反物質の謎(バリオン数/レプトン数生成)、基本的な構成要素の正体が未定など、深刻な未解明の問題が多く、宇宙論が挑むべき課題は果てしなく広い。

■ 宇宙論における宇宙を構成する基本的な要素の解明

宇宙論において、宇宙全体の進化を議論する上で不可欠なのは、時々刻々と変化する宇宙を構成する基本的な要素の正体と、そのエネルギー状態を解明することである。今日までの研究の到達点として、まず、元素の起源については、ビッグバン元素合成(BBN)が理論的枠組みとして確立しており、重水素(水素との個数比約10万分の3)、ヘリウム4(重量比約0.25)といった軽元素の存在比は観測と良好に一致している。これにより、初期宇宙での核反応の進行とバリオン密度(エネルギー存在比約5%)の

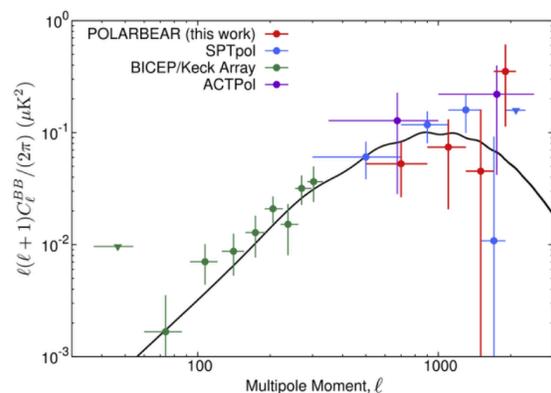


図2.1.3：POLARBEARによる重力レンズによるCMBのBモード偏光の観測 (Ade et al. 2017)。これにより、宇宙初期のBモードとの区別が可能となる。

値が強く制約されている。また、重元素の起源に関しては、恒星内部の核融合過程や超新星爆発、中性子星合体によるr過程などが主要な生成源として特定されつつある。次に、大規模構造の進化については、銀河や銀河団の分布が初期密度ゆらぎの重力的成長に起因することが、上述のように赤方偏移サーベイによって精密に確認された。一方、宇宙を支配する主要成分であるダークマターとダークエネルギーの性質については、その本質はいまだ不明である。ダークマターは銀河回転曲線や重力レンズ効果、CMB観測など多方面の証拠からそのエネルギー存在比約27%で存在が確実視されるが、その正体は特定されていない。ダークエネルギーについても、そのエネルギー存在比約68%で宇宙の加速膨張を説明する「宇宙定数 Λ 」としての扱いが標準的だが(図2.1.4)、最近DESIにより時間変化の兆候が報告された。しかし、その起源や時間変化の有無は依然として未解決の課題である。その一方、ニュートリノの果たす役割について、着実な進展が見られる。ニュートリノの質量はその下限約50meVでゼロでないことが地上のニュートリノ振動実験により確立されており、その有限質量が宇宙の構造形成やCMB異方性に影響を与えることが示されている。宇宙論的な観測ではニュートリノ総質量に対してオリジナルな上限(約300meV以下)を与え、素粒子物理学の進展と強く結びついている。

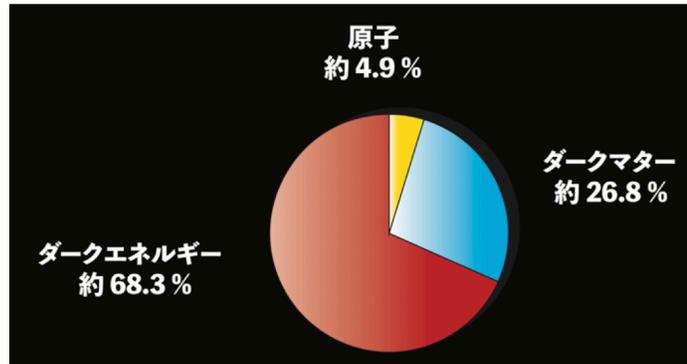


図2.1.4：現在の宇宙のエネルギー状態の割合 (Aghanim et al. 2020)。 <https://sci.nao.ac.jp/main/publication>

さらに、現代的な課題として、ハッブル定数の値に関する局所観測 (Cepheid、Ia型超新星など)とCMBから推定される値の間に顕著な緊張が存在し、 σ_8 (構造形成の8Mpcでの振幅)に関してもCMB推定値と銀河団・弱レンズ観測との間に不一致が報告されている(図2.1.5)。日本の貢献として2015年ごろのThe Subaru FMOS galaxy redshift survey (FastSound)が先鞭をつけた課題でありこの後の進展が期待される。これらの問題は、単なる観測誤差ではなく、 Λ CDMモデルに修正を迫る可能性を示唆している。

■ 自然の実験場として新しい物理学を探る

宇宙初期には、地上実験では到底到達できないテラ電子ボルト(TeV)をはるかに超えるエネルギーや温度が実現されたと考えられる。そのため、初期宇宙は素粒子論における力の統一や一般相対性理論を超える新しい重力理論を検証するための自然の実験場であり、天文・宇宙観測は高エネルギー物理に直接的な制限を与えてきた。

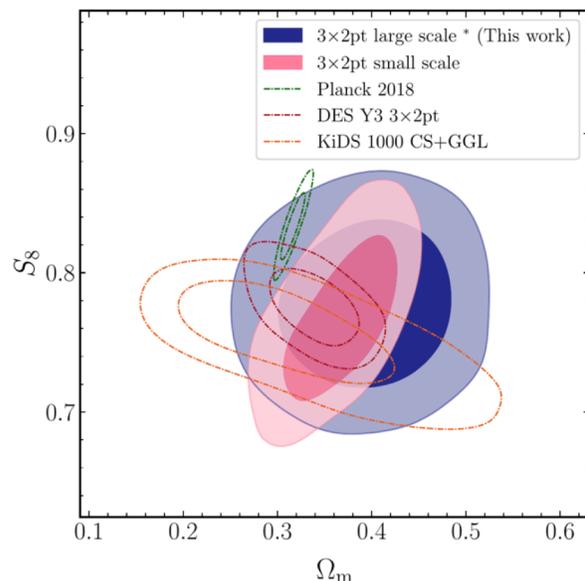


図2.1.5：Subaru HSC Y3の結果。銀河をつくる約8Mpcあたりのゆらぎの大きさ $S_8 = \sigma_8 \times (\Omega_m/0.3)^{1/2}$ と、物質の存在量 Ω_m の平面での信頼度。内側が1 σ 、外側が2 σ の等高線。CMB観測(Planck 2018)と銀河サーベイ(Subaru HSC Y3)の間には2 σ 程度の緊張がある (Sugiyama et al. 2023)。

まず素粒子物理学の標準モデルを越える新物理の探査という観点では、ビッグバン元素合成 (BBN)と宇宙マイクロ波背景放射 (CMB)の観測が、標準模型を超える物理の影響を強く制限している。例えば、ニュートリノの有効世代数 N_{eff} に対するCMBとBBNによる制限(約 3.00 ± 0.30)は、追加の軽い粒子種の存在、背景重力波の存在量、MeVスケールの再加熱温度を制限など、極めて重要な指標を与えている。宇宙論的な銀河サーベイ観測を加えると、ニュートリノ総質量に対して保守的には約 300meV 以下の上限を与えるが、より積極的な仮定の下では2024年にDESIにより負のニュートリノ質量の可能性という解釈が報告され議論を呼んでいる。また、日本の貢献として、一連のEMPRESS共同研究がSubaruを用いた金属欠乏銀河でのヘリウム4の観測で新しい成果を発表しており、レプトン非対称性のヒントを得たという報告が話題となっている。

BBNとCMBによる崩壊するグラビティーノなどの新粒子への制限は、超対称性理論や超弦理論のパラメータを大きく棄却することにつながった。また、インフレーション理論は、初期の量子ゆらぎを現在の大規模構造に結びつけ、スケール不変に近い曲率ゆらぎのパワースペクトルを予測し、Planck衛星などによるCMB観測と整合した。インフラトン場の候補については、非最小結合のヒッグス場、R二乗モデルに付随する新しいスカラー場、スカラーニュートリノなどの超対称性粒子、アクシオンなどが提案されているが、決定的な証拠は得られていない。重力理論の観点では、一般相対性理論は銀河スケールから重力波天文学に至るまで驚異的に成功しているが、上記のインフレーションにおける非最小結合のヒッグス場、R二乗モデルのように初期宇宙の極端な条件では修正が必要かもしれないことが示唆されている。さらに2024年に報告されたACTによる原始スカラーゆらぎのスペクトル指数がPlanck衛星のそれより大きいという問題は、R二乗モデルの変更を示唆しているかもしれない。余剰次元モデル、ホルンデスキー理論などの量子重力理論の完成をターゲットとする修正重力理論は、加速膨張や構造形成の異常を説明する候補として議論されてきたが、LIGO・Virgo・KAGRAにより測定された重力波の速度への制限から来る強い制約などにより広いパラメータが棄却され、現状の観測精度では ΛCDM と区別する強い証拠は得られていない。

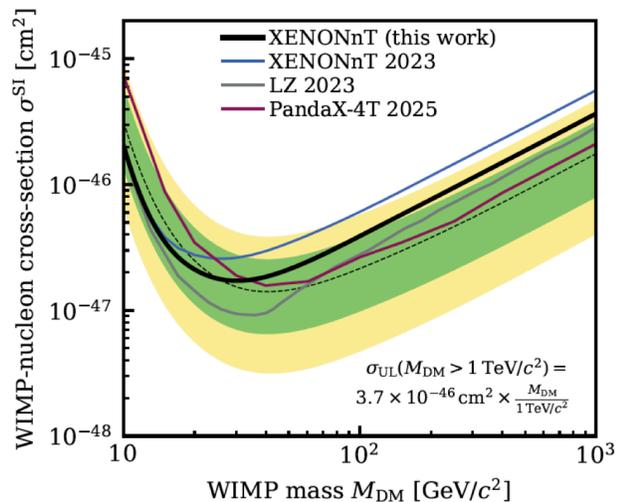


図2.1.6：XENONnT実験によるダークマターのスピン非依存の弾性散乱断面積への上限值。横軸はダークマターの質量 (Aprile et al. 2025)。

依然謎につつまれているダークマターの正体も、素粒子理論に重要な制約を与えると考えられる。候補として有力なものは、質量の軽い方から、質量約 $10\mu\text{eV}$ 以下のアクシオンもしくは質量約 10GeV 以下のアクシオン-ライク-パーティクル(ALP)、質量約 1keV の右巻きニュートリノ、質量約 10GeV かそれ以上のWIMP(Weakly-Interacting Massive Particle: 超対称性粒子などの未発見の素粒子)、さらには初期宇宙に形成されたミニブラックホールである約 10^{17}g から 10^{23}g の原始ブラックホール(PBH)などが挙げられる。もちろんこの他にも数百を越える理論モデルが存在する。現在、素粒子実験であるCERN LHC(欧州)、Fermilab Tevatron(米国)、KEK BelleII(日本)などの地上の加速器実験では未だにその検出には成功していない。

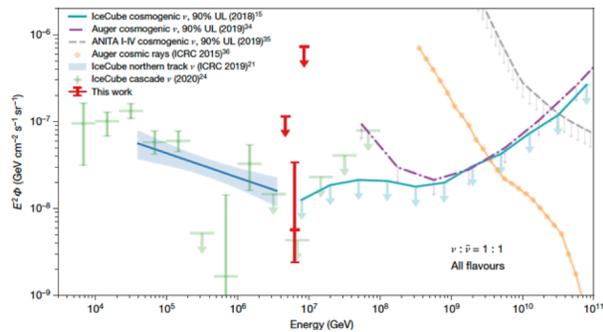


図2.1.7：IceCubeによる高エネルギーニュートリノのフラックス。横軸はニュートリノのエネルギー(GeV)。ダークマターの崩壊・対消滅に厳しい制限を与えている。その一方、エネルギー 6.4 PeV付近のシグナルは、グラシヨウ共鳴 ()が起った可能性が期待される (Aartsen et al. 2021)。

WIMPの直接検出実験では、キセノンを用いたLZ/XENONnT/PandaX-4Tが制限を更新してきた。スピン非依存(SI)の弾性散断面積への上限は、質量約 30GeV – 50GeV 付近で約 10^{-48}cm^2 以下のレベルに到達している(図2.1.6)。WIMPの間接検出実験では、BBN/CMB/高赤方偏移 21cm 線との宇宙論的な整合性、COMPTEL/SPI/INTEGRAL(MeV)、Fermi(GeV)、HESS/Magic/HAWC(TeV)などのガンマ線、IceCUBE(図2.1.7)・KM3NeTなどのTeV/PeV高エネルギーニュートリノ、AMS-02、CALET、DAMPE、Auger、TAなどの宇宙線を用いた観測では対消滅断面積と寿命についてそのパラメータ空間を大きく制限してきた。保守的に、ほぼ約数 10GeV 以下の質量ではダークマターの存在比をフィットできる対消滅断面積 $3 \times 10^{-26}\text{cm}^3/\text{sec}$ を棄却している(図2.1.8)。

QCDアクシオン(a)は、QCDにおける強いCP問題の解として、PQ対称性の自発的破れによる擬ゴールドストーン粒子として現れ、QCD異常により質量が生成される ($m_a \approx 5.7\mu\text{eV} \times 10^{12}\text{GeV}/f_a$)。宇宙論における存在量として、ミスアライメント機構に加えコスミックストリング/ドメインウォールの消滅・崩壊が寄与する。検出するための実験ではADMXが μeV 帯を系統的に走査し、DFSZモデルのパラメータ空間へ接近した(図2.1.9)。HAYSTACはスクイーズド真空、CAPP/QUAX/ORGANは周波数域を拡大した。CASTやHB星・赤色巨星・白色矮星・SN1987Aが光子との結合定数 $g_{a\gamma}$ 、電子との結合定数 g_{ae} 、核子との結合定数 g_{aN} の上限を与えている。JPA/TWPAや単一光子検出で走査速度と感度

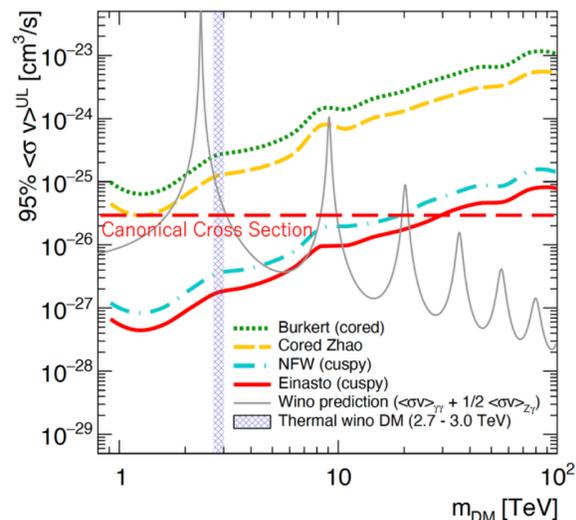


図2.1.8：ダークマターの対消滅断面積への上限値。横軸はダークマター質量。Magic Collaborationによるガンマ線のラインスペクトル探査による (Abe et al. 2023)。赤の波線は観測されるダークマターの存在量を説明できる値。NFWやEinastoの密度プロファイルの場合、約 20TeV 以下のwinoダークマター質量が棄却されることを意味する。

定を甘くすると $w=-1$ と無矛盾であり、動的なダークエネルギーの完全な検証には至っていない。

総じて、宇宙論はすでに標準模型を超える物理に対して極めて強力な制限の情報を与えてきたが、力の統一理論、超対称性理論、量子重力理論もしくは修正重力理論の兆候を直接検出する段階には至っていない。

§2.1.4 今後の世界的動向

■ 宇宙の誕生と進化の解明

今後の宇宙論の展開は、初期宇宙の物理の探究と、標準宇宙論を超える新理論の検証に重点が置かれる。その最重要課題の一つはインフレーションの直接的検証であり、原始重力波の検出が革新的な役割を果たすと期待される。

LiteBIRD (日本)、Simons Observatory (米国)といった国際計画はCMB偏光Bモードの検出を目指し、インフレーションのエネルギースケールやポテンシャルの形状とそれが従う素粒子の対称性、複数成分に直接的制限を与えることが期待されている。銀河サーベイも次世代に突入する。DESI (米国)、DESI2 (米国)、Euclid (ESA)、Roman (NASA)、すばる HSC (日本)、すばる PFS (日本)、SPEC-S5 (米国)が広域分光サーベイを実施し、銀河分布や重力レンズを通じたゆらぎの非ガウス性や重力理論の妥当性を検証する。CMBと銀河サーベイの組み合わせにより、ニュートリノ質量の総和の感度が50meV以下に到達するため、宇宙論が素粒子実験に先駆けてニュートリノ質量の絶対値を初めて決定することが期待されている。SKA (国際共同、南ア・豪)、中国のTianlai、日本の月面天文台TSUKUYOMIによる21cm観測は、再電離期や暗黒時代を直接的に探査し、これまでCMBに依存していた初期宇宙研究を大きく拡張する。また、FASTは銀河系内外のパルサー観測により時空構造の精密検証に寄与している。

重力波観測も初期宇宙を直接探る手段として急速に発展している。約10Hzから約1000Hzあたりに感度があるLIGO・Virgo・KAGRAは天体起源重力波を定常的に観測し、今後はバックグラウンド探索へ拡張される。次世代の数10km級の実験であるET (欧州)とCE (米国)が計画されており、その将来は明るい。宇宙干渉計では 10^3 Hzあたりに感度があるLISA (ESA/NASA)と中国のTianQinとTaiji計画、0.1Hzあたりに感度がある日本のDECIGOと米国のBBOが進行中であり、初期宇宙における未発見の素粒子が引き起こす強い一次相転移やインフレーションを起源とする重力波を直接検出する可能性を持つ。特にTaijiは中国科学院が主導し、3機の衛星編隊を用いた観測を構想しており、欧州のLISA、日本のDECIGOとの国際比較を通じて技術的多様性を確保している。さらに、ハッブル定数問題や σ_8 問題は、新しい物理学の可能性を示唆するテンションとして注目され、今後の観測・理論双方における焦点となる。CMB、銀河サーベイ、21cm、重力波を統合する「マルチメッセンジャー宇宙論」が鍵となり、今後10~20年で宇宙誕生から進化に至る物理像は飛躍的に深化すると予想される。CMBではPlanckに続きSimons Observatory、重力波ではLISA衛星と地上実験CE/ET、銀河サーベイではDESI・Euclid・Roman・すばる HSC/PFSが推進される。特徴は、広域観測と理論検証を統合した「標準宇宙論の高精度化」に重点を置く点にある。

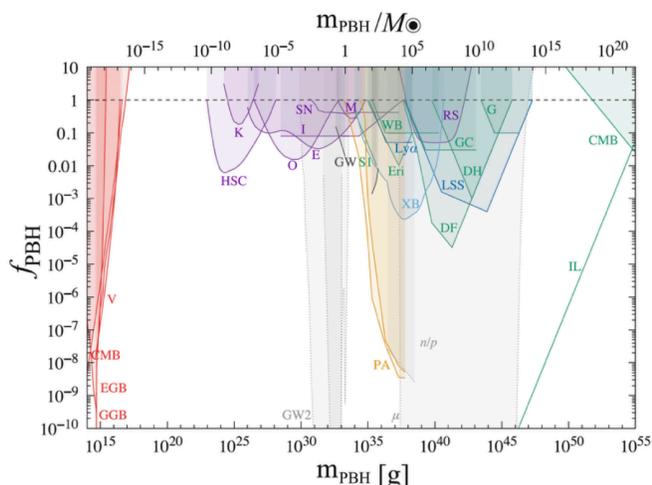


図2.1.10：観測で排除される原始ブラックホールのダークマターに対する存在比 f_{PBH} を質量 m_{PBH} の関数としてプロット。約 10^{17}g から約 10^{23}g の質量は100%のダークマター(DM)として許されている (Carr et al. 2021)。

上述したように、日本の特徴として独自性の高い計画を展開している。例えば、Super-K GADZOOKS!/Hyper-K、もしくはIceCube-Gen2でMeV-TeVニュートリノ天文学において確固たる地位を固め、LiteBIRDでCMB Bモード偏光観測に特化し、DECIGOで0.1Hzの宇宙重力波観測に挑戦する。特定領域に焦点を絞り、欧米に先駆けて世界的な空白を埋める形で国際的リーダーシップを発揮する戦略がユニークであると言えるだろう。中国は国家主導で急速に観測基盤を拡充し、FASTによる電波観測、Tianlaiによる21cm観測、宇宙重力波ではTianQinとTaijiを並行して構想し、欧米・日本に先行する形で独自の観測体制を整備している。戦略的に「広範な観測窓を同時に押さえる」方向性が顕著である。

■ 宇宙を構成する基本的な要素の解明

今後の宇宙論研究は、宇宙を構成する基本的な要素の正体とエネルギー状態をより精密に解明することに重点が置かれる。まず元素の起源については、次世代の分光観測(JWST、Extremely Large Telescope群など)が初代星・初代銀河に含まれる金属量を直接測定し、重元素生成史の初期段階を解明することが期待されている。BBNについても、すばる、JWST、TMTの将来観測により軽元素比の観測精度の向上により、バリオン密度や新物理の影響をより厳しく制約できるようになるだろう。大規模構造の進化に関しては、すばる HSC/PFS、DESI、Euclid、Roman宇宙望遠鏡、SPHERExといった広域銀河サーベイが、銀河や銀河団の分布を高精度でマッピングし、BAOや弱重力レンズ効果を通じて宇宙膨張と構造形成史を統合的に明らかにする。さらに、日本のTSUKUYOMI、中国のTianlai計画、南アのHIRAX、国際共同のSKAが21cm線観測を通じて再電離期や暗黒時代の構造形成を直接探査し、初期宇宙の進化を補完する役割を担う。ダークマターとダークエネルギーの研究も一層精緻化される。ダークマターに関しては、次にまとめる直接検出実験や加速器実験に加えて、重力レンズ統計や銀河団の成長率観測を組み合わせることで、その性質や時間進化に対する制約が強化される。アストロメトリではJASMINE(日本)が天の川銀河の密度プロファイルを精密に観測し、ダークマター検出の精度を上げることが期待されている。ダークエネルギーについては、時間依存性を持つモデルや修正重力理論との比較が進められ、観測データとの突き合わせによって Λ CDMを超える理論的枠組みの可能性が検証される。ニュートリノに関しては、宇宙論観測が素粒子実験を凌駕する精度で質量の上限を与える可能性がある。LiteBIRDなどのCMB偏光観測、銀河分布とレンズ効果を組み合わせることで、ニュートリノの質量階層の理解が進展する見込みである。また、現代的課題であるハッブル定数問題や σ_8 問題の解決は、今後の最大の焦点の一つである。EuclidやRoman、SKA、TSUKUYOMIなどの次世代観測は、独立した膨張率測定や構造形成史の追跡を可能にし、系統誤差の除去とモデル修正の必要性を明確にする。もしテンションが解消されない場合、新しい物理、たとえば早期ダークエネルギーや非標準ニュートリノの存在が検討されることになるだろう。総じて、今後10~20年は、CMB・銀河サーベイ・21cm観測・重力波天文学といった多様な観測を統合する「マルチメッセンジャー宇宙論」の展開が進み、宇宙を構成する基本的要素の理解は飛躍的に深化すると予想される。

■ 自然の実験場として新しい物理学を探る

今後の宇宙論研究は、初期宇宙を通じて新しい物理を探る試みを一層深化させる。特に注目されるのは、インフレーションや高エネルギー場の痕跡を探す観測である。LiteBIRDやSimons Observatoryといった次世代CMB観測計画は、原始重力波由来のBモード偏光を検出することを目指しており、その成功はインフラトンのエネルギースケールやスカラー場のポテンシャルエネルギーの素粒子論的な対称性などの性質に直接制約を与える。また、非ガウス性の高精度測定により、シングルフィールドモデルかマルチフィールドモデルかを区別する可能性が期待されている。重力理論に関し

ては、LIGO/Virgo/KAGRAによる重力波観測の精度向上に加え、2030年代に計画されている地上重力波干渉計ETやCE、宇宙重力波干渉計(LISA、Taiji、TianQin、さらに日本提案のDECIGO)が極低周波領域を探索し、余剰次元モデルや修正重力理論による予測と直接比較する道を開く。これらはインフレーション起源や相転移由来の背景重力波の検出も視野に入れており、初期宇宙物理に決定的証拠を与える可能性を持つ。

ダークマター探索では、天文学的観測による宇宙論・天体物理の制約と、素粒子実験による直接・間接探索を相補的に結びつける流れが今後いっそう強まると見込まれる。とりわけ21cm線は、宇宙暗黒時代から宇宙の夜明け、宇宙再電離期、さらにポスト再電離期に至るまで、異なる物理過程に支配された複数の時代を連続的に貫いてダークマターの性質を検証できる点が大きな強みである。SKA-Lowは、宇宙の夜明け～再電離期における21cm線の統計観測(トモグラフィやパワースペクトル等)に加え、高赤方偏移の電波連続光源を背景にした21cm forest(吸収線)によって、線視方向の小スケール構造や熱史に直接アクセスし、温度進化や小スケール構造形成に影響するダークマターの性質に迫ることができる。さらに、日本のTSUKUYOMIや中国の鸿蒙計画は、星形成に起因する不確実性が相対的に小さい宇宙暗黒時代に着目し、21cm線グローバル信号(全天平均信号)を通じてより宇宙論的な形でダークマターを探索することを目指す。加えて、SKA-Midや中国のTianlai等によるポスト再電離期の21cm線観測は、大規模構造形成の情報を通してダークマターの自由行程や相互作用などに制約を与えることが期待される。

WIMPの直接検出では、次世代キセノン実験(DARWIN/PandaX-30T/XLZD 構想)など有効質量 $\sim 20\text{--}50$ トン級が計画されている、そのシグナルの背景は放射起源+ ^{222}Rn +太陽ニュートリノが支配していてその排除のテクニックが試される。次世代シリコン検出器では、ニュートリノフロアに接近/到達することが期待され、CEvNSの検出・同定も物理目標となる。解析は多標的・多変量で体系化される。次世代アルゴン実験(DarkSide-20k \rightarrow ARGO/GADMC)、ARGO(~ 100 トン級)でニュートリノフロア領域を広範に覆う設計となっている。

WIMPの間接検出では、次世代ガンマ線望遠鏡のCTAなどが銀河中心からのWIMP対消滅/崩壊からのガンマ線をとらえ、質量 3TeV 近辺で超対称性粒子の一つであるニュートラリーノの1つであるウィーノを検出することが期待されている。もしくは、質量数 10TeV 以下を棄却する可能性がある。その他、AMS-02、CALET、DAMPEなどの宇宙線の実験が、WIMP対消滅/崩壊からのハドロン放出プロセスで生成される陽電子・反陽子・反重水素などの反粒子をとらえ、IceCUBE-Gen2/KM3NeTが高エネルギーニュートリノをとらえてWIMP仮説を検証することが期待されている。

QCDアクシオンの将来実験について、数 $10\sim$ 数 $100\mu\text{eV}$ を狙う誘電体ハロスコープ(MADMAX, BRASS, BREAD)が本格化し、高磁場 \times 多枚ディスクで共鳴増強してKSVZ/DFSZ域の中核を直接検証することが予定されている。 μeV 以下はDMRadio/ABRACADABRAがLC共振・SR技術で $\text{neV}\sim\mu\text{eV}$ を面的にカバーし、ADMX/CAPPは量子限界受信・量子非破壊読出しで走査を加速。太陽起源のアクシオンはIAXO/BabyIAXOが光子との結合定数 g_{ay} を桁で改良し、核子との結合や電子との結合はQUAX, TASTE, CASPER系が核スピン・磁気励起で補完する。天体手法では中性子星磁気圏での共鳴変換やミニクラスター透過、重力レンズ・一過性電波シグネチャの探索を連携させ、実験・観測・理論のバイズ統合でパラメータ空間を計画的に削っていく。また、ALPの将来実験については、ALPSIIが共振器再循環で“Shining Light through the Wall” 実験感度を一桁以上伸ばし、IAXOが太陽ALPで光子との結合定数 g_{ay} を広域に更新する予定である。BRASS/BREAD/誘電体・皿アンテナは質量数 $10\sim$ 数百 μeV 、DMRadio/Oscura系は質量 $\text{neV}\sim\text{meV}$ を多チャンネルで継続走査する。電子との結合定数 g_{ae} 、核子との結合定数 g_{aN} は原子干渉計・核磁気共鳴(CASPER)・マグノン/フォノン読出しで直接

計測へ。天文観測ではSKAなどの電波望遠鏡やパルサータイミングが超軽量域の空間・時間変動を検証し、銀河団・AGN・GRBの偏光やスペクトルゆらぎで変換効果を観測する。多標的・多周波・多観測の統合解析により、WIMP後の空白を連続的に埋めていく展開が見込まれる。

原始ブラックホールの将来検出は多波長・多メッセンジャーで進む。①重力レンズ：星・銀河・FRBの(アストロ)マイクロレンズやフェムトレンズで広い質量域を探索(Gaia, Roman, LSST、すばるHSC/PFS、FRBサーベイ)。②重力波：LIGO/Virgo/KAGRA/ET/CEの地上実験、そして次世代衛星実験LISA/DECIGO/BBOでの連星合体や誘導重力波の検出。③パルサータイミング(PTA)でPBH通過のシャピロ遅延・ナノレンズ信号。④降着円盤放射：CMBゆらぎ／スペクトル歪み、X線・21cmで初期宇宙や再電離期の加熱を検出。⑤蒸発：PBHのホーキング放射(MeV-GeVガンマ線・宇宙線・ニュートリノ)や最終爆発をCTA等で探索。⑥力学効果：星団加熱、広間隔連星の破壊、潮汐摂動でハロー内分布を制約。複合解析で存在域を制限するだろう。特に⑤の蒸発について、目覚ましい進展が期待される。具体的にMeVガンマ線ではCOMPTEL/INTEGRAL/SPIの上限に加え、今後のAMEGO-X・e-ASTROGAM・GECCO・COSI・SMILE-3が10–100 MeV感度を大幅向上し、質量 10^{15} – 10^{17} gのPBHのパラメータを制限する。MeVニュートリノは蒸発で生じるシグナルが数MeV～数十MeVに現れ、DSNB測定と同様の手法でSuper-K/JUNO/Hyper-Kが等方フラックスを制限する。さらにガンマ線とニュートリノの相関解析に、Fermi-LAT/HESS/MAGIC/CTAのGeV-TeVガンマ線の爆発現象とその背景放射、IceCube-Gen2/KM3NeTが高エネルギーニュートリノの爆発現象、宇宙線による p^+p^+ と e^+e^+ の観測、そしてBBN/CMB/21cmの整合を重ねることで、蒸発するPBHを多角的に制限できるだろう。

ダークエネルギーについては、Euclid、Roman、すばるHSC/PFS、DESI、DESI2といった次世代広域サーベイが、宇宙膨張の歴史と構造成長を高精度で測定し、状態方程式パラメータ w の進化を厳しく制約する。もし宇宙定数 $\Lambda(w=-1)$ からの逸脱が確認されれば、動的スカラー場モデルや修正重力理論の導入が必要となるだろう。さらに、ハッブル定数問題や σ_8 問題といった現代的なテンションは、新しい物理を示唆する可能性が高く、早期ダークエネルギーや余剰ニュートリノ成分、あるいは理論的に予想される「スワンプランド制約」など統一理論・超弦理論といった新しい枠組みが議論されている。総じて、今後10年から20年の国際観測計画の進展は、素粒子物理と重力理論を含む基礎物理の根本的検証を可能にし、標準模型を超える新しい物理学の実証に向けて宇宙論が決定的役割を果たすと期待されている。

§2.1.5 参考文献

- [1] S. Navas, et al. (Particle Data Group, Review, Tables and Plots, Astrophysics and Cosmology), Phys. Rev. D 110, 030001 (2024) and references therein.
- [2] P.A.R. Ade et al, the BICEP and Keck Collaborations, Phys. Rev. Lett. 127 (2021) 15, 151301
- [3] P.A.R. Ade et al, ApJ, 848 (2017) 121.
- [4] N. Aghanim, et al, the Planck Collaboration, A&A, 641 (2020) A6.
- [5] S. Sugiyama, et al, the Subaru HSC Y3 collaboration, Phys. Rev. D 108 (2023) 12, 123521
- [6] E. Aprile, et al, The XENONnT collaboration, arXiv:2502.18005 [hep-ex]
- [7] H. Abe et al, the MAGIC collaboration, Phys. Rev. Lett. 130 (2023) 6, 061002.
- [8] M. G. Aartsen, et al, The IceCube Collaboration, Nature, 591 (2021) 220
- [9] C. O’Haire, “AxionLimits”, <https://cajohare.github.io/AxionLimits/>
- [10] B. Carr, K. Kohri, Y. Sendouda, and J. Yokoyama, Rept. Prog. Phys. 84 (2021) 11, 116902

§2.2 銀河形成と進化

人類が住む天の川銀河をはじめとした銀河がどのように誕生し、形作られたのかを理解することは天文学における重要課題のひとつである。これまで、多波長観測や理論研究により、現在の銀河を構成する恒星(以下、§2.2では星)の種族や星間ガス、星間ダスト、暗黒物質ハロー(DMH)などの様子が詳細に理解されつつある。特に、星形成の起源 (§2.5) や元素合成 (§2.3)、さらにGaia衛星に代表される力学構造の研究などから天の川銀河の起源を探る観測研究が精力的に行われてきた。一方で、すばる望遠鏡をはじめとする大型望遠鏡の登場により、高赤方偏移にある(過去の宇宙にある)銀河の直接観測が可能になり、宇宙年齢の約1/10程度の時代までの銀河形成と超巨大ブラックホール(SMBH)の形成を辿ることができるようになった。そして、現在ではJWSTによって、まさに初代銀河(星)が誕生すると考えられる宇宙開闢200-300Myrの宇宙の銀河の検出にも成功している。また、銀河形成と密接に繋がる宇宙再電離などの銀河間物質(IGM)の進化についても大きな研究の進展が見られ、急激な発展を遂げている。数値シミュレーションに基づく理論研究も活発に行われ、怒涛のように日々生み出される観測結果の説明に追われる様子も見られる。今後はTMTなどの30m級望遠鏡による高感度・分解能の撮像・分光や、すばるPFSやRomanなどによる広域深宇宙探査、SKAやngVLAなどによる多波長観測の結果に理論を合わせた研究で、銀河形成、SMBHの起源、銀河-IGMの進化の3つの主な研究課題について大きな発展が期待される。

§2.2.1 当該分野の目的

宇宙の基本構造となる銀河について、起源から進化、現在の物理状況の理解を通じて、超巨大ブラックホールを含めた宇宙における銀河形成の全容を明らかにする。さらに銀河形成と不可分の関係にある宇宙再電離を含めたIGMとその進化を理解し、電磁波による直接観測が可能な宇宙背景放射の時代以降の宇宙進化を俯瞰する。

§2.2.2 当該分野の目標

■ 銀河形成史の解明

銀河形成の最後のミッシングピースとなっている初代星・銀河を検出し、観測的に明らかにする。初代星・銀河から天の川銀河を含む現在の銀河までを力学、化学の進化過程も合わせて観測と理論の両面で理解する。

■ 超巨大ブラックホールの起源の解明

現在の宇宙、さらにはビッグバンから数億年の時代にまで見つかっている超巨大ブラックホールが、何がもたらしたブラックホールを種にして、どのように(質量降着/合体等)成長し、銀河と共に成長したかを明らかにする。

■ 銀河-銀河間物質の進化の理解

銀河とそれを取り巻く銀河周辺物質(CGM)、さらに銀河の重力圏外にあるIGMは、インフローとアウトフローによる宇宙大規模構造を含めた物質循環や放射によるエネルギー交換を通じて、銀河形成や宇宙再電離などを駆動してきたと考えられる。これらの交換過程を経た銀河形成とIGMの進化過程を明らかにする。

§2.2.3 現在までの到達点

18世紀にハーシェルが恒星の計数観測で描いた恒星の分布やカントが提唱した島宇宙の描像をはじめ、有史以前から人類は天の川銀河を観測し、その意味を考えてきた。本格的な銀河研究は、約100年前にハッブルが発見した系外銀河に始まり、20世紀末までには可視光から、電波や赤外線、紫外線、X線、 γ 線の多波長観測、最近ではマルチメッセンジャー観測、時間領域天文観測を合わせて、銀河と銀河に包含される多様な天体の姿が調べられ、活発に研究が行われている。1990年代以降は、すばる望遠鏡などの大型望遠鏡の登場により、高赤方偏移にある(過去の宇宙にある)銀河の直接観測が可能になり、宇宙年齢の約1/10程度の時代までの銀河形成とSMBHの形成を辿れるようになった。そして、2020年代入るとJWSTによって、まさに初代銀河(星)が誕生すると考えられる宇宙開闢200-300Myrの宇宙の銀河の検出に成功し、精力的に観測研究が進められている。理論研究では、冷たい暗黒物質に基づく構造形成で作られる宇宙大規模構造の中において、DMHが銀河の基本構造として説明され、DMHの普遍的な質量密度分布を示すと共に、多くの銀河形成過程やSMBH、宇宙再電離を含めた銀河間物質の進化の過程の説明がなされてきた。一方で、フィードバック(FB)効果に代表されるバリオン物理の複雑さもあり、急激な発展を遂げる観測研究の結果の説明に追われる状況も見られる。以下では、前節で掲げられた3つの目標に対して、これまでの科学的進展・到達点を概観する。

■ 銀河形成史の解明

ビッグバン宇宙における標準的な描像では、初期宇宙の密度揺らぎが重力的に成長し宇宙大規模構造が作られて、その中にできたDMHが銀河の重力系となり、星やブラックホールをはじめとした多様な天体形成が行われたと考えられている。このような銀河形成過程の理解は宇宙のあらゆる天体の形成を理解するための基礎となる。そのため、人類が住む天の川銀河をはじめとする銀河がどのように誕生し、形作られたのかを理解することは天文学における重要課題の1つである。

多波長観測や理論研究により、現在の銀河を構成する星の種族や星間ガス、星間ダスト、DMHなどの理解が進んできた。特に、星形成の起源(§2.5)や元素合成(§2.3)の研究も活発に行われている。これらの研究の中でも銀河考古学とよばれる、天の川銀河をはじめとした、ごく近傍の銀河に対して、星の種族や元素組成、力学構造などから銀河の起源を探る研究が精力的に行われている。天の川銀河の外縁に存在する星(ハロー星)に対し、すばる望遠鏡などの高分散分光で、金属欠乏星の探査が行われ(e.g. Aoki et al. 2007, see Frebel & Norris 2015)、金属量が $[Fe/H]=-7.1$ を上限値に持つ極金属欠乏星まで報告されている(Keller et al. 2014)。一方で、金属を含まない第一世代星(popIII星)候補はほとんど見つかっていないことから、第一世代星の多くは大質量星であり、寿命が短いため現在まで残っていない可能性も考えられる。また、星種族の年齢分布に加え、 α 元素と鉄の存在比 $[\alpha/Fe]$ からIa型超新星がもたらす豊富な鉄をcosmic clockとして使うなどして、天の川銀河の過去100億年くらいまでの星形成史については大局的に理解されるようになった。一方で、位置天文学のアプローチでは、20世紀末のHipparcos衛星に続き、2013年に打ち上げられたGaia衛星により、天の川銀河の10億個以上の星の位置、年周視差、固有運動が測定され、Gaia DR3などの巨大な星のデータベースが作られた。これにより、Gaia-Sausage-Enceladus (GSE; 図2.2.1)とよばれる銀河が80-110億年前頃に衝突合体して、現在の天の川銀河になったことなど(Belokurov et al. 2018, Haywood et al. 2018など)、我々にとって最も重要な銀河である天の川銀河の形成の理解が大きく進んでおり、今なおGaia衛星のデータベースに基づく研究が盛んに行われている。

すばる望遠鏡やハッブル宇宙望遠鏡などの大型の可視・近赤外線望遠鏡が登場した1990年代からは、高赤方偏移にある(過去の宇宙にある)銀河の検出が可能になり、直接的に形成期にある銀河を調べられるようになった。これにより、宇宙年齢の約1/10程度の時代(赤方偏移8-10)までの銀河形成を辿れるようになった。宇宙星形成史と星の集積史、化学進化が観測的に明らかにされ、これら3つがTinsley (1980)の単純な星と元素合成の解析的モデルで説明できている(Madau & Dickinson 2014)。さらに観測的に明らかにされた赤方偏移2でピークを持つ星形成史は、宇宙論的スケールで重力が駆動する構造形成で作られた力学構造(DMH)の増加と宇宙膨張による物質の密度低下による質量降着率減少の2つの相反する効果の掛け合わせで説明できることが示されている(Harikane et al. 2018)。このような可視・近赤外線望遠鏡の観測と並行して、20世紀半ばからは電波観測による冷たいガスの観測から、星間物質の多様な分子や原子の存在が明らかになった。さらに、水素ガスの運動からは銀河の重力系が暗黒物質に支配されていることが広く受け入れられるようになった(Rubin & Ford 1970)。1980年代になって赤外線衛星IRASが登場すると、冷たいダスト放射が卓越する高光度赤外線銀河に代表される、爆発的な星形成を起こす銀河の存在が知られるようになった。さらに1990年代末になって高感度のサブミリ波観測が可能になると、ダスト放射の赤外線がサブミリ波に赤方偏移した、爆発的な星形成を起こすサブミリ波銀河(SMG)が検出されるようになるなど(Hughes et al. 1998, Barger et al. 1998)、赤外線から電波までの銀河形成研究が大きく花開いた。そして、2010年代からは、アルマ望遠鏡の登場でCO輝線などに基づく遠方銀河の分子ガスの性質が明らかにされると共に、従来より一桁暗い(サブ)ミリ波の光度の銀河(Dunlop et al. 2017, Aravena et al. 2020)が調べられるようになった。重力レンズ効果も利用してダストに隠された星形成を合わせた銀河の様子が描き出され、可視・近赤外線だけでは見落とされていた星形成史が理解されるようになった(Fujimoto et al. 2024)。さらに高赤方偏移銀河からの輝線の検出が数多くなされ、これまで知られていた強い炭素輝線([CII]158 μm)に加えて、星間物質の高い電離状態を反映して、強い酸素輝線([OIII]88 μm)を放射する高赤方偏移銀河が多数あることが分かった(Inoue et al. 2018)。

そして、JWSTが科学観測を開始した2022年以降は、まさに初代銀河(星)が誕生すると考えられる宇宙開闢200-300Myrの宇宙(赤方偏移15前後、現在の宇宙年齢の2%程度)にある銀河が検出できるようになった(Curtis-Lake et al. 2023, Carniani et al. 2024, Naidu et al. 2025a)。さらに、赤方偏移10を超える銀河に紫外線が非常に明るい銀河が多数見つか(図2.2.2; Harikane et al. 2023a)、従来の銀河形成モデルで説明が難しいことから、初期の構造形成を含めて、銀河形成に関する大きな議論が起こっている。これと並行して、赤方偏移5-10程度に星質量が $10^{11}M_{\odot}$ 程度と極めて大きく、星形成を止めた銀河(quiescent銀河)も含めた大質量銀河候補の報告もされており、正体がAGNであることが分かった候補天体を除いて、宇宙初期の大質量銀河形成の議論がなされている(Labbe et al. 2023, Xiao et al. 2024, de Graaff et al. 2025)。また、この時代に窒素過剰な銀河が多く存在し、元素組成比の類似性から球状星団の形成現場を観測的に捉えた可能性が出ている(Cameron et al. 2023, Isobe et al. 2023, Senchyna et al. 2024)。しかし、初期宇宙での窒素過剰をどのように作り出すかには諸説あり、未だ理解されていない。同様に鉄過剰銀河も報告されており(Nakane et al. 2025)、星形成後に短

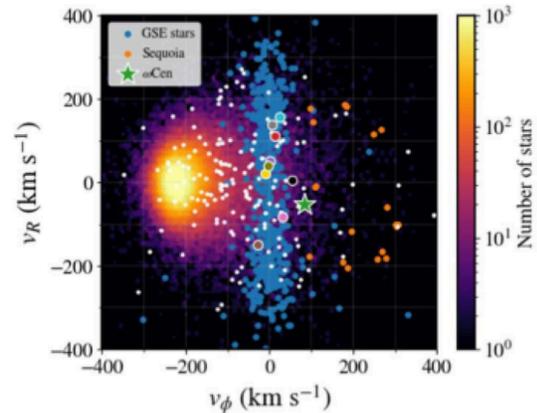


図2.2.1 : Gaia衛星によって得られた天の川銀河内の星の視線方向と天球面方向の速度。一直線に並ぶ青色の点がGSEの星。(Limberg et al. 2022より)

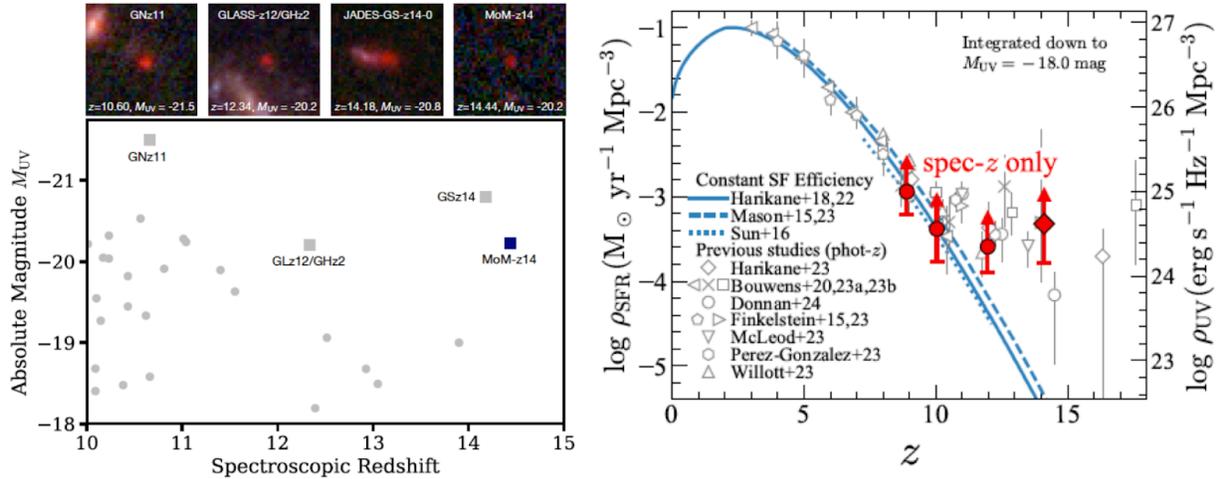


図2.2.2: (左) JWSTで見つけられ分光同定された $z=10-15$ の銀河の紫外線絶対光度と赤方偏移の分布。図中に名前が書かれた4つの明るい銀河については、上段に画像が示されている。(Naidu et al. 2025aより)。(右) 分光同定された $z \rightarrow 10$ 銀河だけから求めた宇宙星形成率密度 ρ_{SFR} の下限值(矢印付き赤色丸)。白抜き黒印は測光サンプルから見積られた ρ_{SFR} 。青線は宇宙星形成率密度の進化モデルで、構造形成モデルのDMHに星形成効率一定を仮定して得られたもの(Harikane et al. 2025より)。

時間で起こるIa型超新星爆発や対不安定型超新星の可能性なども指摘されるなど、大きく研究が進んでいる。さらに、銀河形態についても早い時代の銀河に円盤が存在していた可能性が指摘されている(Ono et al. 2025)。

アルマ望遠鏡のデータも合わせて、初期銀河の回転やアウトフローなど動力学も調べられているが、観測された速度勾配が、銀河回転によるものなのか、銀河合体やアウトフローなどによるものなのか、感度と空間分解能の不足の問題で結論づけるのが難しい場合が多く、未だその全容は明らかになっていない(Rizzo et al. 2020, Xu et al. 2024, 2025)。

銀河形成の理論研究も大きく進んだ。20世紀末からは、コンピュータの性能向上に伴い、宇宙論的シミュレーションが可能となり、フィラメント状の大規模構造と銀河が、冷たい暗黒物質の重力成長で形作られたこと、さらには銀河を宿すDMHの質量密度分布が半径 r に対して普遍的に、中心部で $\propto 1/r$ 、外周部で $\propto 1/r^3$ で近似されるNFWプロファイルで記述できること(Navarro, Frenk, & White 1997)が示されるなど、銀河形成の理論的基礎が作られた。その後は、このような構造形成に基づいて、準解析的モデル、さらには数値シミュレーションから銀河の観測量の説明が行われている。しかし、単純な理論モデルでは、光度関数などの統計量が説明できないことから、FB効果とよばれる星形成による加熱(もしくはAGNによる運動量の付加)などによって星形成が抑制されることが必要だと考えられるようになった。一方で、FB効果の強さについては大きな不定性があるため、理論的に銀河形成を理解する上での最大の課題として、今なお議論は続いている。最近では、FB効果を含めた銀河形成をバリオン物理から理解するのではなく、DMHと銀河の個数密度に基づいて、構造形成モデルと観測結果を繋ぐアバダンスマッチングという古典的手法で(さらにDMHの合体の歴史を考慮しながら)、多数の観測量を関係づけたUniverseMachineとよばれる準経験的モデルが作られている。構造形成モデルで作られたDMHと観測された銀河が関係づけられ、これまで議論されてきたDMH質量に対する星質量の依存性はもとより、あるDMH質量に対する星形成率の進化など、従来になかった視点での銀河形成の理論的な理解も進められている(Behroozi et al. 2019)。

■ 超巨大ブラックホールの起源の解明

20世紀末には、電波からX線にわたるQSOなどの活動銀河核の多波長観測から、銀河の中心にある大質量ブラックホールの存在が広く受け入れられるようになった。1990年代には可視・近赤外線や電波観測に基づいて、銀河中心の星やガスの運動で求めた力学的質量から、極めて質量密度が高い領域が見つかり、銀河中心にSMBHが存在する確たる証拠が得られた(Nakai, Inoue & Miyoshi 1993, Genzel et al. 1996, Ghez et al. 1998)。これらは、その後のSMBHのブラックホールシャドウの観測の成功に繋がることになる(Event Horizon Telescope Collaboration 2019, 2022)。このようにして知られるようになったSMBHであるが、その起源については、観測的そして理論的に理解されておらず、銀河天文学における重要課題の一つとして活発に研究されている。

2000年代、SDSS探査などの可視・近赤外線観測から高赤方偏移 $z\sim 6$ までQSOが見つかり(Fan et al. 2001)、これらのSMBHの質量を測定すると $10^9 M_\odot$ のSMBHであることが分かった。 $z\sim 6$ の時代、つまり宇宙がビッグバンで誕生してから僅か10億年、という短い時間のうちにSMBHを作ることは、標準的な質量降着(エディントン降着)では説明できないことから、超エディントン降着やSMBH合体などで成長した可能性が探られた。近年では、種ブラックホールとよばれるSMBH形成の最初にできるブラックホールの質量が大きく、数百から数万太陽質量だったのではないかと考えられるようになった。一方でこのような種ブラックホールがどのように作られたかについてはよく分かっておらず、大質量の恒星ブラックホールばかりでなく、初代星の星団で作られた複数の恒星ブラックホールの合体、さらには原始ガスの冷却の効率が悪いことから巨大ガス雲が作られて直接的に重力崩壊したシナリオまで議論されている(図2.2.3左; Greene, Strader, & Ho 2020)。このようなシナリオが提起されているものの、種ブラックホールの形成については観測的には殆ど理解されていない。また、2000年頃にSMBHの質量 M_{BH} と銀河の星質量 M^* (もしくはバルジの星質量または速度分散)の間($M_{\text{BH}}-M^*$)にスケーリング関係が存在することが報告された(図2.2.3中央; Magorrian et al. 1998)。銀河の星質量に対してSMBHの質量が1/1000程度になっており、この質量比がSMBHごとに殆ど変わらず、SMBHの質量にも大きく依存しないことから、銀河形成とSMBH形成がお互いに影響し合う、共進化があったと考えられてきた。こ

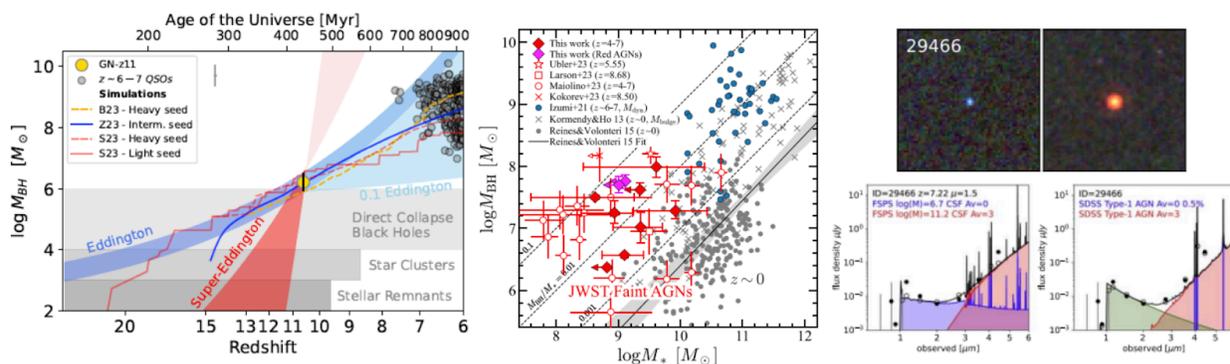


図2.2.3 : (左) JWSTで見つかった $z=10.6$ 銀河(GN-z11)に対して推定されたブラックホール質量と赤方偏移(黄色丸印)。青色と赤色の影は、それぞれエディントン降着と超エディントン降着でGN-z11のブラックホールが成長した場合の質量-赤方偏移関係。シアンの色は0.1倍エディントン降着で成長を続けた場合。灰色の色は、3つの種ブラックホールが許される質量範囲を示し、上から順に、直接崩壊、星団、恒星の残骸による種ブラックホールに対応する。黒丸はそれまでに報告されていた広輝線AGN (Maiolino et al. 2024より)。(中央) $M_{\text{BH}}-M^*$ 関係。赤色とマゼンタ印がJWSTで見つかるようになった $z\sim 4-7$ の暗いAGN。灰色丸は $z=0$ のAGN。灰色Xも同様だが、x軸の値は星質量ではなく、バルジ質量。黒線は $z=0$ の $M_{\text{BH}}-M^*$ 関係。黒鎖線は上から順に $M_{\text{BH}}/M^*=0.1, 0.01, 0.001$ を示す。青丸はすばるで見つけた暗い $z\sim 6$ AGN (Harikane et al. 2023bより)。(右) 上段はID29466と名付けられた $z=7$ LRDの静止系紫外線(左)と可視光(右)のJWST画像。下段は、ID29466のスペクトルエネルギー分布(黒印)で、左はダスト減光が少ない星種族(青)と多い星種族(赤)の2つのモデルで説明した場合。右は左と同様だが、広輝線AGNで説明した場合(Labbe et al. 2025より)。

のような研究の中で、すばる望遠鏡とアルマ望遠鏡では、高赤方偏移における低質量側の $M_{\text{BH}}-M^*$ 関係を示す重要な貢献をしてきた(Izumi et al. 2019)。

2022年にJWSTの高感度の近赤外線観測が始まると、SMBH研究に新たな流れが生まれた。まず、これまでハッブル宇宙望遠鏡などで星形成銀河に対して、高い感度でBalmer輝線のスペクトルが得られるようになると、 1000 km s^{-1} を超える広輝線が多数見つかり、比較的高い割合(10-20%程度)の高赤方偏移銀河が、広輝線が見られる1型のAGN(2型のAGNを含めるとそれ以上)であることが分かった。つまり、これまで星形成銀河だと考えられてきた多くの高赤方偏移銀河にAGNの活動があることが明らかになったのである。さらに、1型のAGNについてブラックホール質量を求めると、 $10^{6-8} M_{\odot}$ 程度のSMBHであることが分かった。一方で、星質量は $10^{7-9} M_{\odot}$ 程度であり、現在の宇宙に見られる $M_{\text{BH}}-M^*$ のスケール関係よりも1-2桁 M_{BH} が大きいブラックホール(overmassiveブラックホールとよばれる)が多数あることが指摘されている(図2.2.3中央)。このことから銀河の中でSMBHが先に成長し、その後に星質量が増大していき、現在の $M_{\text{BH}}-M^*$ のスケール関係に落ち着いた可能性もある(Harikane et al. 2023b)。また、赤方偏移10を超えた銀河に対する、X線検出の報告、もしくは輝線に基づく高い電子密度の測定結果などから、形成最初期のSMBH候補が報告され、種ブラックホールに対する制限が強められつつある(図2.2.3左;Maiolino et al. 2024, Bogdan et al. 2024, Naplitano et al. 2025)。さらに、JWSTで見つけた1型AGNのような天体の中には、静止系紫外線で青く、可視光で赤いスペクトルを持ってほぼ点源になっている天体が多数あることが分かった(図2.2.3右)。このような測光的、形態的性質をもつ天体をLittle Red Dot (LRD)とよび、精力的に調べられている(Greene et al. 2024, Labbe et al. 2025)。LRDはX線や電波で弱いことに加え、静止系紫外線-可視光スペクトルの特徴的な形状をもっている。それらの中でもAGNや星のダスト減光では説明できないほど赤く、数千Kの黒体放射で近似される連続光を持ち、強い水素吸収線が見られて、あたかもブラックホールに恒星のような大気があると考えられる天体(ブラックホール星;BH*)も報告されている(Naidu et al. 2025b)。その後、このような天体はブラックホール周りにガスエンベロープ/コクーンがある理論モデルなどで一般化された議論が行われている。LRDはSMBH形成やその起源(中間質量ブラックホールや超大質量星)に関わる重要な天体の可能性もあるため、このような研究は現在(2026年)急展開している。

■ 銀河-銀河間物質の進化の理解

ビッグバンから間もない頃の宇宙は、高温の光子バリオン流体で満たされていたと考えられている。このようなプラズマ状態にあったガスは、宇宙マイクロ波背景放射(CMB)の時代(赤方偏移 ~ 1000)の頃に、原子ガス(原子ガスは電氣的に中性であるため中性ガスともいう)に変わることによって、中性ガスで満たされた宇宙になった。このようなガスは、放射の影響を受けずに重力で形作られた大規模構造と一体となり、その後の宇宙大規模構造の中でのDMH、銀河、銀河群、銀河団の形成へと繋がり、これらのガスがビリアル平衡に達して熱的X線を放つ高温プラズマとなった。このような過程の初期に放射

された紫外線は、大規模構造の中のガスを電離したと考えられ、これを宇宙再電離とよぶ。これに続く時代も銀河はSMBHと星形成に伴うインフローとアウトフロー（さらには銀河合体過程）などにより、銀河周囲の銀河周辺物質(CGM)さらにはIGMとの間で物質や放射のやり取りを経て現在の銀河になったと考えられている。このような物質と放射のやり取りを含めた銀河形成の理解は、米国のAstro2020 Decadal Surveyあげられた3つの主要課題のうちの1つの課題(cosmic ecosystem)となっており、物質循環を通じた星・銀河形成の描像を得ることの重要性が認識されている。

一方でこれらを観測的に調べることは容易ではない。これは、CGMやIGMは非常に希薄であるためであるが、一つの手法として、低周波電波観測に基づき、自由電子の散乱の指標となる分散測定(DM)、さらに磁場と電子密度の積にあたる回転測定(RM)などを用いて銀河や銀河団の物質分布や磁場の測定がなされてきた。特に近年、高速電波バースト(FRB)を用いた研究により、宇宙の大規模構造におけるミッシングバリオンの存在が実証されたほか(Macquart et al. 2020)、特定の銀河ハローを貫くFRBの観測から、ハロー内の磁場強度が予想以上に希薄であることが明らかにされた(Prochaska et al. 2019)。また、RMにより銀河団内部や大規模構造のフィラメントにおける磁場構造が描き出されてきた(Vacca et al. 2016; Vernstrom et al. 2019)。さらに赤方偏移が1を超える銀河形成期のCGMとIGMについては、伝統的にQSOなどの明るい背景光源にみられる可視光の吸収線を用いた研究がなされてきた。しかし、水素については、すばる望遠鏡の先駆的研究もあり、Ly α ハロー(LAH)やLy α プローブ(LAB)といった星形成銀河周辺のLy α 輝線の広がり(Steidel et al. 2000, Matsuda et al. 2004, Hayashino et al. 2005, Leclerc et al. 2017)が見つかるようになり、20世紀末から知られていた電波銀河周辺ではなくQSO周辺のLy α が差し渡しで400kpcを超えてIGMへと広がるLy α 輝線の広がり(Cantalupo et al. 2014)などから、CGMからIGMへと(Umehata et al. 2019, Bacon et al. 2021)物質の大半を占める水素ガスの分布と密度、電離についての理解が進められてきた(図2.2.4上段)。さらに、明るい背景銀河のスペクトルに現れるLy α 吸収から宇宙論的スケールで水素ガスの空間分布を描くHIトモグラフィーの技術も提唱・確立され(Lee et al. 2014, 2018)、すばる広領域観測で同定されてきた銀河の密度超過領域(e.g. Kodama et al. 2001; Tanaka et al. 2005)のような構造と比較することで、水素ガスで描かれた大規模構造との関係が調べられている(図2.2.4中段)。これにより、大規模構造の中でHIガスの集中が見られる位置に星形成銀河が見られない様子が報告されており、これが観測バイアス(星形成

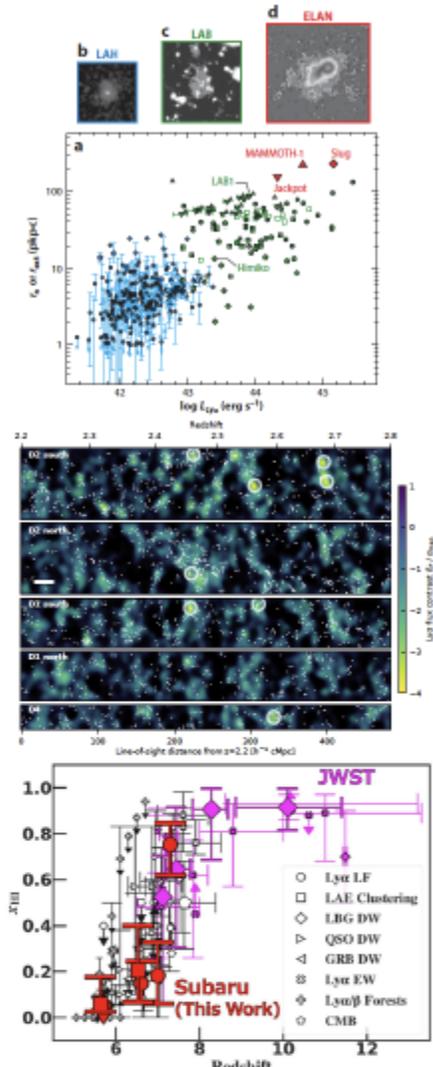


図 2.4.4: (上段) パネル a は銀河から CGM から IGM に繋がる Ly α 輝線構造の半径と光度の観測結果まとめ。銀河周辺に約 1-10kpc 半径で広がる Ly α ハロー(LAH)を青色、約 10-100kpc で広がる Ly α プローブ(LAB)を緑色、約 100kpc 以上の enormous Ly α nebula (ELAN)を赤色で示す。特に Slug (Cantalupo et al. 2014)などが IGM へ繋がる Ly α 構造。パネル b,c,d は LAH, LAB, ELAN の Ly α 輝線画像の例 (Ouchi et al. 2020 より)。(中段) HI トモグラフィーで得られた宇宙論(100Mpc)規模の Ly α フラックスコントラストが色で示され、黒-青-緑-黄色の順で HI ガス吸収が強い。8つの白丸は HI ガス吸収が最も強い8領域を示す。白点は分光同定された銀河の位置 (Newman et al. 2022 より)。(下段) 宇宙体積平均の中性水素割合 x_{HI} と赤方偏移の関係。マゼンタ印が JWST の星形成銀河の Ly α 減衰翼吸収から求めた x_{HI} で、赤印はすばるの LAE を用いて求められたもの。黒印は QSO や GRB の Ly α 減衰翼吸収や QSO の GP 吸収、CMB の τ などから見積られた値 (Umeda et al. 2025 より)。

銀河の分光による選択効果)でなければ、従来の大規模構造の結節点になる位置で起こる銀河形成の一般的な描像が覆る可能性も指摘されている(Newman et al. 2022)。一方で、金属については、IGMの金属吸収線が赤方偏移6程度の初期の宇宙にまで観測されており、早い時代から銀河アウトフローなどで金属汚染が進んできたことが明らかにされ(Ryan-Weber et al. 2009, Becker et al. 2009)、これらは最近のJWST観測でも確認されている(Carniani et al. 2024, Xu et al. 2025)。吸収線からCGMの金属分布や電離状態(Rudie et al. 2019)も精密測定される一方で、アルマ望遠鏡観測による初期銀河の炭素輝線[CII]のCGMへの広がり(Fujimoto et al. 2019)が見つかったことから、金属汚染されたCGMの様子やその起源についても議論されるようになった。

さらに赤方偏移が5-6より前の時代は宇宙再電離との関係が不可分となる。従来のQSO吸収線系と銀河の空間相関から銀河形成とIGMの関係を調べる研究(Adelberger et al. 2005)は、JWSTの登場により電離構造も含めて、宇宙再電離研究へと発展している(Kashino et al. 2023, Champagne et al. 2025)。これらの研究を含めて、現状の宇宙再電離研究はIGMのガスの電離状態について、背景にある明るい光源(背景光源)が散乱や吸収されることを元に調べられている。背景光源の一つ目にはCMBがある。CMBの観測により、前景の電離ガスの自由電子がもたらすトムソン散乱の光学的厚さが $\tau=0.054\pm 0.007$ であることが分かっており、宇宙再電離時期を推定すると $z=7.67\pm 0.73$ 程度であるとPlanck衛星の最新のデータから得られている(Planck collaboration 2020)。(なお、WMAP衛星や初期のPlanck衛星の結果は、前景光の差し引きの問題などで大きな τ の値が得られ、宇宙再電離の時期が最大で $z=17$ と言われた時期もあった; Spergel et al. 2003。)CMBからは、現在の観測技術で測定可能なのは τ の値に留まり、赤方偏移進化の情報がなく、宇宙再電離史の全体像はこれだけでは分からない。背景光源の二つ目は、QSOやGRB、銀河である。代表的な研究が、QSOのスペクトルの水素Ly α 吸収(GP吸収)を調べるものである(Gunn & Peterson 1965)。2000年代には、SDSSのQSOスペクトルに見られるGP吸収から、宇宙再電離の終了時期は $z\sim 6$ であると考えられるようになった(Fan et al. 2006)。しかし最近では、QSOのGP吸収量の分散が $z\sim 5$ 台でも大きく、この時代にもneutral hydrogen islandとよばれる小さい中性水素の領域があることが指摘され、電離光子の平均自由行程の測定結果も合わせて、宇宙再電離終了時期は $z\sim 5.3$ だと考えられている(Kulkarni et al. 2019, Zhu et al. 2023)。宇宙再電離終了時期はこのようにして理解されてきたが、宇宙再電離初期に向けては、小さい中性水素割合でもGP吸収が強すぎて測定できない。そのため、吸収が弱い、長波長側のLy α 減衰翼吸収を用いた観測が2000年から2020年にかけて盛んに行われた。ここで背景光源として使われたのはQSOに加え、すばる望遠鏡で捉えた当時最遠方のGRBや広領域探査で得られたLy α emitter (LAE)であり、これらによって $z\sim 7.5$ くらいまでの時代の中性水素割合を測定し、誤差が大きいながらも宇宙再電離末期の姿を描き出した(Totani et al. 2006, Ouchi et al. 2010, Bañados et al. 2018)。一方で、理論研究の面からは、輻射輸送計算に基づくシミュレーションにより、電離源のそばから電離され、電離バブルとよばれる宇宙論的HII領域が作られて電離が進む描像(inside out)が広く受け入れられるようになった(Iliev et al. 2006)。そして、2022年以降はJWSTの登場によって、 $z\sim 13-14$ までのLAE、さらにはこれまで暗すぎて観測できなかった銀河の連続光に対するLy α 減衰翼吸収の測定が報告されている。これによれば、 $z\sim 8-14$ は既に中性水素割合が80-100%と高くなっており、宇宙再電離の主な時代は $z\sim 8$ から始まり、「遅い宇宙再電離」であったことが示された(図2.2.4下段; Nakane et al. 2024, Umeda et al. 2024)。さらにこれらはCMB観測から出された τ とも無矛盾であった。

このようにJWSTの観測開始直後に、研究は大きく進み、宇宙再電離史の全体像が俯瞰できるようになった。一方で、宇宙再電離の原因、つまり再電離源は何だったのか、については明らかにされていない。原因が星なのかAGNなのか、という議論は長く続き、2010年代には遠方銀河のX線スタックデータからX線の検出が報告され、AGN説が有力になった時期もあった(Treister et al. 2011)。しかし、このようなX線の検出が後続研究で再現できなかったため、棄却されている(Cowie et al. 2012)。もし、

AGNの寄与が無く、星形成銀河内の大質量星が電離源だと考えた場合、観測された銀河の紫外線光度関数とCMBの光学的厚みを整合的に説明するには、銀河の紫外線光度に対する電離光子の放射効率 ξ_{ion} と電離光子の銀河からの脱出率 f_{esc} が自由パラメータとなる。そして、 f_{esc} については20%と大きくないと宇宙再電離を説明できないことになる(Robertson et al. 2015)のだが、このような f_{esc} が大きい銀河も2010年代に見つかってきた。一方でJWST観測で見つかるようになった多くのAGNも電離源に寄与する可能性があるのだが、個数密度が高くないため、主な電離源にはならないことが報告されている(Harikane et al. 2023b)。そのため、今なお銀河の大質量星が主な電離源として有力視されている。しかし、これと前出の「遅い宇宙再電離」と同時に説明することには課題がある。遅い時代に再電離を起こすにはその時代に現れる大質量DMHに付随する銀河が原因になるのだが、これらの銀河の f_{esc} が大きくなってはならないこと、もしくは多くの銀河の f_{esc} が赤方偏移と共に増えなくてはならない。いずれも従来の銀河形成のモデルでは説明が難しく、新たな疑問となっている(Kageura et al. 2025)。

宇宙再電離の物理プロセスについては、電離バブルが作られ、宇宙再電離が進むという標準的な描像が正しいかどうか、観測的にはまだ明らかにされていない。そのため、宇宙再電離期(EoR)の中性水素ガスから放射される21cm輝線を直接的に捉える観測が期待される。EoR 21cm輝線の観測研究は2010年頃から盛んに行われ、LOFARや MWA、HERAといった低周波電波観測が行われているが、前景の電波(人工の電波との干渉や地球電離層、天の川銀河内の放射など)がEoR 21cm輝線の信号よりも何桁も強く、前景放射を取り除くことが難しい。そのため、未だEoR 21cm輝線の信号は検出できておらず、パワースペクトルにおいて予想されるEoR 21cm輝線の信号の1桁以上高いところに測定の上限值が付けられているのが現状である。一方で、EDGES実験による観測から、初代星出現時に出されるLy α 放射で水素のスピン温度が下がる効果(Wouthuysen-Field WF効果)に対応する電波吸収が $z \sim 17$ で検出されたと報告されている(Bowman et al. 2018)。しかし、後のSARASなどの追観測から、前景放射の差し引きによる問題が指摘され、この報告は否定されている(Singh et al. 2022)。EoR HI 21cm輝線の観測では、どのように前景放射を取り除いて前景放射よりも数桁低い微弱な信号を捉えるのかが課題となっている。

§2.2.4 今後の世界的動向

1990年代から2020年初頭まで、すばる望遠鏡などの8m級大型望遠鏡、ハッブル宇宙望遠鏡をはじめとする宇宙望遠鏡、さらに2010年代からはアルマ望遠鏡が加わり、本研究分野の観測をリードしてきた。そして、2022年から始まったJWSTの赤外線高感度の科学観測で、革新的な流れができていく。この流れは、2030年代にTMTなどの30m級望遠鏡、そして2040年代のHWOへと続いていくと予想される。一方で、すばるPFSやRubin、Euclid、Roman宇宙望遠鏡、GREX-PLUSなどの高感度広領域観測、アルマ望遠鏡2やSKA、ngVLAなどの電波観測、さらにJASMINEやLAPYUTAなどの特色ある

小型望遠鏡の観測により宇宙観測のデータ量は飛躍的に増え、観測される天体と波長域も大きく広がるのが期待される(図2.2.5)。これにより、以下の3つの科学目標に向けた研究が大きく進展して理解が大きく進み、達成される目標も出てくるだろう。

■ 銀河形成史の解明

現在の銀河研究の課題の一つ、明るすぎる $z>10$ 銀河が多い問題(§2.2.3)についてはGREX-PLUSの統計研究によって究極的に明るい天体までの検出が行われるだろう。既に知られている明るい銀河も含め、TMTなどの30m級望遠鏡の10pc程度に迫る空間分解能を利用した観測で、光源がAGNなのか、多数の星団からなるのか、明らかにされていくだろう。特に、強い重力レンズ効果を受けた明るい $z>10$ 銀河が今後見つかった場合は、1pcまでの構造が調べられ、明るい銀河の起源について決着つけられるだろう。同様に、銀河内の星間ガスにある、多様な元素の組成や銀河の動力学の課題(§2.2.3)については、30m級望遠鏡による吸収線観測や面分光観測といったJWSTより多くの光子を必要とする高い感度の分光観測に加え、アルマ2やngVLA、LAPYUTAなどの相補的な多波長観測で調べられていくだろう。さらに、EoRについては、SKAなどのHI 21cm輝線のデータとすばるPFSやRoman、Rubinの銀河データなどを合わせた観測研究の進展も期待できる。また、最終的には、重力レンズの増光も利用した上で、JWSTやHWOなどで見つかる初代星・銀河の候補天体についてTMTなどの30m級望遠鏡で金属輝線がないことを確認し、高い電離度を示すHeIIが強いことなどから、銀河形成の最後のミッシングピースとなっている初代星の形成現場となる有力な銀河まで見つけられるかもしれない。

このように、宇宙における多様な銀河の形成の研究が進められる一方で、天の川銀河の形成がどのように進んだかを知るには、やはり天の川銀河を詳しく調べる銀河考古学研究が必須である。JASMINEやGaiaの次世代衛星GaiaNIRでは、近赤外線の観測を行うことで、従来の銀河考古学研究では見えていなかった天の川銀河中心の星を捉え、まだ殆ど手付かずの銀河中心の構造が明らかにされるだろう。また、30m級望遠鏡の深い分光によって、天の川銀河はもとより、近傍銀河の星の元素組成が詳しく調べられるなど、重要な観測研究の進展が期待できる。さらに、2025年から始まったすばるPFSのすばる戦略枠プログラム(SSP)による銀河考古学研究のための観測から、近傍銀河の詳細な力学構造と質量分布が明らかにされるだろう。

理論研究の面では、計算能力の向上に伴って数値シミュレーションを中心に研究が発展していくことが期待される。観測の進展で得られた力学および構造、化学などの観測結果の説明を試みる中

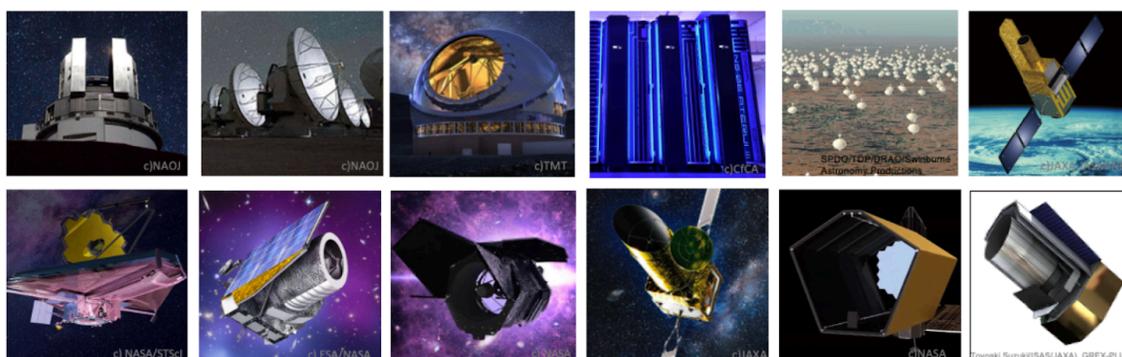


図2.2.5：3つの科学目標達成のために活躍が期待される望遠鏡や計算機の例。左上から右上、左下から左下へ準に、すばる望遠鏡、ALMA、TMT、アテルイIII、SKA、JASMINE、JWST、Euclid、Roman、LAPYUTA、HWO、GREX-PLUS。

で、初代星・銀河から現在の銀河へ、さらには天の川銀河への進化についての理解が大きく進むだろう。特に、これから質の高い多くの観測的制限が得られてくれば、銀河形成を理解する上で最大の障害となっているFB効果の問題も克服されることが期待される。

■ 超巨大ブラックホールの起源の解明

超巨大ブラックホールの起源を理解する上で、形成の最初の段階にある種ブラックホール、さらにはこれと超巨大ブラックホールを繋ぐ天体(中間質量ブラックホールを含む)を明らかにする必要があるだろう。現在、大きな議論になっているLRDは、種ブラックホールと超巨大ブラックホールを繋ぐ上で重要な天体かもしれず、LRDの研究の進展は超巨大ブラックホールの形成の理解を大きく進める可能性がある。LRDはX線や電波の放射が非常に弱く、可視光と近赤外線での観測が必要で、そのため30m級望遠鏡による高感度、高波長分解能観測による進展は大いに期待される。さらにRubin、Euclid、Roman、すばるPFSなどの可視光、近赤外線の大規模撮像・分光探査による近傍や低赤方偏移のLRD研究から、LRDの物理的性質と天体形成における役割が明らかになるだろう。また同時に、LRDではないAGNを含めた超巨大ブラックホール形成の研究は、すばるPFSやEuclid、Rubinなどの可視近赤外線の大規模観測研究に加え、SKAなどの電波観測やNewAthenaなどのX線観測により、非熱的放射を空間的・物理的に分離し、銀河進化の各段階におけるブラックホール成長の寄与をこれまで以上に高い精度で統計的に評価できるようになり、AGN フィードバックが銀河形成史に及ぼす影響を定量的に理解することに繋がるだろう。また、可視近赤外線観測を合わせて、高い空間分解能を持った観測により、母銀河をAGNと空間的に分解する統計研究が発展し、高赤方偏移でovermassiveブラックホールが平均的なものなのか、観測的な選択バイアスかについて理解が進み、銀河-超巨大ブラックホールの共進化問題に一定の結論が出されることが期待できる。さらに、このような統計研究により、超巨大ブラックホール形成に重要な質量降着率と合体割合などの理解も進むと考えられる。

■ 銀河-銀河間物質の進化の理解

銀河-銀河間物質を関係づけて、宇宙論的構造形成と銀河内部の星形成過程を結びつける「失われたリンク」を理解する上で、今後大きな発展が期待できるのは100Mpcを超えるスケールでガス分布をマッピングし、銀河との関係を明らかにする観測であろう。電波観測では、SKAにより、宇宙の夜明け以降の時代のFRBや電波銀河を多数見つけ、DMとRMの測定と銀河を関係づけることで、磁場も合わせて統計的に銀河-CGM-IGM関係の理解が大きく進むだろう。さらに可視-近赤外線観測では、現在進行中の広視野すばるPFSによるHIトモグラフィー作成とEuclid/Roman/ULTIMATE-Subaruなどの前景銀河の撮像・分光観測によってCGMや宇宙大規模構造にあるIGMの間の物質循環を通じた星・銀河形成の描像(cosmic ecosystem)を得ることも期待される。特に、共鳴線のLy α と再結合線のH α バルマー輝線を組み合わせた研究で、IGMの電離構造とLy α 放射メカニズムの理解が進み、課題となっている、大規模構造の中でHIガスの集中と星形成銀河の集中の関連の問題(Newman et al. 2022)についても、quiescent銀河も含めた全銀河分布で検証が可能になるだろう。ここに冷たいガスを直接的(さらには背景光源の吸収線で間接的)に捉えてトレースするLST/LIM/SKAなどの電波観測、電離ガスをトレースするSPHERExなどの可視-近赤外線の強度マッピング観測、ミッシングバリオンに代表される熱いガスをトレースする軟X線の広域観測も加われば、銀河-銀河間物質の関係を重層的に理解することに繋がるだろう。さらに宇宙再電離については、3つの課題、1)宇宙再電離史、2)再電離源、3)再電離過程のうち、1)については、今後JWSTによる星形成銀河のLy α 減衰翼吸収に基づく観測研究の進展で解決されると期待できる。ただし、星形成銀河のLy α 減衰翼吸収には、銀河の自己吸収に対応する減衰ライマン α 吸収線系(DLA)の無進化を仮定する必要があり系統的な不定性

が含まれている(同様にLAEを用いた場合のLy α 透過率の無進化の仮定もある)。この不定性の影響を評価するには、相補的な低質量銀河を母銀河にするGRBを用いることが有効だろう。HiZ-GUNDAMなどで探されたGRBに対し、Ly α 減衰翼吸収を調べてJWSTの結果を検証するべきであろう。また、RubinやEuclid、Romanの探査で見つかるであろう $z > 7$ のQSOを使った相補的な研究も重要な役割を果たすだろう。2)の再電離源については、鍵を握ると考えられる暗い星形成銀河を調べる必要がある。JWSTと重力レンズ効果を用いた大規模探査により、暗い星形成銀河の個数密度を求めることで、紫外線光度関数の暗い側の傾きが決まると共に、暗い側に向かって個数密度が減少する光度が分かる可能性がある。さらに、これらの天体に付随する暗いAGNの紫外線光度関数がRubin、EuclidやRoman、すばるPFSのデータの組み合わせで明らかになるだろう。また、紫外線光度関数だけでなく、 ξ_{ion} および f_{esc} (§2.2.3参照)を決める必要もあるが、前者はJWSTのBalmer輝線観測で制限を与えることができ、後者はTMTなどの30m級望遠鏡の低赤方偏移($z \sim 3-4$)銀河の高感度可視分光が力を発揮して、研究が進むだろう。AGNに対してはそこまで高い感度を必要としないことから、すばるPFS分光などの8m級望遠鏡の観測も有効である。さらに、低赤方偏移銀河に対してLAPYUTAの紫外線観測でも質量、光度と ξ_{ion} および f_{esc} の関係とその進化が明らかにされ、再電離源に対する一定の理解が得られるだろう。3)の再電離過程について最も期待されるのはSKAなどの低周波電波観測によるEoR ($z \sim 5-10$)のHI 21cm輝線観測であろう。これらの観測データに対して、前景放射を差し引いて自己相関パワースペクトルを求める努力が続けられるだろう。さらに、すばるPFSやRomanが広い領域で検出した遠方銀河との相互相関パワースペクトルから、前景放射の影響を受けずにEoR HI 21cm輝線の検出も期待できる。相互相関パワースペクトルからは、再電離期における銀河周りの中性水素分布が分かるようになり、理論予言されている宇宙論的電離バブルの成長で進んでいく描像のテストが行える。また、EoRに多数の小さい電離バブルが作られるか、少数の大きい電離バブルが作られるか、といった電離バブルの形態の問題とそれが再電離源と整合的かどうかのテストも行えるようになるだろう。このようにEoRのHI 21cm輝線の観測への期待は大きいですが、地上からの観測では電離層の影響で観測できない周波数帯があるなど、前景放射(§2.2.3)の影響も大きい。TSUKUYOMIやNASAの月面天文台計画(FARSIDE/FarView)などが成功すれば、前景放射の課題の多くが解決し、さらには高赤方偏移の低周波電波観測を成功に導くことも夢ではなくなるだろう。これにより、WF効果(§2.2.3)による電波吸収線、さらには初代星が出現前の宇宙暗黒時代を調べる新しい天文学観測に道が開かれるかもしれない。

§2.2.5 参考文献

- [1] Aoki, W. et al. (2007) ApJ, 655, 492
- [2] Frebel, A. & Norris, J. E. (2015) ARA&A, 53, 631
- [3] Keller, S. C. et al. (2014) Nature, 506, 463
- [4] Limberg, G. et al. (2022) ApJ, 935, 109
- [5] Belokurov, V. et al. (2018) MNRAS, 478, 611
- [6] Haywood, M. et al. (2018) ApJ, 863, 113
- [7] Tinsley, B. M. et al. (1980) FCPh, 5, 287
- [8] Madau, P. & Dickinson, M. (2014) ARA&A, 52, 415
- [9] Harikane, Y. et al. (2018) PASJ, 70, 11
- [10] Rubin, V. C. & Ford, W. K. Jr. (1970), ApJ, 159, 379
- [11] Hughes, D. H. et al. (1998) Natur, 394, 241
- [12] Barger, A. J. et al. (1998) Natur, 394, 248

- [13] Dunlop, J. S. et al. (2017) MNRAS, 466, 861
- [14] Aravena, M. et al. (2020) ApJ, 901, 79
- [15] Fujimoto, S. et al. (2024) ApJS, 275, 36
- [16] Inoue, A. K. et al. (2016) Sci, 352, 1559
- [17] Curtis-Lake, E. et al. (2023) Nature Astronomy, 7, 622
- [18] Carniani, S. et al. (2024) Nature, 633, 318
- [19] Naidu, R. P. et al. (2025a) arXiv:2505.11263
- [20] Harikane, Y. et al. (2023a) ApJS, 265, 5
- [21] Labbe, I. et al. (2023) Nature, 616, 266
- [22] Xiao, M. et al. (2024) Nature, 635, 311
- [23] de Graaff, A. et al. (2025) A&A, 697A, 189
- [24] Cameron, A. J. et al. (2023) MNRAS, 523, 3516
- [25] Isobe, Y. et al. (2023) ApJ, 959, 100
- [26] Senchyna, P. et al. (2024) ApJ, 966, 92
- [27] Nakane, M. et al. (2025) arXiv:2503.11457
- [28] Ono, Y. et al. (2025) ApJ in press, arXiv:2502.08885
- [29] Rizzo, F. et al. (2020) Nature, 584, 201
- [30] Xu, Y. et al. (2024) ApJ, 976, 142
- [31] Xu, Y. et al. (2025) ApJ, 984, 182
- [32] Navarro, J. F., Frenk, C. S. & White, S. D. M. (1997) ApJ, 490, 493
- [33] Behroozi, P. et al. (2019) MNRAS, 488, 3143
- [34] Harikane, Y. et al. (2025) ApJ, 980, 138
- [35] Nakai, N., Inoue, M., & Miyoshi, M. (1993) Nature, 361, 45
- [36] Genzel, R. et al. (1996) ApJ, 472, 153
- [37] Ghez, A. et al. (1998) ApJ, 509, 678
- [38] Event Horizon Telescope Collaboration (2019) ApJ, 875, 1
- [39] Event Horizon Telescope Collaboration (2022) ApJ, 930, 12
- [40] Fan, X. et al. (2001) AJ, 122, 2833
- [41] Greene, J. E., Strader, J., Ho, L. C. (2020) ARA&A, 58, 257
- [42] Magorrian, J., et al. (1998) AJ, 115, 2285
- [43] Izumi, T., et al. (2019), 2019, PASJ, 71, 111
- [44] Maiolino, R. et al. (2024) Nature, 627, 59
- [45] Harikane, Y. et al. (2023b) ApJ, 959, 39
- [46] Labbe, I. et al. (2025) ApJ, 978, 92
- [47] Bogdan, A. et al. (2024) NatAs, 8, 126
- [48] Napolitano, L. et al. (2025) ApJ, 989, 75
- [49] Greene, J. et al. (2024) ApJ, 964, 39
- [50] Naidu, R. P. et al. (2025b) arXiv:2503.16596
- [51] Macquart, J. P. et al. (2020) Nature, 581, 391
- [52] Prochaska, J. X. et al. (2019), Science, 366, 231
- [53] Vacca, V. et al. (2016) A&A, 591, 13
- [54] Vernstrom, T. et al. (2019) ApJ, 878, 92
- [55] Steidel, C. C. et al. (2000) ApJ, 532, 170
- [56] Matsuda, Y. et al. (2004) AJ, 128, 569

- [57] Hayashino, T. et al. (2005) *AJ*, 128, 2073
- [58] Leclercq, F. et al. (2017) *A&A*, 608, 8
- [59] Cantalupo, S. et al. (2014) *Natur*, 506, 63
- [60] Umehata, H. et al. (2019) *Science*, 366, 97
- [61] Bacon, R. et al. (2021) *A&A*, 647, 107
- [62] Ouchi, M. et al. (2020) *ARA&A*, 58, 617
- [63] Lee, K.-G. et al. (2014) *ApJL*, 795, L12
- [64] Lee, K.-G. et al. (2018) *ApJS*, 237, 31
- [65] Kodama, T. et al. (2001) *ApJ*, 562, L9
- [66] Tanaka, M. et al. (2005) *MNRAS*, 362, 268
- [67] Newman, A. et al. (2022) *Natur*, 606, 475
- [68] Ryan-Weber, E. V. et al. (2009) *MNRAS*, 395, 1476
- [69] Becker, G. D. et al. (2009) *ApJ*, 698, 1010
- [70] Carniani, S. et al. (2024) *A&A*, 685, 99
- [71] Xu, Y. et al. (2025) *ApJ*, 984, 182
- [72] Rudie, G. C. et al. (2019) *ApJ*, 885, .61
- [73] Fujimoto, S. et al. (2019) *ApJ*, 887, 107
- [74] Adelberger, K. L. et al. (2005) *ApJ*, 629, 636
- [75] Kashino, D. et al. (2023) *ApJ*, 950, 66
- [76] Champagne, J. B. et al. (2025) *ApJ*, 981, 113
- [77] Planck Collaboration (2020) *A&A*, 641, 6
- [78] Spergel, D. N. et al. (2003) *ApJS*, 148, 175
- [79] Gunn, J. E. & Peterson B. A. (1965), *ApJ*, 142, 1633
- [80] Fan, X. et al. (2006) *ARA&A*, 44, 415
- [81] Kulkarni, G. et al. (2019) *MNRAS*, 485, 24
- [82] Zhu, Y. et al. (2023) *ApJ*, 955, 115
- [83] Totani, T. et al. (2006) *PASJ*, 58, 485
- [84] Ouchi, M. et al. (2010) *ApJ*, 723, 869
- [85] Bañados, E. et al. (2018) *Nature*, 553, 473
- [86] Iliev, I. T. et al. (2006) *MNRAS*, 369, 1625
- [87] Nakane, M. et al. (2024) *ApJ*, 967, 28
- [88] Umeda, H. et al. (2024) *ApJ*, 971, 124
- [89] Umeda, H. et al. (2025) *ApJS*, 277, 37
- [90] Robertson, B. E. et al. (2015) *ApJ*, 802, 19
- [91] Treister, E. et al. (2011) *Nature*, 474, 356
- [92] Cowie, L. L. et al. (2012) *ApJ*, 748, 50
- [93] Kageura, Y. et al. (2025) *ApJS*, 278, 33
- [94] Bowman, J. D. et al. (2018) *Nature*, 555, 67
- [95] Singh, S. et al. (2022) *NatAs*, 6, 607

§2.3 恒星・高密度天体・極限物理・マルチメッセンジャー天文学

恒星、突発天体は宇宙における元素の起源であり、地上実験では実現できない高エネルギー・高密度環境を実現する天体である。それらの素性を理解するためには、理論研究、数値計算、電磁波観測だけではなく、重力波、ニュートリノ、宇宙線などの全てのメッセンジャーを用いた研究が必要となる。またそれらは時間変化する天体であるため時系列情報も必要である。それらを理解することにより、高エネルギー・高密度環境での物理、宇宙における物質・元素の起源、宇宙の進化の解明が可能となる。

§2.3.1 当該分野の目的

宇宙でしか実現できない極限状況下での物理過程を明らかにし、宇宙における物質・元素の起源、宇宙の進化を明らかにする。

§2.3.2 当該分野の目標

■ 物質・元素の起源の解明 **Origin of matter and elements**

宇宙にあふれる多様な元素は恒星や突発天体で生成された。また宇宙線などの高エネルギー粒子を作るのもこれらの天体である。元素や高エネルギー粒子がどこでどのように生成されたのか明らかにする。

■ 宇宙の進化の解明 **Evolution of matter in the Universe**

宇宙の進化を駆動したのは恒星・突発天体である。また、突発天体は明るいため遠方宇宙の天体であっても直接観測できる。どのような天体が誕生直後の宇宙に存在したのか、またそれらがどのように宇宙進化や銀河系の進化を駆動したのかを明らかにする。

■ 高エネルギー天体・高密度天体の素性の解明 **Nature of high-energy and/or high-density objects**

宇宙では実験室では実現できない極限的な物理状態が実現される。それらの物理は天体や天体現象である超新星爆発や中性子星などの様々な状態に反映される。極限的な環境で実現される天体の素性を明らかにし、それを通じて基本的な物理法則の検証を行う。

§2.3.3 現在までの到達点

■ 物質・元素の起源の解明 **Origin of matter and elements**

元素の起源は、いくつか変更や改訂もあるものの1957年に出版されたB2FH(Burbidge et al. 1957)論文(Burbidge et al. 1957)で概観が確立された。標準ビッグバン元素合成理論(Steigman 2007)によると、ビッグバン直後急速に冷却する宇宙では水素、ヘリウム、少量のリチウムが合成される。合成されるリチウムの量は宇宙のパラメータにより、プランク衛星などによる宇宙マイクロ波背景放射の観測から決定されたパラメータを用いるとリチウム組成が水素組成の 5×10^{-10} 程度となることが(Steigman 2007) 予想されている。一方で、宇宙初期に形成され現在まで生き残る小質量星(金属欠乏星)の高

分散分光観測からは、リチウム組成がSpite Plateauと呼ばれる水素組成の 2×10^{-10} 程度の一定の値を取ることが知られており(Spite & Spite 1982)、標準ビッグバン元素合成理論と3倍程度のずれが報告されている。このずれを説明するために、新粒子などを含む新しい物理(Pospelov & Pradler 2010)や金属欠乏星内部でのLi破壊(Richard et al. 2005)などの研究が進んでいる。

宇宙において重元素は恒星やその超新星爆発で合成された。太陽の8 – 140倍程度の質量をもつ大質量星内部では核融合反応が起こり、最終的に鉄コアが形成される。鉄コアは最終的に重力崩壊を起こし、一部の大質量星は重力崩壊型超新星として爆発する。また太陽の140-300倍程度の質量をもつ大質量星は電子陽電子対生成により爆発的な酸素燃焼が起こり、対生成型超新星爆発として爆発する。これらの爆発により最初の重元素(炭素より重い元素)が宇宙空間に供給される。重元素を含むガスから次の世代の星が形成され、大質量星は超新星爆発を起こす。また白色矮星の爆発であるIa型超新星も主に鉄を宇宙に供給する。以上の研究は、主に一次元で計算されている恒星の進化計算に基づいた一次元あるいは多次元の超新星爆発シミュレーション・元素合成計算に基づいており、超新星爆発の元素の起源に対する大局的な描像は得られている(Nomoto et al. 2013)。

鉄族元素より重い元素は中性子捕獲反応によって合成される(Burbidge et al. 1957)。中性子捕獲反応には2種類の過程があり、中性子供給が少なく安定核をたどるsプロセス(Käppeler et al. 2011)と中性子供給が多く重い原子核を一瞬で合成するrプロセス(Cowan et al. 2021)が存在する。sプロセスは漸近赤色巨星分枝星内部で起こると考えられているが、rプロセスの合成サイトは長年謎であり、特殊な超新星爆発や中性子星合体といったサイトが提案されている(Thielemann et al. 2017)。電磁波以外の観測手段も用いるマルチメッセンジャー天文学により、2017年に重力波望遠鏡advanced LIGO, advanced Virgoによって中性子星合体GW170817が発見された(Abbott et al. 2017a)。この中性子星合体はキロノバAT2017gfoを付随しており(Abbott et al. 2017b)、すばる望遠鏡などを用いた観測からランタノイド元素の合成が示され(Utsumi et al. 2017; Tominaga et al. 2018)、少なくとも一部のrプロセス元素が中性子星合体で合成されていることが決定的となった(Tanaka et al. 2017)。しかし、中性子星合体がアクチノイド元素などを含む現在の宇宙の全てのrプロセス元素を説明できるかは未だ明らかとなっていない(Holmbeck & Andrews 2024)。また、これまで多数行われてきた金属欠乏星の化学組成の高分散分光観測から明らかとなっている宇宙の化学進化を説明できるかの検証も必要である(Hirai et al. 2025)。そのほか、p過程やn過程と呼ばれる元素合成過程も研究されているが、どの天体のどの段階で合成されるのかは未だ明らかとなっていない(Arnould & Goriely 2003; Arnould et al. 2007)。

さらに、物質の起源としては、宇宙からは宇宙線と呼ばれる高エネルギー粒子が降り注いでいることが20世紀初頭に明らかとなった(Hess 1912)。エネルギーの低い宇宙線は銀河系内の超新星残骸で加速されていると考えられているが、その確固たる証拠はいまだ得られていない。またエネルギーの高い宇宙線については、銀河系外の起源と考えられているが、どの天体が加速源であるかは未だ明らかとなっておらず、物理学、天文学における長年の謎である。Auger, TAなどにより最高エネルギー宇宙線として 10^{20} eVものエネルギーを持った宇宙線が観測されている(Abraham et al. 2007; Abu-Zayyad et al. 2013)。また、銀河系内起源と銀河系外起源のちょうど中間に位置する 10^{15} eVの宇宙線はPeVatronと呼ばれその起源も探られている(Abramowski et al. 2016)。

■ 宇宙の進化の解明 **Evolution of matter in the Universe**

水素、ヘリウム、少量のリチウムからなる宇宙では密度の高い場所に物質が集まり初代星が形成される。CfCAなどのスーパーコンピュータを用いて初代星形成シミュレーションが行われ、初代星として

宇宙年齢を超える寿命を持つ小質量星が形成された可能性も提案されているが、総じて現在の宇宙より大質量星が多かったと考えられている(Hirano et al. 2014; Susa et al. 2014)。上記のように、大質量星、小質量星は超新星爆発を起こし、次世代の星を形成する。星形成、星の進化、超新星爆発というサイクルを繰り返し、重元素に満ち溢れた現在の宇宙が形成される。この過程は宇宙の化学進化と呼ばれ、数値計算と観測を比較することによって、宇宙初期には重力崩壊型超新星が重元素合成に主に寄与し、銀河系ハローでは太陽組成の1/10程度の鉄組成を持つ時期からIa型超新星の寄与が始まったことが明らかとなっている(Spite & Spite 1982; Kobayashi et al. 2006)。

宇宙の化学進化は古くから銀河系に存在する金属欠乏星の観測から明らかにされてきた。1950年代の金属欠乏星の最初の発見(Chamberlain & Aller 1951)から、多数の金属欠乏星探査が行われ(Beers et al. 1992; Christlieb et al. 2008; Da Costa et al. 2019)、それらの高分散分光追観測によって詳細な元素組成が明らかにされてきた(Aoki et al. 2013)。現在までに太陽の1/1000万以下の鉄組成を示す金属欠乏星が発見されている(Keller et al. 2014)。当初は個別の特徴的な金属欠乏星を用いて宇宙の元素合成に寄与した天体を明らかにする試みが行われ、上記の元素の起源という観点の研究が積み重ねられてきた(Tominaga et al. 2014)。近年は、Gaiaによる固有運動の観測(Vallenari et al. 2023)、SEGUE(Yanny et al. 2009)、APOGEE(Majewski et al. 2017)、LAMOST(Cui et al. 2012)、GALAH(Buder et al. 2025)、RAVE(Steinmetz et al. 2020)などの多天体分光観測による多数の金属欠乏星の元素組成や視線速度の観測により、多数の恒星の元素組成情報に加えて6次元位置運動情報が(Pospelov & Pradler 2010) 得られている。これにより銀河系に降着してきた銀河の名残が観測されるなど(Helmi et al. 2018)、銀河系のような円盤銀河がどのように形成されてきたのかという研究が進んでいる。(Richard et al. 2005)

また、JWSTによって遠方に存在する初代銀河の観測が実現され、それらの銀河の分光観測により初代銀河の元素組成も明らかとなってきている。一部の銀河では理論予想よりも窒素の質量比が高いことが報告され、上記の元素の起源という観点からも初代星による重元素汚染がその質量比を説明できるかについて大質量星の進化も含めた研究が進められている(Watanabe et al. 2024)。さらに、それらの集合体としての銀河の進化の研究も進められている(Finkelstein et al. 2023)。

■ 高エネルギー天体・高密度天体の素性の解明 **Nature of high-energy and/or high-density objects**

2000年代以降様々な突発天体探査が行われ、超高輝度超新星(Gal-Yam 2012)や高速青色突発天体(Perley et al. 2019)などのこれまで想定していなかった突発天体が多数発見されている。突発天体は明るいため遠方宇宙の天体であっても直接観測できる。そのため、過去に起こった突発天体を観測することで宇宙の進化を探る研究が行われている。例えば、すばる望遠鏡Hyper Suprime-Cam (HSC)を用いた探査では、赤方偏移1を超える遠方の超新星が発見され、宇宙星形成史のピークである赤方偏移2に届こうとしている(Yasuda et al. 2019)。超新星爆発の観測からは超新星爆発の爆発エネルギー、放出物質の質量、放出される重元素の質量、星周物質の構造などがわかり(Moriya et al. 2013)、母銀河との関係からどういった親星が超新星爆発を起こしたのかも研究され、それぞれの超新星爆発・突発天体が大質量星起源であるのかなど調べられている(Anderson et al. 2015)。またこれまで可視光による観測が主に行われてきたが、電波による観測で星周物質の構造を探る研究も行われ、多くの大質量星が爆発直前に激しい質量放出を行っていることが明らかとなってきている(Nomoto et al. 2013; Iwata et al. 2025)。

一方で理論的には、親星や爆発メカニズムの解明のため様々な大規模数値計算が行われている。長年爆発が実現できない時代が続いてきた重力崩壊型超新星(Sumiyoshi et al. 2005)については、より現実的な状態方程式を用いた多次元効果を考慮したニュートリノ輻射流体計算を行うことで爆発が(完全に観測を再現できているわけではないが)実現される時代になっている(Takiwaki et al. 2016)。しかし第一原理計算は依然として困難であり、第一原理に基づいて超新星爆発が爆発するかどうかを調べることには未だ高い障壁がある。しかし、近年解像度は不十分ではあるもののボルツマン方程式を解く第一原理計算(Käppeler et al. 2011)も行われつつある(Nagakura et al. 2019)。また、多次元数値計算から重力波・ニュートリノ信号の予言も得られ、超新星爆発のマルチメッセンジャー天文学の実現に期待が高まっている(Takiwaki et al. 2021)。また、ニュートリノ加熱以外の爆発についても研究が進んでおり、磁気回転により爆発する超新星爆発の計算も行われている(Takiwaki & Kotake 2011)。

一方で、理論的に爆発が再現できつつあることから、観測との定量的な比較も可能となってきた(Burrows et al. 2024)。例えば、可視光、電波などで観測される超新星爆発の光度曲線、スペクトル(Moriya & Singh 2024)、X線で観測される超新星残骸の元素分布(Sato et al. 2025)、放射性元素の質量(Wongwathanarat et al. 2017)、中性子星キック(Katsuda et al. 2018)や銀河団ガスの元素組成(Werner et al. 2008)、紫外線、可視光で観測される金属欠乏星の元素組成との比較(Heger & Woosley 2010)が行われているが、完全に観測を説明できる理論モデルはまだ構築されていない。上記の宇宙の進化の研究にはどのような質量の大質量星がどのような超新星爆発を起こすのかの情報が重要となる(Sukhbold et al. 2018)が、上記のように完全な数値計算が実現されていないため未だ明らかになっていない。(Cowan et al. 2021) 加えて、超新星爆発後に残される中性子星やブラックホールの性質の研究も進められているが、どのような大質量星がどのような中心天体を残すのかは、親星の回転や磁場などにもよるため決着はついていない。特に大きな問題としては、(Thielemann et al. 2017) マグネターと呼ばれる強磁場中性子星の形成過程(Wheeler et al. 2000)、中性子星と恒星質量ブラックホールの質量のギャップ(Özel et al. 2010)がどのように形成されるかは未だ明らかとなっていない。

Ia型超新星についても連星系をなす白色矮星の爆発であることは明らかとなっているものの、伴星がどのような星であるのかは研究が続けられている(Maoz et al. 2014)。ブラックホールに関しては重力波の観測から多数の非常に重いブラックホール連星合体が発見されており、星質量ブラックホールがどのように成長したのかも調査されている。その研究では種族合成モデルを用いた数値計算も行われている(Belczynski et al. 2016)。

また可視光以外でも突発天体の観測は多数行われている。例えば電波帯ではParkes望遠鏡、CHIME望遠鏡などにより高速電波バーストと呼ばれる数ミリ秒という短時間だけ電波で明るく光る天体が観測されている(Petroff et al. 2019)。高速電波バーストにはバーストを繰り返すリピーターと繰り返さないノンリピーターがあり、一部のリピーターはマグネター起源ではないかと考えられている(Bochenek et al. 2020)。また、リピーターとノンリピーターが異なる種族であるかも明らかではなく、母銀河の性質に違いがないとする研究(Gordon et al. 2023)や、ノンリピーターと考えられている中にもリピーターが含まれているという研究(Ikebe et al. 2023)がある。電波での突発天体の観測は未だ途上であり、特定の突発天体に対する追観測は行われてきたものの(Bietenholz et al. 2021)、これまで系統的な探査はVLAによる大規模探査に合わせて行われたものが数例ある程度であったが(Mooley et al. 2016; Zhang et al. 2022)、近年その重要性が認識されSKAに向けたパスファインダーであるASKAP、MeerKATによる探査が行われ始めている(Murphy et al. 2021; Fender et al. 2016)。また、数分から数時間周期でパルス信号を呈するLong-period transients (LPT)という天体も発見されてきている(Rea et al.

2026)。ガンマ線で短時間光るガンマ線バーストもSwift衛星などにより観測されている(Kumar & Zhang 2015)。ガンマ線バーストはそのプロンプト放射の継続時間で分類されている。一部の継続時間の長いガンマ線バーストは大質量星を起源とすることが明らかとなっている。一方、継続時間の短いガンマ線バーストは中性子星合体と関係していると考えられてきたが、キロノバが継続時間の長いガンマ線バーストに付随していたという観測もあり、分類に再考が迫られている(Rastinejad et al. 2022)。

近年話題のマルチメッセンジャー天文学においては、重力波、ニュートリノ、宇宙線といった電磁波以外の観測と電磁波観測を組み合わせ、高エネルギー天体・高密度天体の素性を探る研究が行われている。GW170817/AT2017gfoに対しては、ガンマ線における弱いバーストの検出(Goldstein et al. 2017)、可視光・赤外線によるキロノバの観測(Utsumi et al. 2017; Tominaga et al. 2018)、VLAによる観測による電波残光の観測(Margutti & Chornock 2021)、VLBIを用いた高分解能観測によるジェットの観測(Mooley et al. 2018)が行われるなど、マルチメッセンジャー・多波長観測によって連星中性子星合体GW170817/AT2017gfoの素性が詳らかにされた。重力波と電磁波によって観測された天体は未だGW170817/AT2017gfoしかないが、多数のブラックホール合体からの重力波が検出されており、ブラックホール合体からどのような電磁波放射がありえるのかについても研究が進んでいる(Darc et al. 2025)。また、高エネルギーニュートリノは宇宙線加速の現場で生成されると考えられている。宇宙線は荷電粒子のため磁場によってその軌道を曲げられるが、ニュートリノは加速源から直接我々に届くため、宇宙線の加速源という長年の謎への手がかりが得られると期待されている。IceCubeによって高エネルギーニュートリノが観測され、その対応天体の調査が進められている(Aartsen et al. 2018; Morokuma et al. 2021)。

§2.3.4 今後の世界的動向

■ 物質・元素の起源の解明 **Origin of matter and elements**

元素の起源に関しては希少な元素も含む可能な限り全ての元素の進化を観測的に明らかにする必要がある。そのためには、高分散分光観測において現実的な時間で十分な信号ノイズ比を実現できる明るい金属欠乏星の観測が重要でありその探査観測が求められるとともに、高分散分光観測では大量の光子が必要となることから30m望遠鏡での高分散分光観測が求められる。また、紫外線領域には多数の重元素の吸収線がみられることから紫外線高分散分光観測が重要となる。これまでハッブル宇宙望遠鏡を用いたUV分光観測によって特に中性子捕獲元素の観測が行われてきたが、次世代のUV高分散分光衛星の実現が待たれるところである。

また理論的には、計算機の発展により恒星の進化計算、超新星爆発シミュレーションが進むことが期待される。恒星の進化計算に関しては、近年シェルマージャーという燃焼殻の融合が特に奇数原子核の合成に重要であると指摘されている。恒星の進化計算は3次元現象である対流を伴うものの恒星の寿命という長大な時間を追う必要があることから基本的には対流の効果を近似的に取り入れた二次元計算が行われている。対流を解きつつ恒星の進化を追う計算コードの開発が必要である。超新星爆発シミュレーションに関しては次世代の富岳ネクストでも第一原理に基づいた3次元ニュートリノ輻射流体計算は困難であるが、加速器を用いたシミュレーションコードの開発なども重要となる。第一原理計算に基づいた元素合成、光度曲線、スペクトルの理論予言が、金属欠乏星や超新星爆発の観測と一致するか確認することは重要である。一方で第一原理計算とは対極の様々なモデルパラメータを変えた多数のモデル計算を行い、多数の観測から統計的に物理を引き出す研究も重要な

ると考えられる。理論モデルと観測を比較することにより、中性子星の状態方程式など高エネルギー・高密度天体の物理を明らかにすることができると期待される。

■ 宇宙の進化の解明 **Evolution of matter in the Universe**

銀河系の進化を探る銀河考古学に関しては、これまで高分散分光や多天体分光により金属欠乏星の組成を明らかにすることで宇宙の化学進化が、さらに恒星の6次元運動情報を明らかにすることで銀河系の形成過程や構造が明らかになってきた。2025年より観測を開始したすばる望遠鏡Prime Focus Spectrograph (PFS)による暗い恒星まで含む元素組成、運動情報の観測は銀河系外縁部や銀河系に付随した矮小銀河の構造や化学進化の理解を進めてくれる。海外では4m望遠鏡の4MOST、DESIといった多天体分光器が多数の恒星の元素組成や運動情報を決定するが、8m望遠鏡を用いたすばる望遠鏡PFSは特に暗い恒星に関して重要な役割を果たすと考えられる。また、8m望遠鏡であることを活かした多天体高分散分光モードにも期待がかかる。さらにこれらによって同定された金属欠乏星の詳細を理解するには、大量の光子を集められる30m望遠鏡での分光観測が重要となる。また、Roman、JASMINEなどによる赤外線を用いた位置天文学も重要となる。

さらに遠方突発天体を用いた宇宙進化の解明も重要となる。赤外線広視野衛星Euclid、Romanによる赤外線突発天体探査も行われ、赤方偏移4、7までの突発天体の検出が見込まれる。JWSTによる分光追観測も組み合わせ、宇宙初期の超新星爆発がどのように宇宙進化を駆動したのかを明らかにすることが期待される。また近傍ではRubin/LSSTが可視光で25等程度まで全天の40%程度の領域を探査する時代がやってくる。下記のようにRubin/LSSTによって赤方偏移1程度までの突発天体は網羅されると期待される。Rubin/LSST Euclid、Romanによる突発天体観測と別節で紹介される遠方銀河の観測とも組み合わせ、初期宇宙から現在の宇宙までに突発天体が駆動する宇宙の進化が明らかになると考えられる。

可視光、赤外線以外で観測される突発天体も宇宙進化の解明に重要である。例えば、高速電波バーストで観測される高い分散量度は、放射源から地球までに存在する電子の総量を反映するため、突発天体そのものの理解だけではなく、宇宙における全バリオンの半分以上を占めるとされながら未検出であったミッシングバリオンの存在量の推定や、銀河間物質の電離状態の変遷の解明に寄与することが期待される。また、赤方偏移10を超える遠方でも観測可能なガンマ線バーストを用いた宇宙論も依然として注目を集めている。

■ 高エネルギー天体・高密度天体の素性の解明 **Nature of high-energy and/or high-density objects**

マルチメッセンジャー天文学では、可視光・電波に限らない電磁波観測と電磁波以外の観測の連携が重要となる。今後、重力波観測はLIGO-Virgo-KAGRA (LVK)による第5期観測が2028-2031年頃に予定され、さらにその後には第6期観測、Laser Interferometer Space Antenna (LISA)、Einstein telescope、Cosmic explorerなどの次世代重力波望遠鏡による観測が計画されている。第5期観測では重力波望遠鏡の中性子合体への感度が200Mpc程度になり、8mクラス望遠鏡や宇宙望遠鏡でなければ追観測が行えない時代となる。北天ではすばる望遠鏡HSC、PFS、南天ではRubin/LSSTによる追観測が行われ、連星中性子星合体、中性子星ブラックホール連星合体の多様性が明らかになると期待される。次世代重力波望遠鏡の時代になると電磁波観測では追観測が行えないような遠方からの重力波の検出が期待される。ニュートリノ観測はIceCube、Hyper-Kamiokandeによって高エネルギーニュートリノ、MeVニュートリノの観測が行われ、電磁波観測との協調観測により、粒子加速の現場、

超新星爆発の現場が明らかにされると期待される。また、その他、CTAによるガンマ線観測、XRISM、high-z GUNDAMによるX線観測、TA, Augerによる宇宙線観測なども行われ、可視光・電波観測との協調観測が求められている。またそれらの複数の観測を用いることでアクシオンなどの新粒子を含むダークマターなどの性質を探る試みも行われている。

時間軸天文学においては、2025年からRubin/LSSTによる究極の可視光突発天体観測が行われる。Rubin/LSSTは約10年にわたって18,000平方度の宇宙を数日に一回観測し、一晚に1000万に及ぶアラートが流れる予定である。これまで予想もされてこなかった暗い突発天体、レアな突発天体が観測されることが期待される。Rubin/LSSTは実効口径6.5mの望遠鏡を用いた撮像探査であるため、8mクラスの望遠鏡を用いた分光追観測が重要であり、特に広視野高感度多天体分光器であるすばる望遠鏡PFSとRubin/LSSTとの協調観測は重要となる。また、赤外線広視野衛星Euclid, Romanによる赤外線突発天体探査も行われ、赤方偏移4, 7までの突発天体の検出が見込まれる。JWSTによる分光追観測も組み合わせ、宇宙初期の超新星爆発がどのように宇宙進化を駆動したのかを明らかになることが期待される。Rubin/LSST, Euclid, Romanによる結果と上記の超新星爆発シミュレーションの結果を比較し、初期宇宙から現在までの全突発天体の素性が明らかになると考えられる。また特に近傍の天体については、観測遂行の柔軟性が高い中小口径望遠鏡による臨機応変かつ継続的な追観測も重要となる。この詳細観測と理論研究の協働により特異な天体の素性が明らかになることが期待される。

突発天体の理解のためにも上記のガンマ線、X線、電波観測と可視光、赤外線観測との協調観測は重要となる。ガンマ線、X線に関しては、ガンマ線バーストなどを通して可視光、赤外線観測との協調観測は既に多く行われてきた。一方電波帯における突発天体探査は近年その重要性が理解されてきており、今後大きな進展が期待される。これからSKA, LSTなどによって行われる電波帯における大規模探査観測では突発天体に対応した観測+解析モードが用意される可能性が高い。高速電波バーストはもちろんのこと、LPT、可視光では発見が難しいダストに覆われた超新星、新たな種族の突発天体の発見が期待される。さらに、近傍天体に関しては、東アジアおよびグローバルVLBI等の大規模VLBIによるイメージング・位置測定や、観測遂行の柔軟性が高い小規模VLBIのモニターによる構造変化・運動測定も重要となる。加えて高感度偏波観測により、電波銀河やAGNジェットに付随する3次元的な磁場構造の解明から、ジェットの生成・コリメーション・安定性における磁場の役割や、AGNによる銀河間空間・ICMへの磁場注入・拡散過程の理解が進むと期待される。

§2.3.5 参考文献

- [1] Burbidge, E. M., Burbidge, G. R., Fowler, W. A., and Hoyle, F., RvMP, 29, 547-650 (1957)
- [2] Steigman, G., ARNPS, 57, 463-491 (2007)
- [3] Spite, F. and Spite, M., A&A, 115, 357-366 (1982)
- [4] Pospelov, M. and Pradler, J., ARNPS, 60, 539-568 (2010)
- [5] Richard, O., Michaud, G., and Richer, J., ApJ, 619, 538-548 (2005)
- [6] Nomoto, K., Kobayashi, C., and Tominaga, N., ARA&A, 51, 457-509 (2013)
- [7] Käppeler, F., Gallino, R., Bisterzo, S., and Aoki, W., RvMP, 83, 157-194 (2011)
- [8] Cowan, J. J., Sneden, C., Lawler, J. E., and 5 colleagues, RvMP, 93, 015002 (2021)
- [9] Thielemann, F.-K., Eichler, M., Panov, I. V., and Wehmeyer, B., ARNPS, 67, 253-274 (2017)
- [10] Abbott, B. P., Abbott, R., Abbott, T. D., and 197 colleagues, PhRvL, 119, 161101 (2017)

- [11] Abbott, B. P., Abbott, R., Abbott, T. D., Acernese, F., Ackley, K., and 195 colleagues, *ApJL*, 848, L12 (2017)
- [12] Utsumi, Y., Tanaka, M., Tominaga, N., and 56 colleagues, *PASJ*, 69, 101 (2017)
- [13] Tominaga, N., Tanaka, M., Morokuma, T., and 31 colleagues, *PASJ*, 70, 28 (2018)
- [14] Tanaka, M., Utsumi, Y., Mazzali, P. A., and 42 colleagues, *PASJ*, 69, 102 (2017)
- [15] Holmbeck, E. M. and Andrews, J. J., *ApJ*, 963, 110 (2024)
- [16] Hirai, Y., Beers, T. C., Lee, Y. S., and 11 colleagues, *ApJ*, 990, 125 (2025)
- [17] Arnould, M. and Goriely, S., *PhR*, 384, 1-84 (2003)
- [18] Arnould, M., Goriely, S., and Takahashi, K., *PhR*, 450, 97-213 (2007)
- [19] Hess, V.F., *Phys. Zeits* 13 IO84 (1912)
- [20] Pierre Auger Collaboration, Abraham, J., Abreu, P., and 197 colleagues, *Sci*, 318, 938 (2007)
- [21] Abu-Zayyad, T., Aida, R., Allen, M., and 138 colleagues, *ApJL*, 768, L1 (2013)
- [22] HESS Collaboration, Abramowski, A., Aharonian, F., and 197 colleagues, *Natur*, 531, 476-479 (2016)
- [23] Hirano, S., Hosokawa, T., Yoshida, N., and 4 colleagues, *ApJ*, 781, 60 (2014)
- [24] Susa, H., Hasegawa, K., and Tominaga, N., *ApJ*, 792, 32 (2014)
- [25] Kobayashi, C., Umeda, H., Nomoto, K., Tominaga, N., and Ohkubo, T., *ApJ*, 653, 1145-1171 (2006)
- [26] Chamberlain, J. W. and Aller, L. H., *ApJ*, 114, 52 (1951)
- [27] Beers, T. C., Preston, G. W., and Shectman, S. A., *AJ*, 103, 1987 (1992)
- [28] Christlieb, N., Schörck, T., Frebel, A., and 3 colleagues, *A&A*, 484, 721-732 (2008)
- [29] Da Costa, G. S., Bessell, M. S., Mackey, A. D., and 10 colleagues, *MNRAS*, 489, 5900-5918 (2019)
- [30] Aoki, W., Beers, T. C., Lee, Y. S., and 8 colleagues, *AJ*, 145, 13 (2013)
- [31] Keller, S. C., Bessell, M. S., Frebel, A., and 11 colleagues, *Natur*, 506, 463-466 (2014)
- [32] Tominaga, N., Iwamoto, N., and Nomoto, K., *ApJ*, 785, 98 (2014)
- [33] Gaia Collaboration, Vallenari, A., Brown, A. G. A., and 197 colleagues, *A&A*, 674, A1 (2023)
- [34] Yanny, B., Rockosi, C., Newberg, H. J., and 105 colleagues, *AJ*, 137, 4377-4399 (2009)
- [35] Majewski, S. R., Schiavon, R. P., Frinchaboy, P. M., and 76 colleagues, *AJ*, 154, 94 (2017)
- [36] Cui, X.-Q., Zhao, Y.-H., Chu, Y.-Q., and 74 colleagues, *RAA*, 12, 1197-1242 (2012)
- [37] Buder, S., Kos, J., Wang, X. E., and 36 colleagues, *PASA*, 42, e051 (2025)
- [38] Steinmetz, M., Guiglion, G., McMillan, P. J., and 60 colleagues, *AJ*, 160, 83 (2020)
- [39] Helmi, A., Babusiaux, C., Koppelman, H. H., and 3 colleagues, *Natur*, 563, 85-88 (2018)
- [40] Watanabe, K., Ouchi, M., Nakajima, K., and 14 colleagues, *ApJ*, 962, 50 (2024)
- [41] Finkelstein, S. L., Bagley, M. B., Ferguson, H. C., and 64 colleagues, *ApJL*, 946, L13 (2023)
- [42] Gal-Yam, A., *Sci*, 337, 927 (2012)
- [43] Perley, D. A., Mazzali, P. A., Yan, L., and 62 colleagues, *MNRAS*, 484, 1031-1049 (2019)
- [44] Yasuda, N., Tanaka, M., Tominaga, N., and 18 colleagues, *PASJ*, 71, 74 (2019)
- [45] Moriya, T. J., Blinnikov, S. I., Tominaga, N., and 4 colleagues, *MNRAS*, 428, 1020-1035 (2013)
- [46] Anderson, J. P., James, P. A., Habergham, S. M., Galbany, L., and Kuncarayakti, H., *PASA*, 32, e019 (2015)
- [47] Iwata, Y., Akimoto, M., Matsuoka, T., and 10 colleagues, *ApJ*, 978, 138 (2025)
- [48] Sumiyoshi, K., Yamada, S., Suzuki, H., and 3 colleagues, *ApJ*, 629, 922-932 (2005)
- [49] Takiwaki, T., Kotake, K., and Suwa, Y., *MNRAS*, 461, L112-L116 (2016)
- [50] Nagakura, H., Sumiyoshi, K., and Yamada, S., *ApJ*, 878, 160 (2019)
- [51] Takiwaki, T., Kotake, K., and Foglizzo, T., *MNRAS*, 508, 966-985 (2021)

- [52] Takiwaki, T. and Kotake, K., *ApJ*, 743, 30 (2011)
- [53] Burrows, A., Wang, T., and Vartanyan, D., *ApJL*, 964, L16 (2024)
- [54] Moriya, T. J. and Singh, A., *PASJ*, 76, 1050-1058 (2024)
- [55] Sato, T., Matsunaga, K., Uchida, H., and 10 colleagues, *ApJ*, 990, 103 (2025)
- [56] Wongwathanarat, A., Janka, H.-T., Müller, E., Pllumbi, E., and Wanajo, S., *ApJ*, 842, 13 (2017)
- [57] Katsuda, S., Morii, M., Janka, H.-T., and 9 colleagues, *ApJ*, 856, 18 (2018)
- [58] Werner, N., Durret, F., Ohashi, T., Schindler, S., and Wiersma, R. P. C., *SSRv*, 134, 337-362 (2008)
- [59] Heger, A. and Woosley, S. E., *ApJ*, 724, 341-373 (2010)
- [60] Sukhbold, T., Woosley, S. E., and Heger, A., *ApJ*, 860, 93 (2018)
- [61] Wheeler, J. C., Yi, I., Höflich, P., and Wang, L., *ApJ*, 537, 810-823 (2000)
- [62] Özel, F., Psaltis, D., Narayan, R., and McClintock, J. E., *ApJ*, 725, 1918-1927 (2010)
- [63] Maoz, D., Mannucci, F., and Nelemans, G., *ARA&A*, 52, 107-170 (2014)
- [64] Belczynski, K., Heger, A., Gladysz, W., and 9 colleagues, *A&A*, 594, A97 (2016)
- [65] Petroff, E., Hessels, J. W. T., and Lorimer, D. R., *A&ARv*, 27, 4 (2019)
- [66] Bochenek, C. D., Ravi, V., Belov, K. V., and 4 colleagues, *Natur*, 587, 59-62 (2020)
- [67] Kumar, P. and Zhang, B., *PhR*, 561, 1-109 (2015)
- [68] Rastinejad, J. C., Gompertz, B. P., Levan, A. J., and 32 colleagues, *Natur*, 612, 223-227 (2022)
- [69] Darc, P., Bom, C. R., Kilpatrick, C. D., and 9 colleagues, *PhRvD*, 112, 063019 (2025)
- [70] IceCube Collaboration, Aartsen, M. G., Ackermann, M., and 197 colleagues, *Sci*, 361, eaat1378 (2018)
- [71] Morokuma, T., Utsumi, Y., Ohta, K., and 35 colleagues, *PASJ*, 73, 25-43 (2021)
- [72] Ikebe, S., Takefuji, K., Terasawa, T., and 14 colleagues, *PASJ*, 75, 199-207 (2023)
- [73] Mooley, K. P., Deller, A. T., Gottlieb, O., and 7 colleagues, *Nature*, 561, 355-359 (2018)
- [74] Gordon, A.C., Fong, W.-fai., Kilpatrick, C.D., and 26 colleagues, *ApJ*, 954, 80 (2023)
- [75] Bietenholz, M.F., Bartel, N., Argo, M., and 3 colleagues, *ApJ*, 908, 75 (2021)
- [76] Zhang, F., Shu, X., Sun, L., and 5 colleagues, *ApJ*, 938, 43 (2022)
- [77] Mooley, K.P., Hallinan, G., Bourke, S., and 10 colleagues, *ApJ*, 818, 105 (2016)
- [78] Murphy, T., Kaplan, D.L., Stewart, A.J., and 52 colleagues, *PASA*, 38, e054 (2021)
- [79] Fender, R., Woudt, P.A., Corbel, S., and 59 colleagues, *mks.conf*, 13 (2016)
- [80] Goldstein, A., Veres, P., Burns, E., and 27 colleagues, *ApJL*, 848, L14 (2017)
- [81] Margutti, R. and Chornock, R., *ARA&A*, 59, 155-202 (2021)
- [82] Utsumi, Y., Tanaka, M., Tominaga, N., and 56 colleagues, *PASJ*, 69, 101 (2017)
- [83] Tominaga, N., Tanaka, M., Morokuma, T., and 31 colleagues, *PASJ*, 70, 28 (2018)
- [84] Rea, N., Hurley-Walker, N., and Caleb, M., *arXiv*, arXiv:2601.10393 (2026)

§2.4 太陽

太陽はその近さゆえに、その表面およびその周囲に広がる太陽大気を詳細に観測できる唯一の恒星である。太陽で発生する様々な活動現象は、磁気リコネクションをはじめとするプラズマの基本過程によって発現しており、太陽はプラズマ現象の実験室とも言える。近年の観測技術の発展、特に宇宙からの太陽観測により、高品質のデータが大量に得られるようになった。これにより、観測と理論や数値シミュレーションを連携させた緻密な研究が進められている。しかしながら、長年の太陽物理学の謎であり、恒星物理としても解明が求められる、彩層・コロナ加熱、太陽風加速、太陽活動周期の解明には至っていない。さらに、太陽コロナから絶えず流れ出す太陽風に加え、突発的に発生する太陽フレア、コロナからのプラズマ噴出は惑星間空間の環境を大きく変動させ、地球の磁気圏や電離層にも影響を及ぼす。人類が宇宙へと進出し始めた昨今、これらの現象の理解は科学的のみならず社会的にも要請され、「宇宙天気予報」という新しい研究領域へと発展している。このような科学的・社会的意義の高まりを背景に、世界各国で様々な新しい観測計画が検討、立案されている。

§2.4.1 当該分野の目的

太陽物理学は、太陽を恒星の一つとして天文学的に理解し、太陽を舞台として起こる多様な天体物理・プラズマ物理現象のメカニズムを解明することを目的としている。太陽物理学は、さらに宇宙天気予報や恒星大気の実験室となる。

§2.4.2 当該分野の目標

■ 外層大気加熱・恒星風加速機構の解明

光球底での熱対流乱流による擾乱発生から、彩層・コロナや恒星風へのエネルギー注入に至る一連の過程を包括的・定量的に理解する。

■ プラズマ爆発現象の機構解明とその予測

フレアやコロナ質量放出などの磁気プラズマ爆発現象の背景にある電磁流体力学不安定性を特定し、磁気リコネクションの物理過程を探る。さらに、それらの知見を宇宙天気予報に応用する。

■ 磁場の起源の解明

太陽磁場とそれによる太陽活動の周期的変動を観測的・理論的に明らかにするとともに、ダイナモ素過程を支える磁束の拡散と移流やねじれ運動などをもたらす太陽型星の内部乱流を理解する。

§2.4.3 現在までの到達点

■ 外層大気加熱・恒星風加速機構の解明

太陽の表面(光球)温度はおよそ6千度であるのに対し、その上空には恒常的に1万度の彩層、100万度超のコロナ、さらには太陽風領域が広がる。このような高温の大気をどのようにして形成しているかは太陽物理学における重要な未解決課題としてこれまで長年研究されてきた。加熱過程として波動加熱説やマイクロ・ナノフレア加熱説などいくつかモデルは提唱されているものの、未だ決定的な観測的証拠は得られていない。「ひので」衛星やNASAのInterface Region Imaging Spectrograph (IRIS) 衛星は、エネルギー輸送を担うと考えられるAlfvén波の同定などを行い、彩層中を伝搬する

Alfvén波が持つエネルギーがコロナを加熱・維持するのに十分であることを示した (Okamoto et al. 2007; De Pontieu et al. 2007, 2014)。しかし、コロナ中でも同様に、Alfvén波の観測が行われたが、それが持つエネルギーはコロナを加熱するのに十分とは言えず、またコロナ中での散逸過程も観測的には明らかになっていない (Tomczyk et al. 2007)。一方、マイクロ・ナノフレア加熱説の観測的実証の観点から、「ようこう」衛星などの観測により、コロナのエネルギー頻度分布が求められ、コロナ加熱をナノフレア加熱説で説明するには、既存の観測装置では見えない空間・エネルギー領域において、既知のべき乗分布とは異なる急峻な傾きをもつナノフレア分布の存在が必要であることが示唆された (Shimizu et al. 1995)。高解像度でのコロナ観測が鍵を握ることは明らかで、NASAのHi-Cロケット実験において、ナノフレアと関連する可能性のある磁気ループの捩れを示唆する高解像度画像が得られた (Cirtain et al. 2013)。また、Solar Orbiter (ESA/NASA) による極端紫外線観測により、コロナ温度をもつ微小なジェット現象が頻発していることがわかり (Chitta et al. 2023)、さらにParker Solar Probe (NASA) による内部太陽圏のその場観測から、太陽風加速にジェット現象が深く関わっている可能性が示唆されている (Raouafi et al. 2023; Froment et al. 2021)。彩層・コロナ加熱機構や恒星風加速機構の包括的理解には、これらの現象の発生・伝搬・散逸の全過程を統合的に捉える定量的な研究が必要であり、そのためには、高空間・高時間分解能による統計的な不可欠である。

■ プラズマ爆発現象の機構解明とその予測

太陽フレアは、約1時間で 10^{32} erg ものエネルギーを解放し、電波からX線・ γ 線まであらゆる波長で増光を生み出す、太陽系における最大のプラズマ爆発現象である。「ようこう」衛星のフレア観測により、磁気リコネクションによる太陽大気での磁気エネルギー解放モデルが確立された (Tsuneta et al. 1992; Masuda et al. 1994)。さらに、磁気リコネクションは、光球 (6千度)、その上空に位置する彩層 (1万度)、遷移層 (10万度)、そしてコロナ (数100万度) といった、密度・温度・電離度が大きく異なる様々なプラズマ環境において広範に発生していることが明らかになった (Roupe van der Voort et al. 2016; Shibata et al. 2007)。高エネルギー粒子は、電波、X線、 γ 線で非熱的放射として観測され (Benz 2017)、太陽フレアやコロナプラズマ放出現象 (Coronal Mass Ejection: CME) の爆発現象で発生するSEP (Solar Energetic Particles) は惑星間空間を伝搬し地球近傍で捉えられる (Salas-Matamoros et al. 2015)。このように観測装置の発展に伴い新たな観測事実が明らかとなり、磁気プラズマ爆発を突発的に引き起こす電磁流体力学 (Magneto-Hydro Dynamics: MHD) 不安定性の特定や、磁気リコネクションの詳細な物理過程の解明に向けた研究が進展しつつある (Takasao et al. 2012)。しかしながら、現在の観測装置のプラズマ診断能力は、空間・時間・エネルギー分解能のいずれにおいても十分とは言えず、また、基本となる磁場情報も不足している。また、太陽フレアや CME、SEP、そして太陽風は地球周辺の宇宙環境や我々の社会活動に多様な影響を与えることから、これらの知見を爆発の予測に応用する試みも行われている (Kusano et al. 2012)。したがって、継続的な精密観測および数値シミュレーション、さらに機械学習を取り入れた太陽活動予測 (Nishizuka et al. 2016; Jiao et al. 2020) の実用化を目指した高度化が急務となっている。一方、過去の観測記録を分析すると、通常のフレアに比べて数桁以上大きな爆発 (スーパーフレア) の発生が確認されている (Miyake et al. 2012)。このような極端現象は頻度が低いものの、一度発生すると地球環境により深刻な影響を与える可能性があり、その理解が必要となっている。

■ 磁場の起源の解明

太陽の黒点数は約11年の周期で変動していることが知られている。また、黒点出現緯度の移動や黒点对の極性ルール (ヘール-ニコルソンの法則) など、周期的活動に応じた様々な統計的性質が確認されている。さらに、不規則ではあるが、数百年くらいの間隔で太陽活動の異常な停滞現象も知ら

れている。このような太陽周期活動を駆動・維持するメカニズムはいまだに完全には解明されておらず、磁場の起源に関するいわゆる「ダイナモ問題」として、太陽物理学における重要課題の一つとなっている。この問題を解決するためには、太陽黒点数や磁場、彩層輝度など、太陽活動度の指標となる物理量を、長期にわたって継続的に観測し、周期活動に伴う変動の性質を詳細に把握することが不可欠である。そのうえで、日震学的手法を用いて、ダイナモ過程を担う太陽内部の乱流構造を探查する必要がある。これまでに、米国National Solar Observatory (NSO) によるGlobal Oscillation Network Group (GONG)、NASA/ESAのSOHO衛星に搭載されたMichelson Doppler Imager (MDI)、およびNASAのSDO衛星に搭載されたHelioseismic and Magnetic Imager (HMI) による観測データを用いることで、対流層全体にわたる差動回転角速度の分布が高い精度で求められてきた (Schou et al. 1998)。一方で、赤道付近から両極域にむかって流れる子午面還流の太陽内部における構造については、いまだ整合的な観測結果は得られていない (Zhao et al. 2013; Gizon et al. 2020)。さらに、近年大きく発展した大規模数値シミュレーションの結果と、日震学的観測による結果の間にも矛盾が生じており (Hanasoge et al. 2012)、その解消が求められている。

恒星の自転と彩層・遷移層・コロナといった外層大気の輝線強度の間には、密接な相関があることが知られている。これら輝線のエネルギー源は、4.1、4.2で課題となった機構による恒星の磁気活動によるものであり、恒星の周期活動をはじめとする活動現象の理解のための観測が行われてきた (Radick 2000)。慣性力とコリオリ力の比であるロスビー数は、彩層輝線指標であるカルシウムH, K線と強い相関を示す (Noyes et al. 1984)。X線での観測も精力的に行われ、ロスビー数と強い相関を持つ一方で、ある値より小さなロスビー数を持つ天体のX線強度は飽和していることも明らかとなった (Wright et al. 2018)。これらの現象を統一的に説明する理論は確立されておらず、その構築には、大気構造はもとより詳細な内部構造まで明らかにでき、理論やシミュレーションとの比較が可能な太陽が重要な役割を果たす。

§2.4.4 今後の世界的動向

■ 外層大気加熱・恒星風加速機構の解明

太陽表面からコロナに至る各領域は、磁場によって結合されている。密度の高い光球が持つ乱流の運動エネルギーの一部が、上空の希薄な彩層・コロナに磁場を介して輸送され、散逸することで、ダイナミックな加熱現象や恒星風の加速を引き起こしていることは間違いない。従って、この現象を定量的に解明するには、エネルギー供給源である光球の乱流に加え、①光球(太陽表面)から彩層にかけての磁場とその運動の様子と、②上空へと物質・エネルギーがどのように輸送され、散逸しているかを観測する必要がある。

①彩層は、ガス圧が優勢な光球から磁気圧が優勢なコロナへ切り替わる領域である。彩層からコロナにかけて発生する多様な活動現象を理解するには、光球だけでなく、彩層における磁場の測定が重要となる。しかしこれまで、「ひので」衛星や地上の観測装置を用いた磁場測定の対象は主に光球であり、技術的な困難さから彩層の磁場測定はほとんど手付かずの状態であった。宇宙からの彩層磁場観測の試みとして、日本の研究チームが主導し、国際的に高く評価されている観測ロケット実験CLASPシリーズ (Kano et al. 2017; Ishikawa et al. 2021) やSUNRISE-III気球実験 (Lagg et al. 2025; Katsukawa et al. 2025) が挙げられる。また、NSOの大型地上太陽望遠鏡 Daniel K. Inouye Solar Telescope (DKIST) をはじめとする地上望遠鏡による彩層磁場観測も本格化しつつある (da Silva Santos et al. 2023; Shad et al. 2024)。

②上空へのエネルギー輸送と散逸過程の観測には、高分解能による長期連続的なコロナ観測が必要となる。具体的には、磁気リコネクションやMHD波動といった根源的な物理過程を捉えることが求められる。これを可能にするのが、日本を中心に開発が進められているSOLAR-Cミッション、そしてそれと同時期に打ち上げが予定されているNASAの中型太陽観測衛星Multi-slit Solar Explorer (MUSE)である。SOLAR-Cは、高解像度・高時間分解能で紫外線の広波長範囲にある多数のスペクトル線に対する分光観測を行う。一方、MUSEはそれを補完する形で、広視野かつ高空間分解能でのコロナ観測を実施する。さらに、地球とは異なる角度から太陽に接近して撮像観測などを行う探査機Solar Orbiter (ESA/NASA)や太陽風やコロナのその場観測を行うParker Solar Probe (NASA)などの観測装置を組み合わせ合わせた協調観測により、顕著な科学成果がもたらされることが期待される。

■ プラズマ爆発現象の発生機構の解明とその予測

5.1と同様、①太陽表面～彩層の磁場観測と、②彩層～コロナでのプラズマ診断が鍵を握る。①では、DKISTをはじめとする光球・彩層磁場観測によって、エネルギーの蓄積やフレアを駆動する局所的な磁場構造を捉え、磁場の不安定化要因を明らかにする研究が進められている。②では、彩層・遷移層・コロナにおいて、磁気リコネクション領域を高空間・高時間分解能で観測することにより、電流シート近辺に現れると期待される衝撃波や磁気島構造を捉え、エネルギー解放の機構の理解に迫ることができる。これを実現するのが、5.1でも述べたSOLAR-CやMUSEである。

突破的に発生する太陽フレアやコロナ質量放出の発生を監視し、さらには稀有な極端現象を逃さずとらえるには、エネルギー蓄積の変遷とフレアが発生する瞬間を捉える必要があり、継続的な太陽観測が必要不可欠である。そのため、世界中の様々な地点から太陽をパトロール的に観測する体制の構築が重要である。さらに、2024年に公開された「Decadal Survey for Solar and Space Physics (Heliophysics) 2024-2033」では、宇宙天気観測のための最重要観測装置として、地上6箇所に太陽望遠鏡を設置し、24時間体制で光球および彩層磁場の進化や太陽フレアの観測を行うngGONGの実現が推奨されている。また、人工衛星による継続的な磁場観測の取り組みとしては、米国の研究チームを中心に、CLASP2と同様の紫外線(280 nm)による偏光分光観測を行うChromospheric Magnetism Explorer (CMEx) がNASAのSMEXミッションとして提案されている。さらに、太陽-地球空間の広域を観測可能なラグランジュ点への宇宙機設置も進められており、ESA主導のVigil (L5, 2031年打ち上げ予定) の開発が進行中であるほか、韓国主導のL4ミッションも始動した。国内においても、5.1および5.2に向けて、CLASPやSUNRISE-IIIを発展させた飛翔体実験の議論が継続的に行われている。

太陽フレアをはじめとする磁気リコネクションに伴う粒子の加速は、宇宙プラズマにおける普遍的な現象であると同時に、太陽で起きる加速現象は、地球周辺宇宙環境に影響を及ぼすという点でも重要な研究課題である。粒子加速メカニズムの解明には、加速された粒子の検出はもちろんのこと、加速源候補となる現象の理解が不可欠である。加速された粒子による非熱的放射は、硬X線やマイクロ波で観測されるが、他波長での観測に比べて空間分解能およびダイナミックレンジが著しく低いのが課題であった。しかし、結像型硬X線望遠鏡の技術を実証したFOXSIロケット実験シリーズが成功を収め (Krucker et al. 2014)、さらに太陽専用の電波干渉計Expanded Owens Valley Solar Array (EOVSA)を発展させたFrequency Agile Solar Radiotelescope (FASR) 計画が「Decadal Survey for Solar and Space Physics (Heliophysics) 2024-2033」の最優先中規模プロジェクトに選出されるなど、今後の進展が期待される。加速源候補となる現象の理解については、紫外線から軟X線帯域での分光観測が有効であり、紫外線帯域ではMUSE衛星とSOLAR-C衛星が計画されており、軟X線帯域ではFOXSIロケット実験シリーズによって集光撮像分光観測の技術実証が行われている。

■ 磁場の起源の解明

ダイナモ問題の解決には、日震学による太陽内部深部(対流層底部)の熱対流、特に極域付近の子午面環流の探査が求められている。深部にアクセスするためには、太陽面上の十分離れた2点を同時に観測する必要があり、特に極域付近の探査には、黄道面を脱出して極域から太陽を観測することが不可欠と考えられている。極域観測を最初に実施する予定のミッションはSolar Orbiterであるが、その極域観測ウィンドウは各10日間程度と短く、十分な精度での内部探査を実現するのは困難であると考えられている。国内では、多点観測によるミッションの実現に向けて、科学的・工学的観点から検討を進めている。諸外国においても同様の目的意識に基づく黄道面離脱・極域観測ミッションが複数検討されており、特に注目すべきは、「Decadal Survey for Solar and Space Physics (Heliophysics) 2024-2033」において、NASAのLiving With a Star Programとして推薦されたSolar Polar Orbiter (SPO)である。ダイナモ問題の研究は、太陽活動の異常な停滞や次期太陽周期活動の予測の発展に貢献するものである。長期間にわたる太陽シノプティック観測で得られる黒点数とその時空間変動、さらには彩層活動に関するデータの蓄積は、ダイナモ機構の理解および太陽周期活動予測研究における基盤となることは言うまでもない。

加えて、太陽だけでなく恒星活動の長期変動を体系的に観測することも重要である。恒星の磁場活動周期は太陽と同様にダイナモ機構に起因すると考えられており、質量・自転・年齢・内部構造が異なる恒星に対する長期観測データは、太陽ダイナモ理論の検証に有効であるだけでなく、恒星ダイナモ機構理解へとつながる。

■ 新たな展開

大量の恒星・系外惑星データを提供したKepler衛星やTransiting Exoplanet Survey Satellite (TESS)衛星等の測光観測ミッションにより、恒星・系外惑星研究は新たな段階に入った。恒星観測は、X線、紫外線、可視、など多波長での測光・分光観測が進展している。日本では2018年に京都大学岡山天文台せいめい望遠鏡が可視光分光観測を、2023年にはXRISM衛星がX線分光観測を開始し、多様な恒星活動、特にフレアのメカニズムとそれに付随する放射機構の解明が期待される。

系外惑星研究においては、発見から詳細な環境理解へと研究の重点が移りつつある。NASAのJames Webb Space Telescope (JWST)や2029年打ち上げ予定のESAによるARIEL、日本が構想を進めるLAPYUTAミッションやThirty Meter Telescope (TMT)などは、いずれも惑星大気の組成や構造の解明に焦点を当てている。同様に太陽系惑星探査においても、NASAをはじめとする各国が火星、水星、木星などに探査機を送り込み、惑星環境の詳細理解と太陽系形成史の解明を目標としている。太陽系惑星の大気環境の進化を理解するためには、太陽風や太陽からの突発的なCME、さらには太陽輻射の短期・長期的変動などの影響を定量化する必要がある (Solanki et al. 2013; Kopp & Shapiro 2021)。系外惑星においても同様に、主星の活動が惑星大気の進化や居住可能性に決定的な役割を果たすため、恒星活動の理解は中核的課題の一つとなっている。

さらに、隕石分析や小惑星のサンプルリターンミッション(はやぶさ、はやぶさ2、OSIRIS-RExなど)による試料が得られるようになり、太陽系起源解明の研究は新たな段階に入っている。太陽活動との相互作用が重要な鍵を握っており、太陽・恒星活動研究との連携がますます重要となっている。

このような背景において、恒星観測と太陽観測の比較研究はますます重要性を増している。「Decadal Survey for Solar and Space Physics (Heliophysics) 2024-2033」において、「New Environments: Exploring our Cosmic Neighborhood and Beyond」が新たな科学テーマの1つとして掲げられており、世界的な研究潮流となっている。

§2.4.5 参考文献

- [1] Okamoto, T. J. et al. (2007), *Science*, 318, 1577
- [2] De Pontieu et al. (2007), *Science*, 318, 1574
- [3] De Pontieu et al. (2014), *Science*, 346, 1255732
- [4] Tomczyk et al. (2007), *Science*, 317, 1192
- [5] Shimizu et al. (1995), *PASJ*, 47, 251
- [6] Cirtain et al. (2013), *Nature*, 493, 501
- [7] Chitta et al. (2023), *Science*, 381, 867
- [8] Raouafi et al. (2023), *ApJ*, 945, 28
- [9] Froment, C. et al. (2021), *A&A*, 650, A5
- [10] Tsuneta, S. et al. (1992), *PASJ*, 44, 63
- [11] Masuda, S. et al. (1994), *Nature*, 371, 495
- [12] Rouppe van der Voort, L. et al. (2016), *A&A*, 592, A100
- [13] Shibata et al. (2007), *Science*, 318, 1591
- [14] Benz (2017), *Living Reviews in Solar Physics*, 14, 2
- [15] Salas-Matamoros et al. (2015), *A&A*, 590, A135
- [16] Takasao et al. (2012), *ApJ*, 745, L6
- [17] Kusano et al. (2012), *Science*, 369, 587
- [18] Nishizuka et al. (2016), *ApJ*, 835, 156
- [19] Jiao, Z. et al. (2020), *SpWea*, 17, e02440
- [20] Miyake et al. (2012), *Nature*, 486, 240
- [21] Schou et al. (1998), *ApJ*, 505, 390
- [22] Zhao et al. (2013), *ApJL*, 774, L29
- [23] Gizon et al. (2020), *Science*, 368, 1469
- [24] Hanasoge et al. (2012), *PNAS*, 109, 11928
- [25] Radick (2000), *Adv. Space. Res.*, 26, 1739
- [26] Noyes et al. (1984), *ApJ*, 279, 763
- [27] Wright et al. (2018), *MNRAS*, 479, 2351
- [28] Kano et al. (2017), *ApJL*, 839, L10
- [29] Ishikawa et al. (2021), *Science Advances*, 7, eabe8406
- [30] Lagg et al. (2025), *Solar Physics*, in press
- [31] Katsukawa et al. (2025), *Solar Physics*, in press
- [32] da Silva Santos et al. (2023), *ApJL*, 954, L35
- [33] Shad et al. (2024), *Science Advances*, 10, adq1604
- [34] Säm Krucker et al (2014) *ApJL* 793 L32
- [35] Hotta & Kusano (2021), *Nature Astronomy*, 5, 1100
- [36] Solanki, S. K., Krivova, N. A., and Haigh, J. D. (2013), *ARA&A*, 51, 311
- [37] Kopp, G. and Shapiro, A. (2021), *SoPh*, 296, 60

§2.5 星惑星系形成

星・惑星系がどのように形成され、物理的・化学的に進化して、最終的に我々のような生命が誕生したのか、という問題は、人類の究極の問いの1つである。近年の地上大型光赤外線望遠鏡やアルマ望遠鏡、 JWSTによる高空間分解能観測により、原始星円盤、原始惑星系円盤、残骸円盤といった、惑星系スケールの天体の詳細観測が可能になった。これらの観測により、原始星・円盤の共進化、円盤内での惑星形成の兆候や、惑星形成の第一歩であるダスト微物理過程、惑星系への物質進化が明らかになってきた。一方で、銀河系中心や外縁、マゼラン雲も含めた近傍銀河の星形成領域の観測も可能になり、多様な環境下での物理的・化学的進化も明らかになりつつある。将来的には、アルマ2, ELT (E-ELT, GMT, TMT), ngVLAなども用いることで、円盤内縁の惑星形成領域や、円盤内の若い惑星とその周辺構造の観測、現在存在する惑星系が誕生した時代に相当する様々な環境下(金属量や星形成率など)の星形成領域の詳細観測も可能になる。これらの観測により、多様な星惑星系の形成過程と太陽系の普遍性と特殊性、生命の材料につながるような分子の進化、系外惑星大気につながるような物質進化が明らかになると期待される。

§2.5.1 当該分野の目的

銀河系形成時から現在に至る多様な環境の中で、星惑星系がどのように形成され、多様な星や惑星系へと進化したのか、そこでどのように物質が進化し、生命起源物質が生成されたのかを探る。

§2.5.2 当該分野の目標

■ 星・惑星系の形成過程の解明

星や惑星は、分子雲内の高密度領域において形成される。銀河における、乱流や磁場、金属量、宇宙線・紫外線量などの環境は、銀河の進化と共に変化し、星・惑星系の多様性につながると考えられる。様々な環境下において星と惑星系がどのように形成され、どのような多様性につながりうるのかを明らかにする。

■ 惑星系に至る物質進化の解明

希薄な原子雲から高密度の分子雲、分子雲コア、原始惑星系円盤、星・惑星系へと進化するにつれ、より複雑な物質、そして最終的には生命が生成される。この物質進化もまた、様々な環境の影響を受ける。星・惑星系の形成過程において物質がどのように進化し、どのような多様性を持ちうるのかを明らかにする。

§2.5.3 現在までの到達点

■ 星・惑星系の形成過程の解明

・原始星円盤・原始惑星系円盤・残骸円盤のガス・ダスト分布と惑星形成: 地上大型光赤外線望遠鏡(すばる, VLT, Keck等)やアルマ望遠鏡を用いた高空間分解能・高感度観測により、原始惑星系円盤ダストおよびガスのリング・ギャップ・スパイラルなどの詳細構造の検出が可能となった(Fukagawa et al. 2004; Andrews et al. 2016; Oberg et al. 2023)。惑星形成の兆候を示す構造として、理論と数値流体シミュレーションにより予言されていた構造が、比較的年老いた(>100万年)、ギャップを空間分解でき

るくらい大型の円盤ほぼ全てで検出された(Andrews et al. 2018)。さらに、若い原始星円盤には構造が見えず、Class Iの終盤にリング・ギャップ構造が見え始めることも明らかになった(Ohashi et al. 2023)。また、ケプラー回転からの速度場のずれからも、惑星形成の兆候が探査されている(Pinte et al. 2025)。一方で、円盤の H_2 ガス分布の測定は長年の課題であったが、最近では、分子輝線の圧力広がりや自己重力円盤の回転曲線、 C^{18}O と N_2H^+ 輝線などを用いて、 H_2 ガス分布の測定も可能になりつつある(Yoshida et al. 2022; Lodato et al. 2022; Trapman et al. 2025)。統計的観測により、円盤ダスト質量やガス質量が、星形成領域の年齢ごとに異なることも明らかになった(Zhang et al. 2025)。また、統計的観測から見積もられるダスト質量は、現在観測されている系外惑星を説明するには十分ではないことが知られている(Manara et al. 2018; Mulders et al. 2021)。円盤内縁(<10 au)の分布はまだ観測が限られているが、今後の進展が期待される。

残骸円盤においても、地上大型光赤外線望遠鏡やHST、アルマ望遠鏡によるダストの詳細構造の観測は、円盤中の惑星の存在を示唆した。また、アルマ望遠鏡による残骸円盤中のガス分布の観測は、惑星形成に影響を及ぼす円盤ガス散逸時間の問題に一石を投じた(Dent et al. 2014; Higuchi et al. 2019; Cataldi et al. 2023)。

円盤内ダストの微物理過程に関する観測も、地上大型光赤外線望遠鏡やアルマ望遠鏡、JWSTで大きく進展した。ダストの半径方向のドリフトを示唆する、ダストとガスの半径方向の分布の違いや、ダストの赤道面への沈殿、また、ダスト連続波の他波長観測や自己散乱由来の偏光観測によるダストサイズ分布への制限、ダスト空隙率への制限など、長年にわたり理論的に研究されてきた円盤内ダスト微物理過程が、ようやく観測的に検証可能となった(Andrews 2020; Tazaki et al. 2025; Tsukagoshi et al. 2016; Kataoka et al. 2016)。

一方で、原始惑星系円盤や残骸円盤内の赤外線・電波点源の観測も進展した。特にPDS70まわりの原始惑星系円盤には中心部に大きなキャビティが存在し、そのキャビティ内に、赤外線・電波の連続波、 $\text{H}\alpha$ 輝線など、複数の観測で、若い惑星と周惑星円盤の兆候が観測されている(Keppler et al. 2018; Benisty et al. 2021)。JWSTでも、若い円盤内の赤外線点源探査や周惑星円盤の特徴の観測が進展している(Hoch et al. 2025)。

円盤内ダストの詳細構造の観測以来、構造形成の理論的研究も急速に進展した。円盤内の惑星形成により構造形成を説明するモデルや系外惑星の軌道・質量分布との比較とともに、スノーラインなど、惑星以外の原因により構造を説明するモデルも提案された(Dong et al. 2015; Kanagawa et al. 2015; Zhang et al. 2018; Zhang et al. 2016; Okuzumi et al. 2016)。また、光蒸発や非MHD磁気円盤風などによる円盤ガス散逸過程に関する様々な理論的研究も進展している(Gorti et al. 2009; Nakatani et al. 2018; Bai & Stone 2013; Suzuki & Inutsuka 2009; Kunitomo et al. 2020)。ダスト成長に関わる微物理過程を考慮したダスト進化の理論的研究も大きく進展し、ガスとダストの相互作用やシミュレーション結果の観測予測も含め、微惑星形成に迫る様々なシナリオが提案された(Okuzumi et al. 2012; Johansen et al. 2014; Simon et al. 2016)。さらに、原始惑星系円盤内の周惑星円盤形成・進化に関する理論的研究にも進展が見られた(Szulagyi et al. 2014; Shibaïke et al. 2019)。

・原始星天体と星形成: アルマ望遠鏡やJWSTなどによる原始星天体の高空間分解能観測は、数値流体シミュレーションと比較可能なスケールの詳細構造の観測を可能にし、その物理・化学構造に大きな制約を与えることに成功した。太陽系近傍の星形成領域だけではなく、銀河中心や銀河系外縁、マゼラン雲も含めた近傍銀河における星形成領域の観測も進んでいる。原始星に付随するアウト

フローの高空間分解能観測では、その駆動機構として、磁気遠心力風を支持する結果が得られている(Alves et al. 2017; Hirota et al. 2017; Oya et al. 2018)。星形成活動に伴う粒子加速と宇宙線電離率の増加の兆候も報告され、その星惑星形成への影響が議論されている(Cabedo et al. 2023)。メタノールレーザーを用いた高空間分解能観測により、FU Ori型の周期的なバースト現象が、小質量星だけでなく、大質量星形成時にも生じることも示された(Burns et al. 2020, 2023)。また、重力不安定性や乱流に駆動される連星形成の様子も明らかになった(Tobin et al. 2016; Lee et al. 2017)。星形成直後に近い若い原始星の近傍には数1000 auスケールに渡る複雑なアーク構造が頻繁に見られており(Tokuda et al. 2014)、その起源として磁場とガスの相互作用(Tokuda et al. 2024; Tonious et al. 2024)や間欠的な非球対称のガス流入(Pineda et al. 2020; Hühn and Dullemond 2025)によるものなど複数の要因が提案されており、星形成および円盤形成に関わる物理現象の履歴およびその多様性を理解する上で重要な情報を与えている。

一方で、星形成の母体となる分子雲コアよりも数桁大きい、数100pcスケールにわたる分子雲の観測は、野辺山45m望遠鏡をはじめとする単一電波望遠鏡が活躍してきた(Umemoto et al. 2017; Schuller et al. 2021; Park et al. 2023)。特に大質量星形成領域では、分子雲同士の相互作用の痕跡と解釈される特徴が多数見つかっている(Fukui et al. 2021; Beltran et al. 2022; Hunter et al. 2023)。また、ハーシェル宇宙天文台の高空間分解能遠赤外線観測により、分子雲のフィラメント構造が普遍的に存在することがわかり(Andre et al. 2014; Kumar et al. 2020)、さらに、アルマ望遠鏡観測で大質量原始星周辺に複数のフィラメント構造が交差したハブ・フィラメントシステムが見つかり(Tokuda et al. 2019)、数値シミュレーションとの比較から分子雲衝突による磁気流体衝撃波を介して形成することも明らかになってきた(Inoue et al. 2018)。このような力学的に活発な環境で形成される分子雲コアはその周囲からの持続的な質量流入を経験していると見られる(Padoan et al. 2020; Morii et al. 2023; Olguin et al. 2025)。このように、古典的な球対称孤立系ガス雲の重力収縮だけでは説明できない現象や構造が階層的に明らかになりつつあり、各空間スケールで支配的となる物理過程の理解が進みつつある。

銀河系内の光解離領域の観測もアルマ望遠鏡やASTE, JWSTにより進展している。COや水素分子、PAHの観測などにより、光蒸発流の速度構造や温度構造、紫外線量の分布などが明らかになった(Goicoechea et al. 2016; Zannese et al. 2025)。

・銀河スケールの星間物質と星形成サイクル: 分子雲の大局的な性質は、重力的安定性や星形成効率などで特徴づけられる。これまでに銀河系内や局所銀河群ではCO輝線により研究が行われてきたが、最近では、星形成主系列にある100個弱の近傍銀河においてアルマ望遠鏡を用い銀河の分子領域ほぼ全域で分子雲が観測され、それらの重力的安定性が調べられてきている(Leroy et al. 2021)

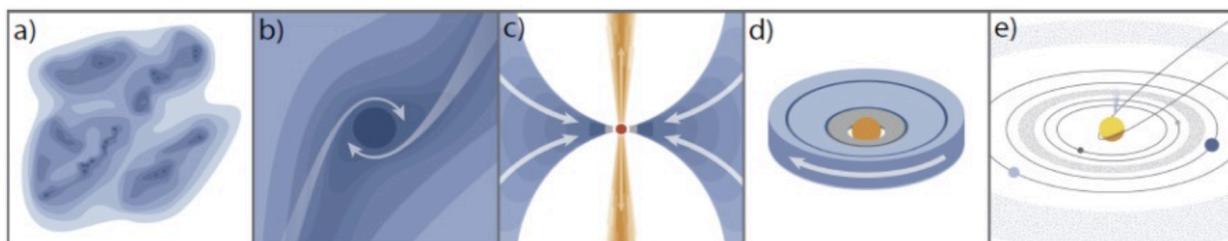


図2.5.1 : 分子雲から原始星円盤、原始惑星系円盤、そして惑星系へ (Oberg & Bergin 2021)

。さらに分子雲の中でも星形成に直結する高密度ガスの観測も進み、高密度ガスの中でも星形成効率に違いがあることが統計的観測で明らかになり、その違いの要因となる機構が議論されている (Neumann et al. 2023)。

分子雲の他にもHII領域、星団などの銀河全体のマップが同様の銀河で得られ、星間物質と星形成のサイクルの描像が明らかになってきた(Schinnerer & Leroy 2024)。MUSE/VLTなどからHII領域を同定し、分布を分子雲のものと比較することにより、分子雲や星形成のタイムスケールを導き出すことが可能になった(Schinnerer et al. 2019)。JWSTの観測では、スーパーバブルと呼ばれる複数の超新星爆発のエネルギーによってできた空洞構造が銀河全体に多数存在していることもPAH輝線により発見され、バブルの縁に位置するシェルにおいて若い星団が生まれている様子が明らかになった。これらの観測に基づき、過去の星形成によって生じたスーパーバブルが、分子雲形成・進化と次世代の星形成に与える影響の理解が進むことが期待される(Barnes et al. 2023)。

さらに星形成率の高い銀河での分子ガス観測は星形成の銀河への影響を顕著に示している。こうした銀河では星形成のエネルギーが高く、密度が濃いために、分子のみで同定できるスーパーバブルのシェルが見受けられる(Sakamoto et al. 2006; Bolatto et al. 2013)。また、星形成やAGNのエネルギーによる分子アウトフローも多くの銀河で見受けられ、ガスの流出から将来の星形成の抑制につながる事がわかってきた(Sakamoto et al. 2014; Barcos-Muñoz et al. 2018)。また、多くの分子種も検出され、それらの存在量から紫外線、宇宙線、衝撃波の星間物質への影響が調べられてきた(Martin et al. 2015; Harada et al. 2024)。最近のJWSTの観測ではPAHによるフィラメント状のアウトフローが検出され、その起源の解明が課題となっている(Bolatto et al. 2024)。

AGNを含む銀河ではアルマ望遠鏡により銀河中心の超巨大ブラックホール付近をpc以下で解像する観測がされ、ブラックホールへの質量流入の効率などが明らかになってきた(Izumi et al. 2023)。またアウトフローの兆候も複数銀河で顕著に見られ(Garcia-Burillo et al. 2014)統計的研究ではAGN起源と星形成起源のアウトフローの違いがわかってきている。(Fluetsch et al. 2019)また、AGN周りではX線解離領域の特徴を示す分子組成の探査も行われている(Izumi et al. 2020)。

宇宙の進化に応じて金属量は増加するため、低金属量の環境は宇宙初期の状況を反映する。近傍の低金属量銀河は、遠方銀河では得られないサブパーセクスケールの空間分解能で情報を取得できるユニークな実験場となる。低金属量環境では星間塵が少なく紫外線がより透過するため、低温ガス中におけるH₂やCOなどの分子の存在量が少ない(Krumholz et al. 2009)。そのため、COを代表とする分子輝線が一般に弱く、分子ガス輝線の検出が困難であることが一つの制約となってきた (Bolatto et al. 2003, Grishunin et al. 2023)。一方で、このような領域に対してもアルマ望遠鏡の高感度・高解像度観測が有効で(Rubio et al. 2015)、特に近傍に位置する低金属量銀河である大小マゼラン雲の分子雲の性質を広域で明らかにする上で、ACA(Atacama Compact Array)が大きく貢献してきた (Tokuda et al. 2021)。小マゼラン雲では、太陽近傍の分子雲とは異なり、必ずしもフィラメント状とは限らない例も報告されており(Tokuda et al. 2025)、金属量に応じた分子雲の特徴や星形成モードの変化が捉えられつつある。

星間物質の中でも水素原子の相はVLAによって様々な銀河で研究されてきた(Walter 2008)。最近ではSKAの先駆体MeerKAT/ASKAPによりさらに高感度観測が可能になった。分子ガスに比べて原子ガスの多い銀河の外縁部のガスの質量分布から銀河の重力、圧力などの基本量の導出につながっている(Eibensteiner et al. 2024)。また、銀河団の中の銀河同士の潮汐作用などの証拠も発見されてきている(Serra et al. 2023)。

■ 惑星系に至る物質進化の解明

・原始星円盤・原始惑星系円盤・残骸円盤のガス・ダスト分布と惑星形成: 円盤内の分子組成に関する理解も特にアルマ望遠鏡により大きく進展した。原始星天体の高空間分解能観測では、分子の性質の違いにより、エンベロープと円盤の間で分子の分布に違いが生じ、円盤を分子で撮像観測することに成功し(Ohashi et al. 2023)、特性の異なるさまざまな分子輝線を組み合わせた観測で円盤への降着衝撃波など原始星周囲の構造やダイナミクスが明らかになってきた(Sakai et al. 2014; Oya et al. 2016)。FU Ori型の非常に光度の高い天体では、円盤内の水や様々な複雑な有機分子の検出に成功した(Lee et al. 2019; Tobin et al. 2023; Yamato et al. 2024)。一方で、原始星天体から原始惑星系円盤への化学的進化も明らかになった。円盤内では、COガスがおよそ100万年かけて枯渇すること(Zhang et al. 2020)、また、炭素元素と比較した枯渇の度合いは、酸素元素はより多いのに対し、窒素元素はより少なく、ガス中の炭素/酸素元素比および炭素/窒素元素比が、星間物質のものとは比べてそれぞれ逆転している可能性などが示唆された(Bergin et al. 2016; Anderson et al. 2019)。JWST観測ではさらに、炭素ダストが昇華するストライン(煤線)の存在が示唆され(Colmenares et al. 2024)、残骸円盤に迫る年老いた原始惑星系円盤の炭素元素量が豊富であることも示された(Long et al. 2025)。アルマ望遠鏡による高空間分解能観測では、分子ごとにギャップやリング構造を示し、それらは必ずしもダストのリング・ギャップ構造と一致しているわけではなく、惑星形成円盤における物質の分布を反映することが示唆された(Oberg et al. 2021; Law et al. 2021)。複雑な有機分子もアルマ望遠鏡で初検出され、JWSTでもベンゼン環や分子イオンなどが検出されている(Walsh et al. 2016; van Dishoeck et al. 2023)。地上大型光赤外線望遠鏡での観測に加え、JWSTでも複数の円盤で、ガスや氷中の水分子が検出された(Honda et al. 2009; Banzatti et al. 2023; Sturm et al. 2023)。水素、窒素、炭素などの希少同位体分子の分布もアルマ望遠鏡で明らかになり(Cataldi et al. 2021; Hily-Blant et al. 2019; Yoshida et al. 2022)、JWSTでは、ガスや氷中の炭素同位体分子も検出された(van Dishoeck et al. 2023; Sturm et al. 2023)。これらの観測は、今後の系外惑星大気と比較することで、惑星とその大気の形成・進化過程、および惑星の元素組成進化の理解に寄与すると期待できる。

・原始星天体と星形成: 大小質量星形成コアのライン・サーベイもアルマ望遠鏡により進展した。特に小質量星コアでは、線幅が狭く遷移線のブレンドが比較的少ないため、同位体分子も含め、生体分子の前駆体など、新たな分子の発見が多数報告された(Jorgensen et al. 2020)。一方でJWSTでは、星形成領域における氷分子の観測が進展した。氷中の複雑な有機分子や炭素同位体分子など、JWST以前は難しかった希少分子の観測が可能となった(Rocha et al. 2024; Brunken et al. 2024)。また、アルマ望遠鏡観測により、同程度の空間スケール・同一分子雲でも、**環境によってエンベロープ・円盤における気相分子組成に違いがあることが明らかにされた**(Bianchi et al. 2020; Yang et al. 2021)。JWST観測を合わせることで、高温ガスの分布との関係もわかってきた(Okoda et al. 2025)。これらの観測と理論モデルとを比較することで、星間空間における複雑な有機分子生成過程の解明に寄与すると期待される。

銀河系外縁やマゼラン星雲など、低金属量環境下での星形成領域のアルマ望遠鏡やJWST観測も進展した。銀河系に比べ、メタノールの存在量が極端に少ない星形成コアも存在することが明らかになり、環境による物質進化の違いを示唆した(Shimonishi et al. 2020)。また、近傍のスターバースト銀河やAGN銀河における分子線観測も進展している。このような環境においては、強い紫外線やX線、強い乱流場の影響が示唆されており、我々の銀河系中心部の環境との類似性が議論されている(Martin et al. 2015; Harada et al. 2024)。

§2.5.4 今後の世界的動向

■ 星・惑星系の形成過程の解明

・原始惑星系円盤内の誕生したての惑星の探査: 今後、既存の地上大型光赤外線望遠鏡に加え、JWST、そしてRoman, ELT (E-ELT, GMT, TMT)などでのコロナグラフ観測等により、原始惑星系円盤内の若い惑星からの赤外線放射(連続波、輝線)の観測の進展が期待される。一方で、アルマ望遠鏡および連続波感度の向上と複数輝線同時観測の進展が期待されるアルマ2のWideband Sensitivity Upgrade (WSU)、さらに2040年代には、ngVLAでも、若い惑星周りの周惑星円盤の観測が進むと期待される(Rab et al. 2019; Shibaie et al. 2023)。アルマ望遠鏡では、若い惑星に付随するアウトフローの存在も示唆されており、今後は、その統計的観測も期待される(Law et al. 2023; Yoshida et al. 2024)。これらの観測により、若い惑星が形成される場所や質量降着率などの惑星形成に関する重要な物理量が明らかになる一方で、惑星に降着するガスの組成にも制約がつくと考えられる。これらは、今後Arielなどにより観測の進展が期待される系外惑星大気の組成と比較することで、その進化に制約を与えると考えられる。

・原始星円盤・原始惑星系円盤・残骸円盤のガス・ダスト分布と惑星形成: 地上大型光赤外線望遠鏡やアルマ望遠鏡により、円盤ダストのリング・ギャップ・スパイラルなどの詳細構造の観測が進展した一方で、円盤のガス分布の詳細構造の観測も進みつつあり、今後もアルマ望遠鏡, ELT, ngVLAなどで観測の進展が期待される。特にngVLAは、アルマ望遠鏡では観測の難しい、円盤内縁の赤道面付近の観測を可能にする(Ricci et al. 2023)。これらの構造の分布と今後Romanなどで大きな進展が期待される長周期系外惑星の分布を比較することで、惑星形成・進化過程に制約を与えると考えられる。

円盤内ダストのサイズ分布や空隙率などの特徴についても、アルマ2, JWST, ELT, ngVLAなどの多波長観測により進展が期待される(Ueda et al. 2023)。特に偏光観測に関しては、PRIMAによる遠赤外線の波長帯での制約も期待される(Tazaki et al. 2023)。円盤内ダストの特徴付けは、惑星形成のはじまりとなる微惑星形成などに大きな制約を与えると考えられる。

円盤ガス散逸についても、アルマ望遠鏡やELT, PRIMA, GREX-PLUSなどにより、円盤ガス質量や円盤風などの統計的観測が進展し、その進化に関する理解が進むと期待される(Trapman et al. 2017)。ガス散逸は、ダスト運動やガス惑星形成、惑星軌道進化など、惑星形成を制御する重要な過程に関係しており、円盤ガス散逸を理解することで、惑星形成・進化過程に大きな制約を与える。

・原始星天体と星形成: 原始星天体に付随するアウトフローは、原始星周囲のガスの角運動量を引き抜き、原始星へのガスの降着、すなわち原始星の成長を制御する。アルマ望遠鏡やJWSTなどにより、アウトフローの回転や衝撃波付近の詳細構造の観測が進展しており、今後もELT, ngVLAなどにより、アウトフロー駆動機構などに関する研究が進展すると期待される。また高空間分解能・高分散分光観測により、円盤分裂などによる連星系・惑星系形成に関する理解も進むと考えられる(TMT サイエンスブック2020)。さらに、アルマ望遠鏡やngVLAにより、重力収縮コア内で形成される最初の静水圧平衡天体であるファーストコアの形成と、質量降着によるその後の原始星進化の観測の進展も期待される。また、乱流や磁場などを小さな構造から大きな構造まで幅広く観測することで、星形成コアの重力収縮開始時期などに関する理解が進むと考えられる(ALMA2 Project - 2020年代の科学のフロンティア)。一方で、大質量星形成領域の統計的観測はアルマ望遠鏡により大きく進展した。今後、アルマ望遠鏡, ELT, ngVLAなどにより、さらに高空間分解能の観測が進展すれば、若い大質量星に付随する円盤の詳細観測が可能になり、光蒸発やガス降着の終焉段階の理解が進むと考えられる。

(TMT サイエンスブック2020)。また、SKAによる低周波数帯における高空間分解能・高感度観測により、大質量星形成領域におけるレーザーフレアやバースト現象などに付随する3次元的な星周ダイナミクスや、HII領域の統計的観測が進展すれば、降着過程とそのタイムスケールや星周環境の観点から、大質量星形成過程の理解が進むと期待される(日本版SKAサイエンスブック2020)。

・多様性に繋がる環境効果: アルマ望遠鏡やJWSTなどにより、より遠方の星惑星形成領域の観測が可能になった。太陽系や系外惑星系の形成時の情報を知るには、銀河系の過去の環境を知る必要がある。多くの星が形成された銀河中心では、強乱流場での分子雲衝突や恒星風による分子雲圧縮、様々な強度の磁場が存在する中での誘発的星形成、超新星残骸付近での宇宙線の影響、また、過去においては、低金属量環境、活動銀河核やスターバーストの影響が考えられる。これらの影響は、銀河系外縁の低金属量領域や、近傍銀河における星形成領域の観測から類似性を探ることができる。将来的には、既存の地上大型光赤外線望遠鏡, アルマ2, ELT, ngVLA, SKA, LST/AtLASTなどにより、大質量星形成領域のみならず、小中質量星、ひいては、褐色矮星や惑星質量程度の超低質量星天体についても、多様な環境下での観測が可能になると期待される(TMT サイエンスブック2020)。前主系列星の分光観測による年齢等の物理パラメータの同定も進み、星の初期質量関数(IMF)の環境依存性に関する理解も進展すると考えられる。またSKAでは、銀河の様々なスケールにおける大局的な磁場構造の理解も進むと期待される(日本版SKAサイエンスブック2020)。

・分子雲の性質と星形成の銀河内の環境依存: 高解像度のngVLA観測では、局所銀河群より遠い銀河でも数pc以下の解像度でCO分子輝線をマッピングすることができる。一部の銀河では0.1pc程度のフィラメント構造、それ以外でもpcスケールの高密度コアなど分子雲内の構造を解像し、性質を銀河系内の分子雲と比較できることが期待できる(Leroy et al. 2015)。また、物理条件の指標となる分子輝線もアルマ2, SKA, ngVLAなどで多種検出できることが期待できるため、密度分布や紫外線、宇宙線、X線などの影響を調べる事が可能になると考えられる。一方で、現在でも複数の分子輝線で網羅的に観測している領域は、既存の望遠鏡の感度不足のため、銀河系のごく一部に限られている。よって、LST/AtLASTなどの大口径単一望遠鏡により、銀河系外縁部や高銀緯分子雲を含めた多様な環境の分子ガスの理解も同時に求められる。

・銀河中心領域へのガスの流入: AGNを含む銀河ではngVLAによりさらに小さいスケールでの中心領域へのガスの流入の効率が明らかになることが期待される。AGNに近い領域では分子ガスのみではなく電離ガスも多く存在する場合がある。天の川の銀河中心では数pcスケールで電離水素の電波再結合線によりガスがスパイラル状に流入している様子が観測された(Tsuboi et al. 2017)。こうした電離ガスをngVLAでは近傍の天の川よりも活発なAGNで観測できることが期待される(Izumi 2023)。また、AGN周りの高密度ガスで構成されるトラス状構造の解像も可能になり、中心ブラックホールへのガスの流入に対する包括的な理解につながり得る(Imanishi 2023)。

・銀河アウトフローと物質の循環: 銀河母体に比べて輝線強度が弱く検出されづらいアウトフローだが、ngVLA, SKAの感度によりより多くの銀河で検出が可能になり、銀河の性質との関係性を調べる事が可能になる。分子ガスと原子ガスの流出量の測定により星形成やAGNの銀河に与える影響が明らかになることが期待される。

■ 惑星系に至る物質進化の解明

・原始星円盤・原始惑星系円盤・残骸円盤のガス・ダスト分布と惑星形成: 円盤内元素組成分布の観測は、同位体分布も含め、アルマ望遠鏡, JWST, ELT, ngVLAにより、今後も進展が期待される。特に水のスノーラインに関しては、アルマ望遠鏡により、明るい天体のスノーラインの観測が進展してお

り、将来的には、小質量星天体も含めて、スノーライン付近の氷ペブルの移流、スノーラインの位置の同定の統計的観測がPRIMA, GREX-PLUSにより、それぞれ進展すると期待される(Inoue et al. 2023)。また、地上大型光赤外線望遠鏡、JWST, ELTなどにより、円盤内の水氷の分布の観測も進展が期待される(TMT サイエンスブック2020)。これらの観測は、今後、観測の進展が期待される系外惑星大気の組成と比較することで、惑星形成・進化に制約を与えられられる。

・複雑な有機分子や不揮発性分子の探査 - 生命の材料物質: アルマ望遠鏡や大型単一鏡電波望遠鏡(Yebes Observatory, IRAM, GBT等), JWSTで急速に進展している希少分子の探査は、今後もアルマ2 WSU, ELT, ngVLA, SKA, LST/AtLASTなどにより、さらなる発展がもたらされると期待できる(McGuire 2022; Jimenez-Serra et al. 2022)。大小質量星形成コア(ホットコア、ホットコロノ)や衝撃波面、冷たい分子雲などで、アミノ酸や核酸塩基などの生体分子の前駆体となるような複雑な有機分子や、芳香環も含む炭化水素分子、硫黄やリン、珪素を含む分子、塩化ナトリウムのような金属元素を含む塩など、多様な分子が今後も発見され、太陽系内物質や初期地球物質などとの比較により、生命の材料物質としての役割に関する議論が展開されられると考えられる。原始星天体や原始惑星系円盤においても、さらに複雑な分子が検出され、また、物質の空間分布の理解も進み、惑星系への物質進化の議論が展開されると期待できる。星惑星形成過程の多様性の理解や数値流体シミュレーションの進展とも合わせて、多様な環境における星惑星形成領域から系外惑星大気への物理的・化学的進化を明らかにし、多様な系外惑星系と生命の起源の議論が可能になると期待できる。

・銀河の多層星間物質の観測: 原子ガスの観測に関しては、SKA, ngVLAなどによりさらに高解像度、高感度な観測が可能になる。特にSKAでは、HI21cm線やOH18cm線の広域サーベイや炭素再結合線などを用いて、原子ガスと分子ガスの分布と物理状態を理解できる(日本版SKAサイエンスブック2020)。これとアルマ望遠鏡で得られた分子雲スケールの観測とを合わせ、星間ガスの分子と原子の様々な相変化を理解できるようになることが期待される。また、PRIMAでは[CII]158 μ m、[OI]63 μ mなどの光解離領域でよく見られる輝線を観測可能である。これらの輝線は、かつては銀河系内において、また最近ではアルマ望遠鏡を用いて、高赤方偏移銀河において頻りに観測されてきたが、どれくらいがHII領域、光解離領域から出ているかは近傍銀河での観測が限られている。PRIMAでの多様な銀河のマップがその理解につながると期待される(PRIMA General Observer Science Book 2023)。

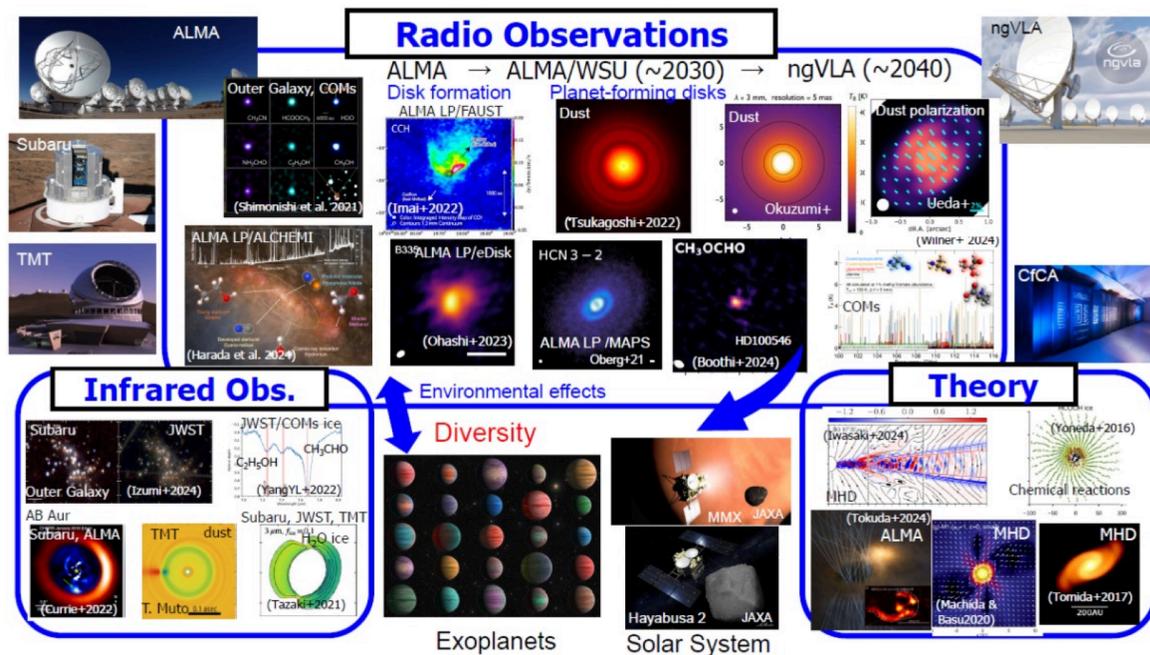


図2.5.2：多波長観測と理論のシナジー、星惑星形成領域から惑星系へ

§2.5.5 参考文献

- [1] Fukagawa, M. et al. ApJL, 605, L53, 2004
- [2] Andrews, S.M. et al. ApJL, 820, L40, 2016
- [3] Oberg, K.I. et al. ARA&A, 61, 287, 2023
- [4] Andrews, S.M. et al. ApJL, 869, L41, 2018
- [5] Ohashi, N. et al. ApJ, 951, 8, 2023
- [6] Pinte, C. et al. ApJL, 984, L15, 2025
- [7] Yoshida, T.C. et al. ApJL, 937, L14, 2022
- [8] Lodato, G. et al. MNRAS, 518, 4481, 2022
- [9] Trapman, L. et al. ApJ, 989, 5, 2025
- [10] Zhang, Ke et al. ApJ, 989, 1, 2025
- [11] Manara, C.F. et al. A&A, 618, L3, 2018
- [12] Mulders, G.D. et al. ApJ, 920, 66, 2021
- [13] Dent, W.R.F. et al. Science, 343, 1490, 2014
- [14] Higuchi, A. et al. ApJ, 883, 180, 2019
- [15] Cataldi, G. et al. ApJ, 951, 111, 2023
- [16] Andrews, S.M. ARA&A, 58, 483, 2020
- [17] Tazaki, R. et al. ApJ, 980, 49, 2025
- [18] Tsukagoshi, T. et al. ApJL, 829, L35, 2016
- [19] Kataoka, A. et al. ApJL, 831, L12, 2016
- [20] Keppler, M. et al. A&A, 617, A44, 2018

- [21] Benisty, M. et al. *ApJL*, 916, L2, 2021
- [22] Hoch, K.K.W. et al. *Nature*, 643, 938, 2025
- [23] Dong, R. et al. *ApJ*, 809, 93, 2015
- [24] Kanagawa, K.D. et al. *ApJL*, 806, L15, 2015
- [25] Zhang, S. et al. *ApJL*, 869, L47, 2018
- [26] Zhang, K. et al. *ApJL*, 818, L16, 2016
- [27] Okuzumi, S. et al. *ApJ*, 821, 82, 2016
- [28] Gorti, U. et al. *ApJ*, 690, 1539, 2009
- [29] Nakatani, R. et al. *ApJ*, 857, 57, 2018
- [30] Bai, X-N. & Stone, J.M. *ApJ*, 769, 76, 2013
- [31] Suzuki, T. & Inutsuka, S. *ApJL*, 691, L49, 2009
- [32] Kunitomo, M. et al. *MNRAS*, 492, 3849, 2020
- [33] Okuzumi, S. et al. *ApJ*, 752, 106, 2012
- [34] Johansen, A. et al. *PPVI*, p.547, 2014
- [35] Simon, J.B. et al. *ApJ*, 822, 55, 2016
- [36] Szulagyi, J. et al. *ApJ*, 782, 65, 2014
- [37] Shibaïke, Y. et al. *ApJ*, 885, 79, 2019
- [38] Alves, F.O. et al. *A&A*, 603, L3, 2017
- [39] Hirota, T. et al. *Nat. Astro.*, 1, 146, 2017
- [40] Oya, Y. et al. *ApJ*, 854, 96, 2018
- [41] Cabedo, V. et al. *A&A*, 669, 90, 2023
- [42] Burns, R.A. et al. *Nat. Astro.*, 4, 506, 2020
- [43] Burns, R.A. et al. *Nat. Astro.*, 7, 557
- [44] Tobin, J.J. et al. *ApJ*, 818, 73, 2016
- [45] Lee, J.-E. et al. *Nat. Astro.*, 1, 172, 2017
- [46] Tokuda, K. et al. *ApJL*, 789, L4, 2014
- [47] Tokuda, K. et al. *ApJ*, 965, 99, 2024
- [48] Tonious, M. et al. *A&A*, 687, 92, 2024
- [49] Pineda, J.E. et al. *Nat. Astro.*, 4, 1158, 2020
- [50] Huhn, L.A. & Dullemond, C.P. *A&A*, 704, 222, 2025
- [51] Umemoto, T. et al. *PASJ*, 69, 78, 2017
- [52] Schuller, F. et al. *MNRAS*, 500, 3064, 2021
- [53] Park, G. et al. *ApJS*, 264, 16, 2023
- [54] Fukui, Y. et al. *PASJ*, 73, S1, 2021
- [55] Beltran, M.T. et al. *A&A*, 660, L4, 2022
- [56] Hunter, G.H. et al. *MNRAS*, 519, 4152
- [57] Andre, P. et al. *PPVI*, p.27, 2014
- [58] Tokuda, K. et al. *ApJ*, 886, 15, 2019
- [59] Inoue, T. et al. *PASJ*, 70, S53, 2018
- [60] Kumar, M.S.N. et al. *A&A*, 642, 87, 2020
- [61] Padoan, P. et al. *ApJ*, 900, 82, 2020
- [62] Morii, K. et al. *ApJ*, 950, 148, 2023
- [63] Olguin, F.A. et al. *Sci. Adv.* 11, 4512, 2025
- [64] Goicoechea, J.R. et al. *Nature*, 537, 207, 2016

- [65] Zannese, M. et al. *A&A*, 696, 99, 2025
- [66] Oberg, K. & Bergin, E.A. *PhR*, 893, 1, 2021
- [67] Leroy, A., et al. *ApJS*, 257, 43, 2021
- [68] Neumann, L. et al. *MNRAS*, 521,3348, 2023
- [69] Schinnerer, E. & Leroy, A. *ARA&A*, 62, 369, 2024
- [70] Schinnerer, E. et al. *ApJ*, 887, 49, 2019
- [71] Barnes, A. et al. *ApJL*, 944, 22, 2023
- [72] Sakamoto, K. et al. *ApJ*, 636, 685, 2006
- [73] Bolatto, A. et al. *Nature*, 499, 450, 2013
- [74] Sakamoto, K. et al. *ApJ*, 797, 90, 2014
- [75] Barcos-Muñoz, L. et al. *ApJL*, 853, 28, 2018
- [76] Martín, S. et al. *A&A*, 656, 46, 2021
- [77] Harada, N. et al. *ApJS*, 271, 38, 2024
- [78] Bolatto, A. et al. *ApJ*...967...63, 2024
- [79] Izumi, T. et al. *Science*, 382, 554, 2023
- [80] Garcia-Burillo, S. et al. *A&A*, 567,125, 2014
- [81] Fluetsch, A. et al. *MNRAS*.483.4586, 2019
- [82] Izumi, T. et al. *ApJ*, 898, 75, 2020
- [83] Krumholz et al. *ApJ*, 693, 216, 2009
- [84] Balotto, A. et al. *ApJ*, 595, 167, 2003
- [85] Grishunin, K. et al. *A&A*, 682, 137, 2023
- [86] Rubio, M. et al. *Nature*, 525, 218, 2015
- [87] Tokuda, K. et al. *ApJ*, 922, 171, 2021
- [88] Tokuda, K. et al. *ApJ*, 980, 269, 2025
- [89] Walter, F. *AJ*, 136, 2563, 2008
- [90] Eibensteiner, C. et al. *A&A*, .691, 163, 2024
- [91] Serra, P. et al. *A&A*, .673, 146, 2023
- [92] Sakai, N. et al. *Nature*, 507, 78, 2014
- [93] Oya, Y. et al. *ApJ*, 824, 88, 2016
- [94] Lee, J.-E. et al. *Nat. Astro.*, 3, 314, 2019
- [95] Tobin, J.J. et al. *Nature*, 615, 227, 2023
- [96] Yamato, Y. et al. *AJ*, 167, 66, 2024
- [97] Zhang, Ke et al., *ApJL*, 891, L17, 2020
- [98] Bergin, E.A. et al. *ApJ*, 831, 101, 2016
- [99] Anderson, D.E. et al. *ApJ*, 881, 127, 2019
- [100] Colmenares, M.J. et al. *ApJ*, 977, 173, 2024
- [101] Long, F. et al. *ApJL*, 978, L30, 2025
- [102] Oberg, K.I. et al. *ApJS*, 257, 1, 2021
- [103] Law, C.J. et al. *ApJS*, 257, 3, 2021
- [104] Walsh, C. et al. *ApJL*, 823, L10, 2016
- [105] van Dishoeck, E.F. et al. *FaDi*, 245, 52, 2023
- [106] Honda, M. et al. *ApJL*, 690, L110, 2009
- [107] Banzatti, A. et al. *ApJL*, 957, L22, 2023
- [108] Sturm, J.A. et al. *A&A*, 679, A138, 2023

- [109] Cataldi, G. et al. *ApJS*, 257, 10, 2021
- [110] Hily-Blant, P. et al. *A&A*, 632, L12, 2019
- [111] Yoshida, T.C. et al. *ApJ*, 932, 126, 2022
- [112] Jorgensen, J.K. et al. *ARA&A*, 58, 727, 2020
- [113] Rocha, W.R.M. et al. *A&A*, 683, 124, 2024
- [114] Brunken, N.G.C. et al. *A&A*, 692, 163, 2024
- [115] Bianchi, E. et al. *MNRAS*, 498, L87, 2020
- [116] Yang, Y.-L. et al. *ApJ*, 910, 20, 2021
- [117] Okoda, Y. et al. *ApJ*, 982, 149, 2025
- [118] Shimonishi, T. et al. *ApJ*, 891, 164, 2020
- [119] Martin, S. et al. *A&A*, 573, 116, 2015
- [120] Rab, Ch. et al. *A&A*, 624, 16, 2019
- [121] Shibaïke, Y. et al. ngVLA-J memo series, arXiv: 2508.00393
- [122] Law, C.J. et al. *ApJL*, 952, L19, 2023
- [123] Yoshida, T.C. et al. *ApJL*, 971, L15, 2024
- [124] Ricci, L. et al. *ASPC*, 517, 147
- [125] Ueda, T. et al. ngVLA-J memo series, P005
- [126] Tazaki, R. et al. *PRIMA Science Book*, in press
- [127] Trapman, L. et al. *A&A*, 605, 69, 2017
- [128] TMT サイエンスブック2020
- [129] ALMA2 Project - 2020年代の科学のフロンティア –
- [130] 日本版SKAサイエンスブック2020
- [131] Leroy, A. et al. The ngVLA memo series arXiv:1510.06431
- [132] Tsuboi, M., et al. *ApJ*, 842, 94, , 2017
- [133] Izumi, T. ngVLA-J memo series
- [134] Imanishi, M. ngVLA-J memo series
- [135] Inoue, A. et al. *GREX-PLUS Science Book*, arXiv: 2304.08104
- [136] McGuire, B.A. *ApJS*, 259, 30, 2022
- [137] Jimenez-Serra, I. et al. *FrASS*, 9, 843766, 2022
- [138] *PRIMA General Observer Science Book* arXiv:2310.20572

§2.6 惑星系と宇宙における生命

本分野は、惑星および惑星系の多様性とその成因の理解を通じて、生命が存在しうる環境が宇宙に普遍的に成立しうるのか、また我々の存在が特異か否かを問う研究分野である。これまでに約6000個の系外惑星が発見され、惑星の半径・質量・軌道に関する統計分布や多様な惑星系の存在が明らかになり、太陽系を基準とした従来の形成理論に大きな見直しを迫っている。また、主星近傍を周回する巨大ガス惑星を中心に大気構造や成分、散逸過程に関する知見が蓄積しつつある。今後は、TESS・PLATO・Roman・JASMINE等の宇宙望遠鏡ミッションによる広域サーベイに加え、JWST・Ariel・LAPYUTA等の分光観測ミッションによる詳細な大気観測が進展し、観測と理論の統合が加速すると期待される。さらに2030-40年代には、ELTやTMT、HWOなどによる高空間(?)分解能観測によって、ハビタブル惑星の大気に含まれる生命兆候の直接探査が本格化する見通しである。知的生命探査を科学目標の一つとするSKAなどの望遠鏡も稼働が見込まれる。

§2.6.1 当該分野の目的

惑星および惑星系の多様さとその起源を、主に系外惑星に対する観測およびそのデータの解析・解釈に基づいて理解し、生命が存在しうる環境が宇宙においてどの程度の頻度で存在し得るのかを明らかにすることを目的とする。

§2.6.2 当該分野の目標

■ 星惑星の統計的分布と相関の解明

銀河系内の多様な恒星を周回する惑星・惑星系を網羅的に検出し、惑星の軌道やサイズ等の基本的性質の統計分布、および、それらの相互相関と恒星型との相関を明らかにする。

■ 惑星の性質と多様性の体系的理解

個々の系外惑星の大気や内部の物理的・化学的特性を明らかにし、惑星の多様性を記述・分類する。

■ 多様な惑星系および太陽系の形成史の解明

惑星および惑星系の起源・形成・進化過程を明らかにし、多様な惑星系との比較を通じて、太陽系および地球の特性を相対的に位置付ける。

■ ハビタブル環境の成立条件の解明

ハビタブル環境の形成・維持過程およびその多様性を明らかにし、当該環境を有する系外惑星を検出し、その存在度を評価するとともに、地球がハビタブル惑星として特殊か普遍かを明らかにする。

■ 生命兆候の特定と観測的検証

生命の存在を示す観測的指標(生命兆候、バイオシグネチャー)を特定し、そのような指標を呈する系外惑星が実在しうるか否かを明らかにし、(実在する場合には)生命兆候を観測的に検出する。

§2.6.3 現在までの到達点

前節で掲げられた5つの目標に対して、これまでの科学的進展・到達点を概観する。1995年の最初の系外惑星の発見以降、観測と理論の両面で本分野は大きく進展してきた。これまでに約6000個の系外惑星が発見され、惑星の半径・質量・軌道に関する統計分布や中心星との相関が定量的に明らかになりつつある。密度や大気組成に基づく内部・大気構造の理解も進み、惑星の多様性を記述・分類するための基盤が整いつつある。惑星形成論は原始惑星系円盤の観測や理論モデルの発展により刷新され、太陽系と系外惑星系の比較が進展している。ハビタブル環境に関してはM型星まわりの惑星を中心に理解が進み、生命兆候の理論的検討も始まっているが、検出や評価には多くの課題が残されている。

■ 惑星の統計的分布と相関の解明

1995年の最初の系外惑星の発見(Mayor & Queloz 1995)以降、Kepler衛星やTESS衛星などによるトランジット観測、ESO3.6m/HARPSやKeck/HIRES、すばる/HDSなど地上望遠鏡による視線速度法、OGLEやMOAプロジェクトによる重力マイクロレンズ法等を通じて、これまでに約6000個の系外惑星が検出されてきた(NASA Exoplanet Archive 2023)。その結果、惑星の半径・質量・軌道などの基本的性質に関する統計分布が定量的に明らかとなりつつある(図2.6.1)。短周期の惑星(ホットジュピターなど)が多数発見され、太陽系とは異なる構造をもつ惑星系が普遍的に存在することが示された。特に、周期100日以下では、太陽系に存在しない惑星種族である、スーパーアースやサブネプチューンが圧倒的多数を占めており(Batalha 2014)、惑星形成の従来の理解の修正を余儀なくさせる知見が得られている。さらに、惑星分布は一様ではなく、海王星級惑星が著しく少ない「海王星砂漠」(Szab & Kiss 2011)や、1.5-2地球半径付近の惑星欠乏域である「半径谷」(Fulton et al. 2017)など、形成・進化過程の痕跡を反映する複数の構造的ギャップも確認されている。これらの惑星統計と中心星の性質との相関も明らかになりつつあり、とくに中心星の金属度が高いほど巨大ガス惑星の出現率が高くなること(Santos et al. 2004)、また、G型星と比較してM型星まわりでは巨大惑星の出現率が顕著に低いこと(Mulders et al. 2021)が、多数の観測によって明らかになっている。

一方で、図2.6.1が示すように、現在の観測手法には強い選択バイアスが存在する。トランジット法および視線速度法は、軌道周期が短く、惑星半径または質量が大きな天体を選択的に検出する傾向がある。重力マイクロレンズ法では、感度の高い領域がアインシュタイン半径付近に限られるため、恒星から中間距離にある惑星に選択バイアスがある。対照的に、直接撮像法は中心星から十分に離れた領域にある巨大惑星にしか感度がない。このため、太陽系のように広がった軌道配置をもつ惑星系に対しては、現在の観測では木星や土星に相当する巨大惑星の一部しか検出できず、地球型惑星や天王星・海王星に相

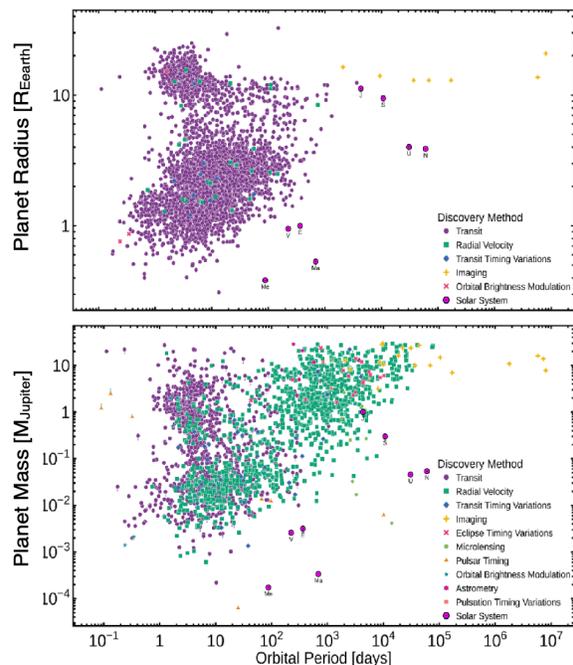


図2.6.1：これまでに発見された系外惑星の分布。軌道周期と惑星半径(上)と質量(下)の関係 (NASA Exoplanet Archiveより)

当する惑星は未発見のままである。また、中心星に関しても偏りがある。これまでに発見された系外惑星の大多数は太陽型星 (FGK型星) を回っており、M型星を含む低質量星の周囲の惑星はまだ十分に探索されていない。実際、主に太陽型星を対象としたKepler衛星は3000個以上の惑星を発見しているのに対し、M型星を重点的に観測しているTESS衛星による惑星発見数は、現時点で600個程度にとどまっている(NASA Exoplanet Archive 2023)。

■ 惑星の性質と多様性の体系的理解

太陽系には少なくとも8個の惑星が存在し、それらはバルク組成に基づき、岩石惑星・巨大ガス惑星・巨大氷惑星という分類が確立している。さらに、主に探査機による観測によって、それぞれの内部構造や大気特性が精緻に調べられてきた (e.g., Guillot et al. 2023)。木星と土星では、Voyagerに始まり、Galileo・Juno・Cassiniによる重力場測定から、内部の層構造に関する理解が大きく進展した。特に、木星では周回機Junoによる重力モーメントの高精度測定、土星ではCassiniによるリングの縞模様の解析から、中心に高密度のコアが存在するのではなく、むしろエンベロープに重元素が広く分布していること(“diluted cores”と呼ばれる)が示唆されている。また、全体としては水素とヘリウムが主成分であるものの、重元素が太陽元素存在度に比べて過剰であることも知られている。これらは、巨大ガス惑星の形成を理解する上で極めて重要な知見である (e.g., Ikoma & Kobayashi 2025)。一方、天王星・海王星については、内部および大気に重元素が豊富に含まれていることなど、木星や土星と共通する性質は知られているが、依然としてVoyagerによるデータが主であり、理解は木星・土星ほど進んでいない。内部の層構造や熱輸送の形態など、未解明の点が多く残されている。こうした知見は、太陽系という一つのサンプルに基づくものであり、惑星の性質や形成過程の一般性を理解するには限界がある。この制約を打破するため、系外惑星の研究が進展し、太陽系を超えた多様性の体系的理解が求められている。

系外惑星の検出数が飛躍的に増加する中で、発見にとどまらず、各惑星の物理的・化学的性質を明らかにする研究が進展している。トランジット法や視線速度法によって得られる半径と質量の情報を組み合わせることで、惑星の平均密度から内部構造を推定する試みが進み、岩石惑星・巨大氷惑星・巨大ガス惑星といった太陽系に基づく分類に加えて、その中間的な組成を持つ惑星が多数存在することが明らかとなってきた。たとえば、スーパーアースやサブネプチューンに関しては、岩石核の上に水素・ヘリウム大気を持つと考えられているが、内部に水や氷を含む可能性もあり、組成の多様性や内部構造には依然として大きな不確定性が残されている (Valencia et al. 2010)。観測に基づく密度推定は平均的な情報にとどまり、内部の層構造や物質の状態を一意に決定するには、未だ限界がある。

一方、Hubble宇宙望遠鏡 (HST) やJames Webb宇宙望遠鏡 (JWST) によるトランジット惑星の大気分光観測が進展し、特に短周期の巨大ガス惑星や巨大氷惑星がまとう水素主体の大気に関して、新たな知見が得られている。たとえば、太陽系の木星では(アンモニウム化合物の雲に隠されているため)直接検出が困難であった水蒸気 (H_2O) が明瞭に検出され (Tinetti et al. 2007)、大気中に重元素が豊富に含まれていることも明らかになってきた (JWST Transiting Exoplanet Community Early Release Science Team 2023)。これは、これまで内部に限定されていた金属量の議論を大気レベルにまで拡張する重要な成果である。一方、このような大気分光観測においては雲やヘイズがスペクトルを平坦化させることで主要分子の検出を妨げている場合もあり (Kawashima et al. 2019)、大気組成の解釈に大きな不確実性をもたらしている。さらに、いくつかの短周期惑星では、水素のライマン α 線 (Ehrenreich et al. 2015) やヘリウムの吸収線の観測 (Spake et al. 2018) を通じて、大気が外層から流出していることも明らかになっており、大気進化の理解において重要な知見を与えている。

近年では、理論モデルの進展も著しい。放射平衡や光化学を取り入れた大気モデルの整備が進み、大気分光データの解析(リトリーバル)を行うコードも一般に公開され、誰でも観測データから大気の性質を推定できる環境が整いつつある(Waldmann et al. 2015)。こうした観測的・理論的な進展により、惑星の多様性に関する理解は定性的にも定量的にも深まりつつある。しかしながら、観測バイアスによるサンプルの偏りや観測限界により、惑星の性質の体系的理解に向けた課題はなお多く、また、大気で生じる物理・化学過程のモデル化の不定性も大きい。

■ 多様な惑星系および太陽系の形成史の解明

原始惑星系円盤の観測や数値シミュレーション、系外惑星の統計的分布に基づく解析を通じて、惑星形成理論は大きく進展してきた。太陽系形成シナリオとして提唱された「京都モデル」の基軸概念である「原始惑星系円盤内での臨界質量コアによるガス捕獲を経た巨大ガス惑星形成」の枠組み(いわゆるコア集積シナリオ)(Ikoma & Kobayashi 2025)は、それを支持する観測的証拠もあり、現在でも維持されている。しかし一方で、短周期の巨大惑星や、太陽系には存在しない軌道や質量を持つ惑星の存在が明らかになったことで、京都モデルが暗黙の前提としていた多くの点が再検討を余儀なくされている。

例えば、かつての標準的な微惑星仮説では、固体粒子が集積して微惑星を形成し、それが衝突成長することで惑星が形成されると考えられていた。しかし、アルマ望遠鏡による原始惑星系円盤の高解像度観測により、円盤内にはリング状やギャップ状の構造が普遍的に存在し、ダストやガスの集積が局所的に起こることが示唆されている(ALMA Partnership et al. 2015)。これにより、微惑星形成メカニズムそのものが再検討され、近年では数cm程度の「ペブル」がガスとともに移動しながら成長する「ペブル集積」が有力なシナリオとして注目されている(Johansen & Lambrechts 2017)。

さらに、京都モデルでは惑星は「その場で形成される」と想定されていたが、現在では惑星が原始惑星系円盤内を大きく移動すること、すなわち惑星移動が数値シミュレーションでも証明され、一般的であると認識されている(Paardekooper et al. 2023)。また、惑星は一方向に成長し続けるのではなく、大規模な大気流出あるいは巨大衝突によって質量を大きく損失しうることも観測的にも理論的にも明らかになってきた(Ehrenreich et al. 2015)。このように、惑星形成・進化の過程は多段階かつ動的であり、初期条件から最終的な惑星系の特性を一意に予測することは困難である。

こうした複雑な形成過程の中には、確率的あるいはカオス的な要素を含む現象も少なくない。従来、太陽系のような単一の惑星系しか対象とできなかった時代には、そのような偶発的プロセスがどの程度形成結果に影響しているかを判断することは困難であった。しかし現在では、多数の惑星系から得られた観測データに基づいて、惑星の統計的分布との比較が可能となり、こうした確率的プロセスの影響を平均化し、支配的な形成メカニズムの検証に資する新たな枠組みが整いつつある(Burn & Mordasini 2025)。

一方、太陽系の形成過程についての理解も、探査機で取得された詳細なデータとともに進展している。

太陽系小天体の探査および望遠鏡観測から、太陽系の形成史とりわけ微惑星に関する制約が得られてきた。ランデブー探査としては、NASAのNEARシューメーカーによるS型小惑星ErosやNASAのDawnによるメインベルト大型小惑星VestaとCeres、さらにはESAのRosettaによる木星族彗星67P/Churyumov-Gerasimenkoの探査があり、小天体の地形や地質、化学組成、表面活動などに関する新たな観測データがもたらされた。さらに小天体表面物質のサンプルリターン(SR)探査は、日本が世

界に先駆けて推進し、はやぶさがS型小惑星イトカワの、はやぶさ2がC型小惑星リュウグウの試料帰還をそれぞれ成功させ、後者では地下試料の持ち帰りにも成功した。さらに米国のOSIRIS-RExもB型小惑星Bennuの試料帰還を成功させた。それらの試料分析からは地球の汚染を受けていない多様な物質が得られ、微惑星形成・水質変成過程、有機物進化、円盤磁場などを制約する多くの成果が得られている。また、はやぶさ2による宇宙衝突実験は惑星成長の基礎となるクレーター科学の実証的成果をもたらした。一方、広視野赤外探査機WISE/NEOWISEによるサーベイは多くの太陽系小天体の発見をもたらし、小天体の分布・特徴に関する統計的議論を格段に向上させた。さらにあかりによる小惑星の近赤外分光から水氷・含水ケイ酸塩の多寡が議論され、JWSTによる小惑星や太陽系外縁天体の分光観測からも化学組成や起源を制約する興味深い成果が出つつある。

かつて月から持ち帰られたサンプルが太陽系の理解を大きく前進させた。月探査はそれだけで太陽系科学における主要な役割を終えたと考えられるかもしれないが、近年でも月科学の着実な歩みは惑星系の理解に貢献している。月形成に関わる巨大衝突仮説は広く受け入れられているが、形成直後に起こったと考えられる月の熱膨張(cf., Andrews-Hanna et al. 2013)は冷たい初期内部を示唆し、巨大衝突仮説にいささかの修正を求めるようである。また、マグネシウムスイートと呼ばれる鉱物の生成年代が、43.5億年までの短期間に集中しており(Borg and Carlson, 2023)、月の公転軌道がラプラス面にはまった時期に一致すると提案されて(Nimmo et al., 2024)注目された。こうした最近の研究成果は、誕生直後の月の熱史がこれまで考えられていた以上に複雑であり、地球-月系を生んだ巨大衝突に、ひいては巨大衝突を普遍的プロセスと考える現代の惑星系形成理論に影響を与えずにはおかない。他方で、太陽系の年代推定の基礎をなす月面クレーター生成率にも修正が起きている。中国の嫦娥5号と6号が地球に持ち帰った月サンプルの分析により、月の海の年代が少しだけ古くなった(Cui et al. 2024)。太陽系基礎データのこうした微修正はアルテミス計画の進展により今後も増え続けると考えられる。

その一方で、惑星形成理論には依然として多くの未解決の問題が残されている。たとえば、ホットジュピターの存在頻度や形成経路についてはいまだ決定的な説明がなく、半径谷の形成メカニズムに関しても、大気流出説・形成時の組成の違い・移動履歴など複数の解釈が併存している。現在知られている惑星の統計分布全体を一つの理論モデルで整合的に説明することはまだ達成されておらず、理論と観測のさらなる統合的検討が必要である。

■ ハビタブル環境の成立条件の解明

地球がどのようにして0.02wt%という少量の水を表層に保持し海と陸が共存するハビタブル惑星(ここでは、表面に液体の水を保持する惑星[で良いですか?])となったのか、という問いは、古くから地球惑星科学の大問題である。太陽系内惑星の中で地球のみ海を保持し、兄弟惑星である金星や火星がハビタブルでないのは、暴走温室効果や火山巨大噴火による大気組成の変化、それに伴う大気散逸、気候変動によって地球とは異なる進化の道筋に進んでいったためだと考えられる。一方で、そもその水の獲得経路に関しては、小惑星や彗星による持ち込みや原始惑星系起源などいくつかの説が検討されているが、未だ解決には至っていない。惑星形成時のマグマオーシャンから、材料物質中の少量の水が脱ガスしたのかも知れないし、惑星集積の末期に降り積もったレイトベニアから染み出したのかも知れない。より一般に、どのような条件でハビタブル惑星が形成されるかについての体系的な理解はできていない。さらに言えば、地球と金星・火星の相違は惑星形成後の様々な物理化学過程が天体のハビタビリティを大きく変遷させる可能性を示す。エウロパ内部には地下海が広がっており、水と岩石が直接反応して生命発生の条件を満たしていそうである(Carlson et al., 1999; Dalton, 2007)。タイタンではメタンの入道雲から雷雨が降り注ぎ、水氷の大地の上に河川や海を作っ

ている(Hayes et al. 2018)。ここではメタンが水の代わりに生命発生を促しているかもしれない想像される。現在の太陽系内を観察するだけでも、ハビタビリティには広いバリエーションがあり得るのである。

一方で、もし岩石惑星が地表に水を保持していた場合にそれが液体(海洋)として存在しうる星周領域「ハビタブルゾーン(HZ)」の理論は早くからある程度確立している(Kasting et al. 1993)。Keplerミッションにより、太陽型星やM型星のHZ内に存在する多数の惑星候補が発見された(Borucki 2016)、ハビタブルゾーンに岩石惑星ができる確率の見積もりは進んでいる。

また、惑星が惑星表層に水が存在したとして、その水の安定性についての理論研究が進んでいる。太陽近傍にはM型星が圧倒的に多く存在することや、地球型惑星の大気(主星光に対する)相対的なシグナル強度はM型星周りの方が高いことにより、トランジット分光観測が期待できるHZ内惑星は現在のところM型星まわりに限られている。この観測バイアスは、M型星のHZ内惑星を念頭においたハビタブル環境の理論研究の急速な発展を促してきた。とくに、M型星のHZ内惑星で予期される潮汐固定や強紫外線環境下を想定した気候・大気進化に関する研究が、近年大きく進展している。3次元全球気候モデル(GCM)を用いたシミュレーションでは、昼夜で恒常的に照射条件が異なる潮汐固定状態においても、十分な大気質量や海洋熱輸送があれば熱分布の均質化が可能であることが示されつつある(Yang et al. 2019)。また、大気上層の光化学過程や紫外線加熱、赤外線放射冷却を考慮したモデリングも進んでおり、(太陽系では見られない)熱的散逸を通じた大気の流出率の評価や、水蒸気や温室効果ガスの保持可能性に関する研究が盛んに行われている(Nakayama et al. 2022)。こうした理論研究により、HZ内にあるという幾何学的条件だけでなく、実際に液体の水が長期的に安定して存在しうるかどうかを定量的に評価するための物理的枠組みが整いつつある。

一方で、現状、観測的にハビタブル環境の成立条件を検証できる状況には至っておらず、分光観測による本格的な探査は今後の技術的進展を待つ段階にある。M型星のHZ内の地球型惑星の大気観測はJWSTにより実際に試みられているものの(Glidden et al. 2025)、現時点では不定性が大きく、確実な分子の検出には至っていない。また、太陽型星のHZ内惑星の発見と特徴付けはさらに難しい。太陽型星は近傍に少なく、また近傍星まわりの系外惑星探索を行うTESSミッションは設計上、軌道周期が長い(1年程度の)HZ内惑星の検出には適していない。さらに視線速度法においても、現在の検出感度は1 m/s程度にとどまっており、太陽型星のHZ内を公転する地球型惑星が生み出す視線速度変化(約9 cm/s)を検出する技術は現時点では存在しない。こうした恒星分布、サーベイ観測設計、技術的限界の組み合わせにより、ハビタブル環境に関する観測的研究は、理論研究に比べて大きく遅れており、いまだ端緒にすぎないのが現状である。

一般的にハビタブル惑星の候補としては地球型惑星が想定されるが、地球より大きく水素に富む大気の方がトランジット大気分光が容易であることを踏まえ、水素に富む大気と海を持つような惑星(Hycean惑星)の存在も提案されている(Madhusudhan et al. 2021)。Hycean惑星は、従来の地球型惑星とは異なる構造を持ちながらも、大気下層に液体の水の層を保持しうる環境を実現し得るとされ、例えばJWSTで大気分光観測が行われたK2-18bがその一つの候補として現在注目を集めている。こうした新しい分類概念は、ハビタブル環境の多様性とその探査戦略に新たな方向性を与えつつある。

■ 生命兆候の特定と観測的検出

上述のとおり、現在の観測技術では、HZ内の地球型惑星の大気分光は困難であるが、生命探査に向けた理論的検討は着実に進展している。生命の存在を示す観測的指標(バイオシグネチャー)の特定に向け、天文学者・生物学者が連携して研究が進められている。例えば、O₂あるいはO₃とCH₄が大気中に同時に存在するなどの非化学平衡な大気組成がその一つの候補とされる (Lovellock

1960)。また、地球の生物圏が放出する大気分子や生物の分光学的特徴が網羅的に検討されており、その体系化も試みられている (Schwieterman et al. 2018)。大気光化学や気候進化モデルにより、どのような惑星条件でバイオシグネチャが生成・蓄積されるかについての理解が深まりつつあり、惑星形成や大気進化との連携を通じて、生命兆候を持つ可能性のある系の存在範囲も議論され始めている。一方で、非生物的生成による「偽陽性」のシナリオを識別するための指標の整備も進んでいる (Meadows et al. 2018)。

最近では、Hycean惑星の候補とされるK2-18bにおいて、JWSTによる大気分光データに、生命由来の物質を考える研究者もいる(Madhusudhan et al. 2023)。ただし、統計的な有意性が高いとは言えず、また有意だったとしても、非生物的生成経路の排除もなされていない。惑星の構造自体もHycean惑星とみなすにも不確定性が残されており、現時点で「生命兆候を捉えた」と評価するには時期尚早である。また、そもそもハビタブル表層環境の成立条件や持続性に関する理解が未成熟であるなかで、生命兆候を論じるには慎重な検討が必要であり、理論・観測両面での基盤整備が今後一層求められている。そうした点では、火星生命探査の試行錯誤の歴史が指針となりえるかも知れない。かつては「アランヒルズ隕石中に生命の兆候を発見」(McKay et al. 1996)のニュースが世界中を駆け巡ったこともある。最近では35億年前の泥岩から水和リン酸化鉄と硫化鉄が見つかって生命存在の有力証拠と主張されている(Hurowitz et al. 2025)が、無機的な生成の可能性も残されており、冷静で慎重な議論が求められる。

上述の進展は多様な系外惑星の大気分光から続くものであるが、一方で、知的生命が放つ電磁波を検出しようという知的生命探査 (SETI) の試みも以前から行われており、系外惑星研究の高まりを受けて現存の電波望遠鏡 (VERA、FASTなど) を利用した新しいSETI観測も始まっている。(ただし、確かな証拠はまだない。) また、知的生命が放つ電磁波だけでなく、知的生命がその活動の結果大気中に放出する大気分子の検討といった広がりも見せている。恒星のや銀河のエネルギーをまるごと利用できるような文明 (カルダシェフ・スケールII, III) があつたときに想定される特異な放射を検出しようという試みも行われている (いわゆるダイソン球からの赤外放射を探索するProject Hephaistosなど (Suazo et al. 2022))。

§2.6.4 今後の世界的動向

近年の飛躍的な技術的進歩により、系外惑星の探索は、検出による存在の確認から分光観測等による性質の特定 (特徴づけ) へ、さらに、生命居住可能性 (ハビタブル環境) の評価や生命兆候の検出へと急速に展開しようとしている。図2.6.2に、現在進行中または計画中、提案中の大型観測計画を時系列で示した。特に、2020年代後半から2030年代にかけて、宇宙・地上の観測装置の世代交代が進み、これまでにない広範囲かつ高解像度で多様な惑星系の知見が増加すると期待される。

■ 惑星の統計的分布と相関の解明

新たな惑星の発見と統計的分布の理解に向けたサーベイミッションは、今後も継続的に実施され、かつ大きな進展を見せると期待される。NASAのTESSは第3延長フェーズに入り (TESS Webpage)、これまでに探査した領域の再訪を通じて、主にM型星まわりの軌道周期の長いトランジット惑星の検出

を試みるとともに、特徴づけに適した候補天体の選定や時間変動現象の長期モニタリングなどにも重点を置いた戦略が進められている。

これに続くESAのPLATOミッション(2026年打ち上げ予定)(PLATO Webpage)は、主に太陽型星まわりのHZ内に位置する地球サイズ惑星の検出を主目的とし、長期間にわたるトランジット観測を行う。また、PLATOも明るい近傍星に多数の惑星候補を発見することで、将来の分光観測ミッションにとっても極めて重要なターゲットを提供することになる。

加えて、NASAのRoman宇宙望遠鏡(2027年打ち上げ予定)(Roman Webpage)は、重力マイクロレンズ法を用いて、雪線以遠に位置する地球質量あるいはそれ以下の惑星を高感度で検出する観測を行う。トランジット法や視線速度法では困難な長周期の低質量惑星の検出が可能で、木星や土星のような巨大惑星を伴う外縁部まで含む広がりをもつ惑星系の普遍性を検証するものである。

一方、地上観測では、すばる望遠鏡のIRD、ESO/VLTのESPRESSO、スペイン・カラアルト天文台のCARMENES、CFHT望遠鏡のSPIRouなど、可視・赤外線の高分散分光器を用いた高精度視線速度観測が進展している。これらの装置は、主にM型星や若い恒星を対象に、短周期の地球質量級惑星の検出や、トランジットを伴わない惑星系の検出に重要な役割を果たしている。宇宙ミッションとの相補的關係のもと、今後も探査領域の拡大と統計的理解の深化が進むと期待される。

■ 惑星の性質と多様性の体系的理解

惑星大気の構造や化学組成の多様性を明らかにするうえで、赤外分光観測は中心的な役割を果たしている。JWSTは、赤外線領域でのトランジット分光および直接撮像により、 H_2 を主成分とする大気中の H_2O 、 CO_2 、 CH_4 など多様な分子の検出に成功しており、主に巨大惑星を対象に温度構造や雲の存在、大気循環などの物理・化学過程の理解を大きく進展させている。当面は、こうした観測手法を通じて、JWSTが系外惑星の大気研究における主力観測装置としての地位を維持すると見込まれる。

これに続くESAのArielミッション(2030年代初頭打ち上げ予定)は、初の系外惑星大気の統計的調査に特化した宇宙望遠鏡であり、約1000個のトランジット惑星を対象に赤外分光観測を実施する計画である。多様な恒星・惑星タイプを対象とし、惑星の質量・半径・軌道特性と大気組成の相関関係を

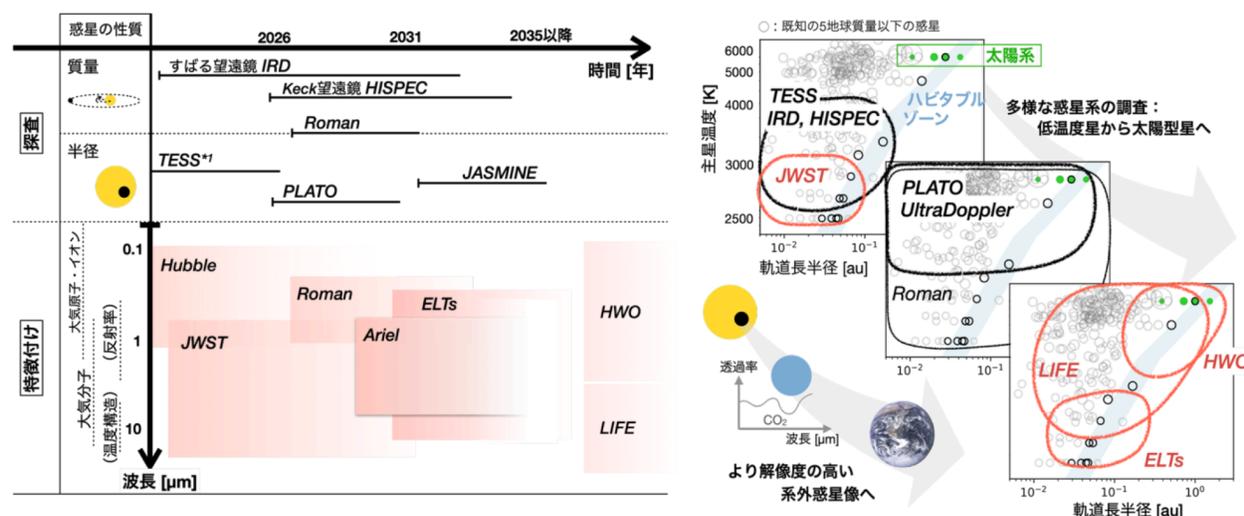


図2.6.2：系外惑星観測のロードマップ。様々な観測プロジェクトが予定されており(左)、観測ターゲットが低温星から太陽型星のハビタブルゾーンへと広がっていく(右)

統計的に抽出することが期待されている。日本も当該ミッションに正式参画しており、得られる科学データを欧州諸国と同等に活用できる立場にある。ただし、JWSTやArielの観測対象はいずれも主に高温かつスケールハイトの大きな惑星に限定されるため、ハビタブルゾーンに位置する地球型惑星の詳細な特徴づけには、現時点では技術的限界がある。

2030年前後には、ヨーロッパ南天天文台がチリに建設中の次世代超大型地上望遠鏡Extremely Large Telescope (ELT) もファーストライトを迎える予定である。可視～近赤外領域の面分光器HARMONIや中間赤外回折限界イメージャMETISによる系外惑星の直接撮像観測、また、近赤外回折限界イメージャMICADOによるアストロメトリー系外惑星探査などが計画されている。その後、可視～近赤外領域の高分散分光器ANDESが第二期装置として予定されており、惑星大気の詳細観測および惑星系の視線速度測定が計画されている。ANDESでは、同位体の検出や風速の測定など、高分散分光による惑星大気観測の強みを活かし、Arielとの協調観測も期待されている。一方、日本は、アメリカの2大学・カナダ・インド・中国と連携して30メートル望遠鏡の建設を北天で計画している。第一期装置の一つとして高分散分光装置MODHISが予定されており、ANDESと同様のサイエンスを北天で可能にする。さらに、将来装置として、ハビタブルゾーンの地球型惑星の直接検出を目的とした高コントラスト装置が計画されている。可視～近赤外領域の反射光で太陽系近傍のM型星周りのハビタブルゾーン、中間赤外領域の熱放射で太陽系近傍の太陽型星惑星の周りのハビタブルゾーンが、観測対象となる。

これらの赤外線分光観測が主に成層圏に相当する大気下層の気体分子を対象とする一方、紫外線分光観測によって、熱圏から外圏に至る高層大気に存在する原子・イオン種の検出が可能になる。これらの情報は、大気散逸過程や光化学反応、非熱的過程の理解において重要な観測的制約を与える。日本が構想を進めるLAPYUTAミッションは、こうした高層大気の探査に貢献する紫外線宇宙望遠鏡である。口径は60cmと小さいが、(HSTとは対照的に)地球のジオコロナの外に位置する軌道に投入することで、地上や低軌道からの観測よりもHIの観測が有利である。また、LAPYUTAの大きな特徴は、紫外線領域に特有の酸素(O I)吸収線を高感度で観測可能な点にあり、赤外線観測では難しい酸化的大気の探査に新たな観測的切り口を提供する。

さらに、紫外線～赤外線領域の大気分光とは補完的に、惑星磁気圏からの非熱的電波放射、特にオーロラ過程に伴う電波の検出が、惑星内部構造や磁場の有無を探る新たな手段として注目されている。こうした電波観測は、建設中の次世代の電波干渉計SKAにおける重要なサイエンスピックの一つであり、系外惑星の性質の理解を拡張するものとなる。

■ 多様な惑星系および太陽系の形成史の解明

今後10年にわたる系外惑星観測の進展により、惑星系の統計的性質が明らかになり、形成過程の理解も深化することが期待される。5.1節で述べた通り、これまで主に短周期のトランジット惑星が中心であった惑星探索は、PLATOやRomanなどによってより長周期の惑星に対象が広げられ、外縁部を含む惑星系全体の統計的特徴が明らかになる。とりわけ、太陽系のような広がりをもつ惑星系の出現頻度が今後の観測によって定量的に評価され、太陽系の形成史と比較惑星系学的な位置付けの理解が進む。

また、惑星分布と雪線位置との関連についても観測的検証が進むだろう。雪線近傍では、揮発性物質の凝縮が固体密度の上昇をもたらし、惑星形成が加速されるとされてきたが、これを統計的に実証するための十分な惑星サンプルがRomanによって蓄積される。これに対して、原始惑星系円盤に

おける雪線位置を観測的に決定する計画として、日本主導のGREX-PLUSが進められており、惑星系の形成初期段階と最終的な惑星配置を結びつける上で重要な情報をもたらすと期待される。

加えて、JWSTやArielといった赤外分光ミッションによって、大気中に含まれる H_2O 、 CO_2 、 CH_4 などの主要分子に関する系統的な情報が集積され、質量・半径・軌道周期といった従来の基本物理量に加えて、惑星がどのような場所で、どのような物質から、どのようなタイムスケールで形成されたのかを逆算するための新たな観測的制約を提供される。大気の化学的特性と軌道構造との相関は、惑星の移動履歴や原始惑星系円盤の進化とも深く関係しており、惑星形成過程の多様性とその物理的原理を明らかにする鍵となる。

一方、惑星形成の「現場」を直接とらえる観測も進展しており、形成過程に関する独立した制約をもたらしつつある。年齢が $\sim 5\text{Myr}$ と若いPDS 70系に代表されるように、原始惑星系円盤内でいままに集積中の巨大ガス惑星が直接撮像される例が増えることが期待される。今後、こうした観測がより中心星に近い領域にも及ぶようになれば、巨大ガス惑星の形成過程やタイムスケールに対する新たな制約が得られると期待される。特に、巨大惑星が形成される領域やその時期が惑星系全体の構造や進化履歴に大きな影響を与えることが知られており、惑星系の多様性の起源を解明する上で、こうした形成途上惑星の観測は極めて重要な鍵を握っている。

加えて、形成後間もない若い惑星系の特徴づけも、惑星形成過程を理解するうえで極めて重要である。近年は、南半球における大型地上望遠鏡の展開と高性能な撮像・分光装置の整備により、年齢が数千万年以下の若い恒星系において、惑星の直接撮像や分光による性質の把握が進展している。これにより、惑星形成後初期における質量、軌道、周囲のガスやダスト構造の詳細な把握が可能となり、形成メカニズムや成長スケールの検証に資する。

さらに、惑星形成直後から現在に至る進化過程においては、大気散逸が惑星のサイズ・組成に決定的な影響を及ぼすことが示されており、その代表例が半径谷 (radius valley) として知られる。とくに、 H/He を含む軽い大気を持つ小型惑星が、短時間スケールで大気を失う過程は、惑星の現在の観測特性に直結している。こうした進化の物理機構を明らかにするには、高層大気での流出過程を捉える観測が不可欠であり、日本が推進するLAPYUTAは、紫外線による H I や O I の吸収線を通じて、大気散逸の直接的な診断を可能とする点で極めて有効である。惑星形成・進化という一連の流れを理解するうえで、LAPYUTAは今後の重要な観測基盤となる。

一方、太陽系サンプルリターン (SR) 探査では、火星衛星 (MMX) や彗星、多様な型の小惑星などからの試料を持ち帰ることで、太陽系小天体の多様性と形成論的位置づけ、さらには太陽系物質進化の理解を深めることが期待される。また、はやぶさ2やOSIRIS-REx、さらに今後のSR探査で得られる帰還試料分析から得られる物質科学的情報をもとに赤外宇宙望遠鏡による太陽系外縁天体を含む小天体分光観測を進め、太陽系の物質分布マップの網羅範囲を広げつつ精密化して、太陽系形成・進化過程に制約を与えることが期待される。太陽系形成過程の実証という意味では、月も重要である。嫦娥5号の月サンプル分析から、彗星衝突を暗示する衝突溶融ガラスが見つかったという報告がなされている (Hu et al. 2025)。確かであれば、これからのアルテミス月探査サンプル採取により隕石重爆撃期の小惑星/彗星比を調査して、惑星大移動のモデルの検証や制約が可能となるかも知れない。

木星や土星に関しては、何よりもコアの大きさと、エンベロープ内での重元素の分布を明らかにすることが、巨大ガス惑星の形成過程を制約する上で極めて重要である。しかし、重力モーメントの高精度化による推定には限界があることも明らかになっている。この課題を克服するためには、まず第一に、第一原理計算や室内実験を通じて、超高压下における水素やヘリウムの状態方程式を精密に決

定することが不可欠である。これにより、内部構造モデルの不確定性を大幅に低減し、惑星形成理論の改良につながる事が期待される。一方、内部構造を「直接」探査する手法として、日震学を応用した木震学が期待されている。現在、国立天文台ハワイ観測所岡山分室188cm望遠鏡および仏米の1m望遠鏡を用いた、木星・土星表面自由振動の国際ネットワーク観測が進められており、その成果が待たれる。木星・土星内部での音波の伝播を捉えることができれば、重力場解析では得られない深部構造の情報が得られ、コアの性質や重元素分布の理解に大きく貢献するだろう。

特に土星については、リング(環)の特性を理解することが、形成過程や内部構造の理解にもつながると期待される。カッシーニ探査機後の土星環科学の中心課題は、(1)微細から大規模構造がどのような物理で維持・変動するか、(2)環がいつ・どのように生まれ、どのような時間尺度で暗化・拡散・落下して進化するか、(3)環を介して土星内部まで含む「円盤系」の普遍物理をどこまで検証できるか、に集約される。カッシーニ探査機のグランドフィナーレでは、重力・磁場の精密計測や環物質の大気流入(ring rain)の直接サンプリングが行われ、環質量や物質循環の制約が進んだ一方、隕石降着による非氷成分の汚染度と入射フラックスの不確かさが環年齢問題(古いのか若いのか)をなお支配している。このような状況の中、国際的には、自己重力ウェイクやプロペラ、密度波、スポーク等の階層構造を「粒子系+自己重力+衝突散逸」の観点で統一的に説明する理論・数値研究と、掩蔽観測・多波長観測で粒径分布・光学的厚み・組成を同時に制約する研究が進められている。加えて環震学(ring seismology)は、環の密度波を土星固有振動(主に f-mode など)の”地震計”として用い、内部成層やコア構造、回転の情報に迫る近年の潮流である。課題は、波の同定と励起・減衰機構、混合モードや時間変動の扱い、波源(衛星共鳴波)との分離であり、より高精度な波形カタログとモデル比較が鍵である。日本が検討するOPENS(OPENS-0)は、自己重力ウェイクやプロペラ、最大級粒子(~10 m)などを直接分解観測し得る計画で、土星環を”天然の円盤実験室”として原始惑星系円盤・銀河円盤に共通する輸送・不安定・凝集の物理を実測で検証する重要な一手である。さらに、環形成は巨大惑星に限られず、カリクロやハウメア、近年はカイロンにも存在し、小天体環へ理論枠組みを拡張することは、環の普遍性と多様性を同時に理解する上で不可欠である。

天王星・海王星については、未だVoyagerの情報しかなく、より精密な観測が不可欠である。そのため、NASAでは次期旗艦ミッションとして Uranus Orbiter and Probe (UOP) が計画されており、2030年代打ち上げ、2040年代に天王星到着を目指している。このミッションにより、天王星の内部構造や大気組成、衛星系の理解を飛躍的に向上することが期待される。

このような観測的制約の精緻化を受けて、理論側においても、惑星形成過程をより実在的に再現するための統合的なアプローチが求められている。従来は、微惑星の衝突成長あるいはペブルの集積成長といった、明確に分離された構造形成過程に基づいたシナリオが主に議論されてきた。しかし、実際の原始惑星系円盤内では、ミクロンサイズのダストから数百キロメートル級の微惑星に至るまで、広範囲にわたる固体のサイズ分布が常に共存・進化していると考えられる。このため、今後はダスト成長、凝縮、移動、集積、といった諸過程を一貫して追跡し、観測される惑星の分布や化学的性質と整合的な予測を導くことができる、大規模かつ統合的な数値シミュレーションの構築が不可欠となる。

■ ハビタブル環境の成立条件の解明

ハビタブル環境の成立条件を解明するための取り組みは、観測・惑星形成進化理論・気候モデリングの三つの側面から世界的に加速している。観測面では、M型星まわりの地球サイズの惑星を対象に、そもそも大気を保持しているのかどうかを確かめる試みがJWSTによって進められている。

TRAPPIST-1bのように大気がほとんどないことを示唆する結果も出ており、今後は類似する系のサンプルが増えることで、統計的な傾向が見えてくると期待される。JASMINEプロジェクトでは、中期M型星周りのトランジットハビタブル惑星候補の探査を予定しており、JWSTなどによる大気分光のターゲットの増加が期待される。さらに、特定の天体に対して観測時間を積み上げることにより、雲やヘイズの有無、主成分ガスの上限・下限、あるいは熱構造の手掛かりなど、より詳細な大気組成や構造に関する制約が現実的になりつつある。

理論面では、前節で述べたような惑星形成過程に関する制約が進むにつれて、ハビタブル惑星がどの程度の頻度で形成されるのか、またどのような揮発性元素を取り込むのかについて、より具体的な示唆が得られるようになると考えられる。円盤内での固体・ガスの分布や移動史、揮発性物質の惑星内部での分配や宇宙空間への散逸といった過程が体系的に扱われることで、初期条件や最終的な大気・水の量が推定され、観測解釈に対する事前情報として活用できることが期待される。

ハビタブル惑星の表層環境を扱う数値モデリングも着実に進化している。従来の大気大循環モデルに加えて、高解像度のモデルも導入され、雲や対流、降水といったサブグリッド現象の表現が改善されつつある。これにより、雲の分布や放射応答を含めた大気構造予測が精緻化し、観測で得られるスペクトルや時間変化といった指標との対応付けの信頼性が向上している。こうした進展は、海洋や陸地の分布、地形の効果を含む多様な表層条件が惑星の放射特性に与える影響を系統的に評価し、「海の有無」など表層環境の痕跡を観測から読み取るための指標開発にもつながる。

他方で、火山活動を通して惑星内部から噴出するガスが大気組成を変えてしまうなど、ハビタブル環境の変遷と維持のメカニズムについての調査は未だ手つかずに近い。米国・欧州と中国が計画している火星からのサンプルリターンは、こうした環境の変遷・維持の理解に決定的に重要である。Europa ClipperやJUICE、Dragonflyなどの氷衛星ミッションはハビタブル環境の直接の調査にはならないかも知れないが、ハビタブル環境に関わる基礎データを獲得することになるだろう。

このように、観測・理論・モデリングのそれぞれが相補的に発展することで、ハビタブル惑星の条件に関する理解が進み、より将来のハビタブル惑星の詳細観測の基盤が作られつつある。

■ 生命兆候の特定と観測的検出

JWSTやArielでは、今後も小型惑星の大気分光観測が試みられるが、トランジット確率の低さやシングルナルの弱さ、表層環境の診断困難などから、生命兆候の検出には限界がある。そのため、太陽系近傍のハビタブル惑星候補に対しては、直接撮像による反射光・熱放射の分光が有力視されている。

次世代の地上超大型望遠鏡(ELT、TMT)における透過光高分散分光・高コントラスト観測のほか、NASAでは2040年代の打ち上げを目指して、太陽型星のハビタブル惑星を反射光で系統的に探査する宇宙望遠鏡Habitable Worlds Observatory(HWO)の検討が進められている。酸素やメタン、亜酸化窒素などの気体分子や植生のレッドエッジなど反射スペクトルの特徴が重要なバイオシグニチャーとして調査対象となっており、反射特性を利用した海の検出も期待される[X]。さらに、熱放射の分光を可能にする宇宙赤外干渉計の構想も欧州を中心に検討されており、惑星温度への直接的な制限と、オゾンや二酸化炭素など赤外線で強い吸収帯を持つさまざまな分子の検出が期待される。また、建設が始まっている次世代センチ波メートル波望遠鏡 Square Kilometer Array (SKA) では、空港レー

ダーなどの漏洩を検知できると考えられており、知的生命探査 (SETI) の進展が期待されている。このように、生命兆候の検出に向けた多波長・多戦略の取り組みが本格化しつつある。

また、太陽系内惑星・衛星における生命探査の動きも活発化している。火星と氷衛星 (特に木星系衛星のエウロパや土星衛星のエンケラドス) がその重要な対象と考えられており、火星探査計画 ExoMars (ESA)、土星衛星タイタン離着陸探査 Dragonfly (NASA) などによる実地調査でその惑星の環境や生命の痕跡などの詳細なデータが得られることが期待されている。また、火星の地下水圏に現存生命を探す探査が提案されているが、技術的ハードルは高くまだ具体化はしていない。

§2.6.5 参考文献

- [1] Mayor, M. & Queloz, D. (1995), *Nature* 378, 355-359.
- [2] NASA Exoplanet Archive, California Institute of Technology, <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/index.html>
- [3] Batalha, N.M. (2014), *PNAS* 35, 12647.
- [4] Szab, Gy.M. & Kiss, L.L. (2011), *ApJL* 727, L44.
- [5] Fulton, B. et al. (2017), *AJ* 154, id.109.
- [6] Santos NC et al. (2004), *A&A* 415, 1153-66.
- [7] Mulders, G.D. et al. (2021), *ApJ* 920, 66.
- [8] Valencia, D. et al. (2010), *A&A* 516, A20.
- [9] Tinetti, G. et al. (2007), *Nature* 448, 169-171.
- [10] JWST Transiting Exoplanet Community Early Release Science Team, (2023), *Nature*, 614, 649.
- [11] Kawashima, Y. et al. (2019), *ApJL* 876, L5.
- [12] Ehrenreich, D. et al. (2015), *Nature* 522, 459-461.
- [13] Spake, J. et al. (2018), *Nature* 557, 68-70.
- [14] Waldmann, I.P. et al. (2015), *ApJ* 802, id.107.
- [15] Ikoma, M. & Kobayashi, H. (2025), *ARAA* 63, 217-258.
- [16] ALMA Partnership et al. (2015), *ApJL* 808, L3.
- [17] Johansen, A. & Lambrechts (2017), *AREPS* 45, 359-358.
- [18] Paardekooper, S. et al. (2023), Chapter 19 in *Protostars and Planets VII* (eds. S. Inutsuka et al.), *Astronomical Society of the Pacific*, p.685.
- [19] Burn, R. & Mordasini, C. (2025), in *Handbook of Exoplanets, 2nd Edition* (eds. H. Deeg and J.A. Belmonte), *Springer International Publishing AG*, in press.
- [20] Kasting, J. et al. (1993), *Icarus* 101, 108-128.
- [21] Borucki, W. (2016), *Rep. Prog. Phys.* 79, 036901.
- [22] Yang, J. et al. (2019), *ApJ* 875, 46.
- [23] Nakayama et al. (2022), *ApJ* 937, 72.
- [24] Glidden, A. et al. (2025), *ApJL* 990, L53.

- [25] Madhusudhan, N. et al. (2021), *ApJ* 918, 1.
- [26] Lovelock, J. E. (1960) , *Nature* 207, 568–570
- [27] Schwieterman, E. W., et al. (2018) *Astrobiology* 18(6), pp.663-708
- [28] Meadows, V. S., et al. (2018) *Astrobiology* 18(6) pp.630-662
- [29] Madhusudhan, N., et al, (2023) *ApJL* 956(1), id.L13
- [30] Suazo, M., et al. (2022) 512(2), pp.2988–3000
- [31] <https://science.nasa.gov/mission/tess/>
- [32] https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Plato
- [33] <https://science.nasa.gov/mission/roman-space-telescope/>
- [34] Andrews-Hanna C. J. et al. (2013), *Science* 339, 675-678
- [35] Borg, L. E., & Carlson, R. W. (2013), *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 51, 25–52
- [36] Nimmo, F. et al. (2024), *Nature*, 636, 598-602
- [37] Cui, Z., et al. (2024), *Science*, 386, 1395–1399
- [38] Dalton, J.B. et al. (2013), *Planet. Space Sci.* 357, 45-63
- [39] Carlson, R.W. et al. (1999), *Science* 286, 97-99
- [40] Hayes, A. G. et al. (2018), *Nat. Geosci.* 11, 306–313
- [41] McKay, D. S. et al. (1996), *Science* 273, 924–930
- [42] Hurowitz, J.A. et al. (2025), *Nature* 645, 332–340
- [43] Hu, H. et al. (2025) *Jour. Geophys. Res. Planet.*, 130, e2024JE008868

第三章 国立天文台の科学戦略

§3.1 SRM提案優先度の策定手順と結果

§3.1.1 提案の募集

SRMの策定に際し、科学戦略委員会ではSRMへの提案書を募集した。この募集に対し、42件の提案が集まった。それらの一覧を下表に示す(IDは提案順)。

国立天文台内の研究者が代表のものが28件、大学研究者が代表のものが11件、他の研究機関が代表のものが3件であった。

表3.1.2.0 SRMへ提案された研究計画一覧

ID	研究計画名	代表者	表3.1.2.1内の略称
1	Square Kilometre Array Phase 1	赤堀 卓也 (国立天文台)	ID01_SKA1
2	Advanced R&D hub for future GW detectors with TAMA300	麻生 洋一 (国立天文台)	ID02_TAMA300
3	光赤外線天文学研究教育ネットワーク事業	太田 耕司 (京都大学)	ID03_OISTER
4	大学VLBI連携	藤沢 健太 (山口大学)	ID04_大学VLBI連携
5	重力波望遠鏡KAGRAによる重力波天文学の推進	都丸 隆行 (国立天文台)	ID05_KAGRA
6	第3世代重力波望遠鏡(3G)	都丸 隆行 (国立天文台)	ID06_第3世代重力波望遠鏡
7	Ultra-Doppler - 地球の双子惑星を探索する超高精度ドップラー装置	田村 元秀 (東京大学/ABC/国立天文台)	ID07_Ultra-Doppler
9	次世代大型電波干渉計ngVLA	泉 拓磨 (国立天文台)	ID09_ngVLA
10	ダークユニバース宇宙論研究拠点	郡 和範 (国立天文台)	ID10_宇宙論研究拠点
11	国際滞在型天文学宇宙物理学研究会・スクールの拠点形成	郡 和範 (国立天文台)	ID11_国際滞在型研究会・スクール
12	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(LAPYUTA)計画	土屋 史紀 (東北大学)	ID12_LAPYUTA
13	30m光学赤外線望遠鏡計画TMT	臼田 知史 (国立天文台)	ID13_TMT
14	恒星系の深・広視野探査で拓く銀河系・局所銀河群の化学動力学進化	石垣 美歩 (国立天文台)	ID14_銀河化学動力学進化
15	銀河形成研究拠点: プロジェクト・分野横断研究に基づく新しい銀河形成研究の展開	大内 正己 (国立天文台)	ID15_銀河形成研究拠点
16	超精密フォーメーションフライト実証機SILVIA	和泉 究 (JAXA)	ID16_SILVIA
17	NASA Habitable Worlds Observatoryへの参加	住 貴宏 (大阪大学)	ID17_HWO
18	系外惑星研究拠点形成	生駒 大洋 (国立天文台)	ID18_系外惑星研究拠点
19	電波・赤外線観測と理論に基づく星惑星形成領域から惑星系への進化の解明	野村 英子 (国立天文台)	ID19_星惑星形成研究
20	サブミリ波望遠鏡ASTEでの広域/広帯域観測に基づく天体形成・構造形成の研究	河野 孝太郎 (東京大学)	ID20_ASTE

21	宇宙と生命の起源を探究する大型ミリ波サブミリ波望遠鏡アルマ2計画	深川 美里、井口 聖 (国立天文台)	ID21_アルマ2
22	すばる望遠鏡の安定運用と機能向上:「すばる2」から「すばる3」へ	宮崎 聡 (国立天文台)	ID22_すばる2-3
23	マルチメッセンジャー天文学連携拠点	富永 望 (国立天文台)	ID23_MMA拠点
24	次世代シミュレーションで探る天体の構造と起源	小久保 英一郎 (国立天文台)	ID24_CfCA
25	遠赤外線テラヘルツ干渉計による天体の形成と進化の解明	松尾 宏 (国立天文台)	ID25_遠赤外線テラヘルツ干渉計
26	赤外線位置天文観測衛星JASMINE	鹿野 良平 (国立天文台)	ID26_JASMINE
27	大規模広視野観測検討グループの構築	内海 洋輔、古澤 久徳 (国立天文台)	ID27_大規模広視野
28	宇宙望遠鏡と地上望遠鏡の協調観測による系外惑星のキャラクタリゼーション	小谷 隆行 (ABC)	ID28_系外惑星特徴付け
29	超精密分光観測による天文学	佐藤 文衛 (東京科学大学)	ID29_超精密分光観測
30	LST/AtLAST計画推進とサブミリ波多次元掃天観測による天体・構造形成の研究	河野 孝太郎 (東京大学)	ID30_LST/AtLAST
31	Exoplanet Imaging and Characterization with Subaru SCEAO and TMT-PSI	Olivier Guyon (国立天文台)	ID31_SCEAO
32	岡山光赤外望遠鏡群を中心とした時間軸天文学・人材育成・国際連携の拠点構築	田實晃人 (国立天文台)	ID32_岡山光赤外望遠鏡群
33	野辺山45m鏡を用いた次世代技術開発とミリ波大口径アンテナによる天文学	西村 淳 (国立天文台)	ID33_野辺山45m鏡
34	赤外線宇宙望遠鏡GREX-PLUS	井上 昭雄 (早稲田大学)	ID34_GREX-PLUS
35	月面天文台TSUKUYOMI	井口 聖 (国立天文台)	ID35_TSUKUYOMI
36	南極30mテラヘルツ望遠鏡計画	久野 成夫 (筑波大学)	ID36_南極30mテラヘルツ望遠鏡
37	太陽フレアX線集光撮像分光観測計画	成影 典之 (国立天文台)	ID37_太陽フレアX線集光撮像分光
38	高感度太陽紫外線分光観測衛星SOLAR-C	清水 敏文 (JAXA)	ID38_SOLAR-C
39	大型宇宙光学赤外線望遠鏡	松田有一 (国立天文台)	ID39_大型宇宙光学赤外線望遠鏡
40	太陽活動の継続的観測: ひので衛星、三鷹地上観測、さらに将来観測への布石	勝川 行雄 (国立天文台)	ID40_太陽活動の継続的観測
41	東アジアおよびグローバルVLBIの推進とその最高分解能を生かした観測研究	本間 希樹 (国立天文台)	ID41_東アジア・グローバルVLBI
42	太陽系内小天体探査計画における惑星測地学の推進: MMXとはやぶさ2拡張ミッション	松本 晃治 (国立天文台)	ID42_惑星測地学
43	すばるHSC-MB+PFSサーベイ: 高赤方偏移における大規模構造の探査	宮武 広直 (名古屋大学)	ID43_すばるHSC-MB+PFSサーベイ

§3.1.2 提案の評価

各提案の内容は、SRM委員会委員会で、提案書およびその後のヒアリング（各提案に対して1時間）によって確認した。その上で、各提案を以下の観点から評価を行った。SRMの策定においては(a)-(d)の項目を特に重視し、各提案を科学分野ごとの世界的動向(§2)の中に位置付けながら評価した。

提案書の評価基準

- (a) 科学的意義が明確か
- (b) 国立天文台で実施する必然性があるか/施設を活かしているか
- (c) 国際的な競争力があるか
- (d) 次世代研究者の育成に資するか
- (e) 技術的な準備ができていますか
- (f) 必要な予算・人材リソースが把握できているか
- (g) 次期中期計画期間において実施しようとする内容が明確か

また、提案の規模、天文台の役割(プロジェクトの設置、ATCを中心とした技術やスペースの提供など)、他機関と関係などは実にさまざまであり、それぞれの立ち位置を見やすくするため、プロジェクトの規模や質に応じて以下のように分類することにした。

提案書の分類

(i) 地上望遠鏡プロジェクトの提案

:地上に設置する望遠鏡などの観測施設のプロジェクトで、国立天文台が主導するもの、あるいは他機関が主導するものに国立天文台が協力する提案両方を含む。想定される規模は現行の1天文台プロジェクト程度である。

(ii) 宇宙望遠鏡・探査機プロジェクトへの協力の提案

:原則としてJAXAが主導する宇宙機プロジェクトに国立天文台が協力する提案である。

(iii) その他の国立天文台内組織の提案

:上記以外で、国立天文台に組織を設置する提案である。想定される規模は現行の1天文台プロジェクト程度、もしくはプロジェクト・センター内の1つの目標になるものである。

(iv) 国立天文台の設備を利用する提案

:国立天文台に組織を設置するものではなく、主として個人やスペース、技術を天文台に期待する提案である。プロジェクト・センター内の科学目標となりうるものも含まれる。

(i)-(iii)については、上記(a)-(g)の観点での評価に基づき、優先度を以下の三段階に分けた。(iv)については、委員会として個別の科学的重要性について一定の評価はする一方で、優先度の段階分けはつけないこととした。この分類に属するのは、国立天文台の大型望遠鏡の将来計画に関わる提案や、外部資金を主な資金源として国立天文台の設備利用を主とする提案となっており、その実現は、各望遠鏡のユーザーコミュニティからのさまざまな提案¹の中での相対的な重要性、あるいは外部資金の獲得状況に大きく依存すると考えられるからである。

¹ 今回のSRMへの提案書のスコープに曖昧さがあったため、各望遠鏡の将来計画に関わる提案がすべてSRMに提案されたとは限らないことに留意した。

提案書の優先度の3段階

レベル1「国立天文台で実施する提案としての優先度が極めて高い」

レベル2「国立天文台で実施する提案としての優先度が高い」

レベル3「国立天文台で実施するには更なる検討が必要」

これら各レベルの第5期中期計画の実施計画策定に際しての位置付けは、以下のとおりである。レベル1の提案は、第5期中期計画の実施計画において、国立天文台のプロジェクト、あるいはプロジェクトやセンター内の科学目標として実施することを強く推奨する。ただし、実施計画の策定においては、計画性や実現可能性、リソース等をより詳細に検討するなど、新たな評価項目が加わるため、必ずしも実施計画に盛り込まれるとは限らない。実施計画に盛り込まれない場合は、その理由が説明されることが求められる。レベル2の提案は、他機関との協定、相対的な重要性、リソース状況などに応じて、実施計画への盛り込まれ方が決まる。

上記の優先度の3段階の割り当ては、以下のような基準で決定した。

提案の優先度の選定基準

- ・実現可能性が著しく低いもの、科学検討や実施体制の検討が著しく不十分なもの、あるいは「(b) 国立天文台で実施する必然性があるか/施設を活かしているか」の評価が低いものについては、レベル3とする。
- ・「(a) 科学的意義が明確か」「(c) 国際的な競争力があるか」「(d) 次世代研究者の育成に資するか」の観点で特に評価が高いものを、レベル1の候補とする。
- ・計画性、実現可能性を「(e) 技術的な準備ができているか」「(f) 必要な予算・人材リソースが把握できているか」「(g) 次期中期計画期間において実施しようとする内容が明確か」の評価から判断する。低評価なものについてはレベル1にしない可能性がある。
- ・他機関との協定が締結され実行されているものもあるが、SRMにおいてはそういった周囲の条件とは独立に、科学的意義や将来性に関して評価を行うこととした。これらの条件は実施計画策定時に考慮され、実施計画に反映される。

§3.1.3 提案の優先度

最終的な各分類における優先度を表3.1.2.1に示す。

表3.1.2.1 提案の優先度 (青字は現行の国立天文台プロジェクト)

	プロジェクトの規模や質で分類			
	地上望遠鏡プロジェクトの提案	宇宙望遠鏡・探査機プロジェクト(原則としてJAXA主導)への協力の提案	その他の国立天文台内組織の提案	国立天文台の設備を利用する提案
優先度が極めて高い	ID05_KAGRA ² ID13_TMT ID21_アルマ2 ID22_すばる2-3 ID20_ASTE ID01_SKA1 ID09_ngVLA	ID26_JASMINE ID38_SOLAR-C ID17_NASA HWO	ID24_CfCA ID23_MMA拠点	ID07_Ultra-Doppler ID14_銀河化学動力学進化 ID29_超精密分光観測 ID31_すばる SCEXAO and TMT-PSI ID28_系外惑星特徴付け
優先度が高い	ID02_TAMA300 ² ID03_OISTER ID04_大学VLBI連携 ID06_第3世代重力波望遠鏡 ² ID32_岡山光赤外望遠鏡群 ID33_野辺山45m鏡 ID40_太陽活動の継続的観測 ID41_東アジア・グローバルVLBI ID30_LST/AtLAST計画	ID42_惑星測地学 ID12_LAPYUTA ID16_SILVIA ID34_GREX-PLUS ID35_TSUKUYOMI ID37_太陽フレアX線集光撮像分光	ID10_宇宙論研究拠点 ID11_国際滞在型研究会・スクール ID15_銀河形成研究拠点 ID18_系外惑星研究拠点 ID19_星惑星形成研究 ID27_大規模広視野	ID43_すばるHSC-MB+PFSサーベイ
さらなる検討を要する	ID25_遠赤外線テラヘルツ干渉計 ID36_南極30mテラヘルツ望遠鏡	ID39_大型宇宙光学赤外線望遠鏡		

地上望遠鏡プロジェクトの提案

共同利用のための地上大型望遠鏡の運用・維持は、国立天文台の中心的な責務である。この中で、国立天文台主導の大規模学術フロンティア促進事業のプロジェクト(以下、フロンティアプロジェクト)である、すばる望遠鏡、アルマ望遠鏡、30メートル望遠鏡(TMT)は、科学的意義、国立天文台で実施する必然性、国際競争力、次世代育成への貢献のいずれにおいても高く評価され、第5期中期計画においても最優先で実施することが相応しい。

また、現行の運交金プロジェクトの中で、アルマ望遠鏡との補完的なパラメータスペースを探索する

² これらの提案を統合することを推奨する。

単一鏡型電波望遠鏡ASTEが、意義や天文台で行う必然性が高く評価された。

将来のフロンティアプロジェクトの候補として検討が進んでいる電波干渉計計画SKA, ngVLAは、科学的意義あるいは国際競争力が高く、次世代育成にも寄与するとして、優先度が特に高いと判断された。すでにコミュニティからの支持を広く集めており、コミュニティとのさらなる連携のもと、国立天文台の関わり方や実現可能な実施計画を整理することが期待される。

また、重力波観測の技術開発の重要性についても高く評価された。今回の提案書募集の経緯により、重力波に関するプロジェクトは3件に分けて提案されたが(ID02_TAMA300, ID05_KAGRA, ID06_第3世代重力波望遠鏡)、これらを統合し、一体として次世代重力波望遠鏡に向けた技術も含めた開発を進める提案とすることが推奨された。

一方、国立天文台の限られた人的・資金的リソースでこれらの計画を実際に進める上での課題も指摘されている。光赤外分野においては、すばる望遠鏡運用に必要なリソースを現在のレベルで維持したまま並行してTMTを推進することは難しく、TMTとすばる望遠鏡との間でのリソース最適化戦略の策定が急務である。また、電波分野においては、SKA、ngVLA、LST/AtLASTといった超大型プロジェクトの将来計画の準備・実施と現行のアルマ望遠鏡や各種電波望遠鏡の共存戦略を具体化する必要がある。プロジェクトの移行や統合といった可能性、あるいはリソース自体を増やす方策などを検討し、現実的かつ包括的な将来計画を打ち出す必要がある。

宇宙望遠鏡・探査機プロジェクト(原則としてJAXA主導)への協力の提案

国立天文台は、宇宙航空研究開発機構(JAXA)との連携のもと、宇宙望遠鏡・探査機プロジェクトもさまざまな形で推進している。現在国立天文台プロジェクトとなっている宇宙望遠鏡計画SOLAR-CとJASMINEは、その科学的意義や国際競争力が高く評価され、継続的に推進していくことが望ましい。また、2040年代打ち上げを目指すNASAの宇宙望遠鏡計画HWOについても、科学的意義や国際競争力、および国立天文台がその中で果たしうる役割が高く評価された。ただし、国立天文台の貢献規模は未定であり、JAXAとの役割分担を明確にし、国立天文台での実施内容の具体化が求められる。

その他の国立天文台内組織の提案

現行の国立天文台プロジェクトCfCAは、シミュレーション天文学における科学的成果創出の基盤の一つとなり、次世代育成にも大きく貢献している。シミュレーション天文学の持続的な発展のために、研究者のニーズに合った計算機資源の確保は重要である。その体制(プロジェクトかセンターか)、あるいは他機関との共同運用の可能性といった観点から、長期的な計算機資源の確保のあり方のさらなる検討が求められる。

また、新規のプロジェクトとして、複数の観測手段、あるいは理論研究を繋ぐ研究拠点や基盤の整備が提案された。その中で、マルチメッセンジャー観測を電磁波の面から支える基盤の整備は、国立天文台の体制やデータの整備によってコミュニティの科学的成果の促進を目指すことから、国立天文台で実施する意義について特に高く評価された。国立天文台の機能向上の新たな指針の候補として、具体的な実施体制についての検討が期待される。

その他の提案については、多角的な観測や理論研究を横断する研究体制の意義は評価されており、科学研究部が中心となり、目的に応じた体制を構築していくことが期待される。

国立天文台の設備を利用する提案

本分類には、すばる望遠鏡(そして岡山の望遠鏡群)に装置を設置・運用し、新しい科学目標を達成しようとする提案が入っている。これらの提案はいずれも明確な科学目標を掲げており、実現すれば国際競争力を持つと期待される。「すばる3」の方向性を決める上で重要な提案である。

§3.2 分野ごとの科学戦略

表1 宇宙論の目標と手法一覧

目標	課題	手法(波長・特色)	第5期中期計画における対応プロジェクト	開始時期
宇宙の誕生と進化の解明	宇宙論観測を精密に測定し、観測と理論の比較から、宇宙標準理論 Λ CDMを検証する。ニュートリノ質量の制限	広天域銀河イメージング・分光サーベイ (21cmサーベイを含む)	(成果)すばる、広天域宇宙観測、 (建設) (検討) SKA	すばる LSST (2026-) Roman (2026-) SKA (203X-)
		超新星標準光源	(成果) Roman、広天域宇宙観測 (建設) (検討)	LSST (2026-) Roman (2026-)
		重力波標準サイレン	(成果) KAGRA (建設) (検討) 第三世代重力波	KAGRA Einstein Telescope (2036)
	宇宙誕生(インフレーション)の検証	背景原始重力波の検出	(成果) KAGRA (建設) (検討) SKA, 第三世代重力波	KAGRA SKA (203X-) Einstein Telescope (2036)
宇宙を構成する基本的な要素の解明	ダークマターの性質の解明	重力マイクロレンズ効果	(成果) すばる、広天域宇宙観測 (建設) JASMINE (検討) SKA	すばる LSST Roman (2026-) JASMINE SKA (203X-)
		ダークマター崩壊・対消滅に伴う未同定輝線の探査。ライマン α 吸収線および21cmの小スケールのパワースペクトル	(成果) すばる (建設) TMT (検討) SKA	すばる TMT-MODHIS SKA (203X-)
	ダークエネルギーの性質の解明	広天域銀河分光観測によるBAO	(成果)すばるPFS、広天域宇宙観測 (建設) (検討) SKA	すばるPFS Roman (2026-) SKA (203X-)
		超新星標準光源。標準重力波サイレン。加速膨張の直接測定	(成果) 広天域宇宙観測、KAGRA (建設) (検討) 第三世代重力波	LSST Roman (2026-) KAGRA Einstein Telescope (2036)
		加速膨張の直接測定	(成果) (建設) (建設) TMT	TMT-MODHIS
自然の実験場として新しい物理学を探る	宇宙論スケールでの修正重力の観測的検証	広天域銀河サーベイ	(成果) すばる、広天域宇宙観測 (建設) (検討) SKA	すばる LSST Roman (2026-) SKA (203X-)
	インフレーションの物理(曲率、原始ゆらぎのパワースペクトルの形状、原始非ガウス性)の探査	広天域銀河サーベイ	(成果) すばる、広天域宇宙観測 (建設) (検討) SKA	すばる LSST Roman (2026-) SKA (203X-)
	微細構造定数の変化	超精密分光観測、大統計分光観測	(成果) すばる、アルマ望遠鏡 (建設) TMT, アルマ2 (検討) SKA, ngVLA	すばるPFS TMT-MODHIS SKA (203X-)

表2 「銀河形成と宇宙進化」の科学目標と手法一覧

大目標	課題	手法(波長・特色)	第5期中期計画における対応プロジェクト	開始時期
銀河形成史の解明	初代星・初代銀河の検出と物理的性質の解明	近赤外線・中間赤外線での高感度広視野探査	(成果) JWST, Euclid, Roman, ULTIMATE-Subaru (建設) (検討) GREX-Plus	Euclid DR2 2029 Roman 2027 ULTIMATE-Subaru 2028
		近赤外線・中間赤外線での高感度・高空間分解能分光 サブミリ波高感度分光	(成果) JWST (建設) TMT-IRIS, アルマ2 (検討) ngVLA, LST/AtLAST	ELT 2028? アルマ2 2033 TMT-IRIS 2035
		近赤外線アストロメトリと可視赤外線高分散分光による銀河系バルジ領域の探査	(成果) Roman, ULTIMATE-Subaru (建設) JASMINE (検討) TMT-HROS, GREX-Plus	ULTIMATE-Subaru 2028 JASMINE 2031
		重力波を用いた初代星への制限	(成果) (建設) (検討) 第三世代重力波 (Einstein Telescope)	Einstein Telescope 2036
	現在の銀河への力学、化学の進化過程の理解	サブミリ波広帯域分光によるダストに隠された大質量銀河形成過程の解明	(成果) アルマ望遠鏡, ASTE-TIFUUN (建設) アルマ2 (検討) LST/AtLAST	ASTE-TIFUUN 2028 アルマ2 2033
		静止系遠赤外線によるダストに隠された大質量銀河の探査	(成果) アルマ望遠鏡 (建設) アルマ2 (検討) LST/AtLAST, ATT30, ngVLA	アルマ2 2033
		赤外線面分光観測による銀河力学・化学構造の進化	(成果) (建設) TMT-IRIS (検討)	TMT-IRIS 2035
超巨大ブラックホールの起源の解明	超巨大ブラックホールの種の解明	近赤外線での高感度広視野探査と分光追求観測	(成果) Roman (建設) TMT-IRIS (検討)	Roman 2027 TMT-IRIS 2035
	隠された超巨大ブラックホールの成長過程の解明	中間赤外線での高感度広視野探査と分光追求観測	(成果) JWST (建設) (検討) PRIMA	
		ミリ波サブミリ波での高解像度分光撮像観測	(成果) アルマ望遠鏡 (建設) アルマ2 (検討) ngVLA	アルマ2 2033
	合体による超巨大ブラックホール成長過程の解明	重力波による超大質量ブラックホール合体現象の統計	(成果) (建設) SKA (検討) LISA, ngVLA	LISA 2036
銀河-銀河間物質の進化の理解	大規模構造の確立とそれに連動した銀河の進化過程	可視光および電波での吸収線探査による銀河周辺物質の検出	(成果) すばるPFS, アルマ望遠鏡 (建設) TMT-WFOS, LOPYUTA, アルマ2, SKA (検討) ngVLA	すばるPFS DR 202X TMT-WFOS 2035 LOPYUTA 2035 SKA 203X
		大規模分光探査による銀河大規模構造の検出と銀河進化の解明	(成果) すばるPFS, ULTIMATE-Subaru (建設) SKA (検討)	すばるPFS DR 202X ULTIMATE-Subaru 2028 SKA 203X
		電波広視野分光によるガス輝線の宇宙初期の大規模構造探査	(成果) SKA1-LOW (建設) (検討) LST/AtLAST, ATT30, ngVLA	
	再電離源の特定	静止系紫外線観測による電離光子脱出過程の解明	(成果) (建設) TMT-WFOS, LOPYUTA (検討) HWO	LOPYUTA 2035 TMT-WFOS 2035
	電離バブルの検出	再電離期の中性水素21cm線観測および銀河種族との相関解析	(成果) SKA1-LOW (建設) (検討) TSUKUYOMI, LST/AtLAST	HSC-MB 2026 SKA1-LOW 2031

表3 「高密度天体・極限物理・マルチメッセンジャー天文学」の科学目標と手法一覧

大目標	課題	手法(波長・特色)	第5期中期計画における対応プロジェクト	開始時期
突発天体のマルチメッセンジャー観測による恒星進化の全貌解明と極限物理の探求	地上干渉計による重力波天文学の推進	重力波・地上干渉計	(成果) KAGRA (建設) Einstein Telescope (検討) KAGRA-HF	KAGRA-HF 2030年代前半 Einstein Telescope 2036
	高速電波バーストの起源解明と宇宙論研究	電波サーベイ	(成果) JVN, VERA, 東アジアおよびグローバルVLBI (建設) SKA (検討) ngVLA	SKA 2031
	追観測による時間領域天文学の推進	波長を問わず、迅速な追観測が可能にさせる柔軟な運用	(成果) すばる, TAO, せいめい他国内可視赤外望遠鏡, アルマ望遠鏡, ASTE, JVN, VERA, 東アジアおよびグローバルVLBI (建設) アルマ2, TMT (検討) ngVLA, LST/AtLAST, LAPYUTA	TMT 2035 LST LAPYUTA
巨大ブラックホールの起源と進化の解明	高角分解能観測によるブラックホール周辺現象の観測	電波VLBI	(成果) 東アジアおよびグローバルVLBI (建設) (検討) ngVLA	
	ブラックホールへのガス供給メカニズムの解明	可視赤外、電波	(成果) ASTE、アルマ望遠鏡 (建設) アルマ2, JASMINE (検討) ngVLA	JASMINE 2031
宇宙における元素の起源と進化の解明	銀河考古学による元素組成進化の解明	可視赤外分光観測・位置天文観測	(成果) すばる, せいめい (建設) TMT, JASMINE (検討)	TMT 2035 JASMINE 2031

表4 「太陽と星」の科学目標と手法一覧

大目標	課題	手法(波長・特色)	第5期中期計画における対応プロジェクト	開始時期
太陽大気加熱	彩層・コロナの加熱機構の理解 太陽風加速機構の理解	可視光 極端紫外線	(成果) ひので可視光望遠鏡 (建設) (検討)	
			(成果) Solar-C_EUVST (建設) (検討)	Solar-C_EUVST 2018
太陽フレア爆発	磁気リコネクションの物理の理解	極端紫外線	(成果) Solar-C_EUVST (建設) (検討)	Solar-C_EUVST 2018
	磁気リコネクションによる粒子加速・加熱過程の理解	X線	(成果) FOXSI (建設) PhoeNiX (検討)	PhoeNiX
長周期変動	太陽の10年以上の長期変動のデータ蓄積	可視光、H α 線	(成果) ひので可視光望遠鏡、三鷹地上望遠鏡	

表5 「星惑星形成」の科学目標と手法一覧

大目標	課題	手法(波長・特色)	第5期中期計画における対応プロジェクト	開始時期
星・惑星系の形成過程とその多様性の解明	原始惑星系円盤の構造の多様性	センチ波～サブミリ波・高解像度分光撮像	(成果) アルマ望遠鏡 (建設) アルマ2, SKA-mid (検討) ngVLA	SKA 2031 ngVLA 2041
		赤外線・高分散分光によるsnow lineの検出	(成果) (建設) (検討) GREX-PLUS	GREX-PLUS
	大質量星形成過程の動的多様性	センチ波・メーザー高解像度分光撮像	(成果) JVN, 東アジアおよびグローバルVLBI (建設) (検討) ngVLA/LBA	
	星形成の環境効果	21cm線・ミリ波サブミリ波スペクトル線・広域分光撮像	(成果) NRO, ASTE (建設) SKA-mid (検討) ngVLA, LST/AtLAST, ATT30m	ngVLA 2041 LST/AtLAST 2040年代 ATT30m 2040年代
	低質量原始星・若い星団の探査	観測(近赤外線・広域撮像)	(成果) すばる2 (建設) すばる3 (検討)	すばる3 2032
	星惑星系形成の多様性の物理モデルとしての理解	理論	(成果) CfCA (建設) (検討)	
惑星系に至る物質進化とその多様性の解明	星形成領域から原始惑星系円盤に至る分子分布の進化	センチ波～サブミリ波・個別天体の高解像度分光撮像	(成果) アルマ望遠鏡 (建設) アルマ2, SKA-mid (検討) ngVLA	SKA 2031 ngVLA 2041
		ミリ波サブミリ波・広域分光撮像探査	(成果) NRO, ASTE (建設) (検討) LST/AtLAST, ATT30m	LST/AtLAST 2040年代 ATT30m 2024年代
	地球質量規模の惑星やその形成環境の探査	近赤外線・高分散分光	(成果)すばる2 (建設) すばる3, TMT	すばる3 2032 TMT 2035
	分子組成進化と惑星系の居住環境の関係	理論	(成果) CfCA	

表6 「惑星系と宇宙における生命」の科学目標と手法一覧

大目標)	課題	手法(波長・特色)	第5期中期計画における対応プロジェクト	開始時期
惑星の性質の多様性の体系的理解	光球面付近の大気構造の理解	可視～赤外線領域での大気分光	(成果) Ariel(中分散分光) (成果) すばる望遠鏡/IRD, REACH, new instrument(高分散分光・高コントラスト観測) (建設) TMT/MODHIS	2029~ TMT 2035
	惑星の大気散逸の理解	紫外-近赤外線での惑星大気透過光高分散分光	(成果) すばる望遠鏡/IRD (建設) LOPYUTA	一部運用中
	多様な惑星の大気構造モデル	理論	(成果) CfCA	
多様な惑星系の形成過程の解明	若い惑星の形成中～直後の構造の理解	近赤外線での高コントラスト観測	(成果) すばる望遠鏡/SCEXAO	運用中
	惑星形成環境と最終的な惑星状態の対応付け	理論	(成果) CfCA	
	原始惑星系円盤の構造	可視～電波領域での高空間分解能観測	(成果) アルマ望遠鏡, すばる望遠鏡-SCEXAO	運用中
太陽系形成史の解明	火星衛星の起源の理解	実地調査	(成果) MMX	
	始原的な小惑星の性質の理解	実地調査	(成果) Hayabusa #2	
ハビタブル環境の成立条件の解明・生命探査	生命探査に適したターゲットの検出	可視～近赤外線でのサーベイ	(成果) すばる/IRD (建設) すばる望遠鏡/UltraDoppler(視線速度法) (建設) JASMINE(トランジット法)	2030年代
	生命探査に適したターゲットの分光	可視～中間赤外線での高コントラスト観測	(検討) TMT/PSI	TMT 2035
	ハビタブル惑星の表層環境モデル	理論	(成果) CfCA	運用中

§3.2.1 宇宙論

宇宙の誕生から進化、そしてその未来を天文学・物理学および観測データで科学的に解明することを目指すのが、宇宙論の研究である。すばる望遠鏡の主焦点広視野カメラHyper Suprime-Cam (HSC)の開発と、そのデータを活用した多様な研究成果によって、日本主導のデータに基づく観測的宇宙論の研究が飛躍的に発展した。15年以上にわたる開発を経て、主焦点多天体分光装置 Prime Focus Spectrograph (PFS) が遂に完成し、その大規模な宇宙分光サーベイが始まったところである。第5期中期計画期間においては、PFSの分光データおよびHSCのイメージングデータを組み合わせることによって新たな宇宙論的成果が創出され、日本主導の観測的宇宙論がさらなる発展を遂げることが期待される。

宇宙論の研究は本質的に広天域の宇宙データを用いて進められるため、必然的に国際的かつ多波長のサーベイとの協奏的な研究が展開される。日本の国際的優位性を一層強化するためには、すばる望遠鏡の独自性を最大限に活かし、戦略的かつ継続的な国際共同研究を推進していくことが求められる。例えば、すでにすばると欧米の究極的な宇宙論サーベイのEuclid宇宙望遠鏡、LSST、

Roman宇宙望遠鏡との共同研究が始動しており、今後はSKAや宇宙マイクロ波背景放射(CMB)サーベイとの連携・共同研究の可能性についても検討を進めることが望まれる。

さらに、TMTによる超高精度分光観測により、宇宙の加速膨張の直接測定や、微細構造定数の時間的・空間的变化といった基礎物理に関する研究を推進することも重要である。

宇宙論の研究は、理論と観測を両輪として発展してきた。多角的な発想や新たな手法を開発し、多様な宇宙データから宇宙の基礎物理を探る研究アプローチを推進することも重要である。例えば、インフレーションの物理、背景原始重力波の探索、ダークマターの解明などについては、天文学のみならず、理論・実験を含む物理学とも関連するので、学際的な研究分野として新たな展開も期待される。

以下では、国立天文台が関与しているプロジェクトに絞って記述する。

■ 宇宙の誕生と進化の解明

現在の宇宙の標準理論では、宇宙はインフレーションと呼ばれる急激な加速膨張で「誕生」し、その終焉後、光子、ニュートリノ、バリオン(通常の物質)、ダークマターを主要な構成要素とする「熱いビッグバン宇宙」が始まった。その後、約138億年にわたる膨張の宇宙史のなかで、主としてダークマターの重力により駆動される重力不安定性を通じて様々な宇宙構造が形成され、さらに約70億年前からは、正体不明のダークエネルギーの作用により、宇宙は再び加速膨張の段階に入っている。これが、宇宙の標準理論 Λ CDMモデルである。この Λ CDMモデルは、CMBを代表とする様々な宇宙論データを無矛盾に説明することに成功している。宇宙の誕生から現在に至るまでの進化、さらには宇宙の未来を、理論と観測データの両面から科学的に解明することを目的とする研究は、宇宙論の主要な分野の一つである。

まず、宇宙の進化、特に宇宙の構造形成の研究については、線形段階にある長波長スケールのゆらぎの時間進化は、宇宙論的摂動論により解析的かつ高精度に予言できる。さらに、小スケールで非線形段階に入った構造形成の時間進化および統計的特性についても、宇宙論的シミュレーションを用いることで予言が可能である。138億年の宇宙史における各時代の宇宙像を映し出す CMB、銀河サーベイ、21cm(中性水素)データを理論と比較することで、 Λ CDM を多角的かつ徹底的に検証することができる。 Λ CDM モデルの宇宙論パラメータを高精度に求めることは、モデルの精緻化に直結する。ビッグバン熱的宇宙の名残であるニュートリノも Λ CDMモデルの重要な構成要素であり、ニュートリノ質量の制限も標準理論の検証の一部である。一方で、異なる観測データ間で Λ CDM と整合しない不一致が見つければ、 Λ CDM の不完全性、すなわち標準理論を超える新たな物理、を間接的に検出したことになる。現在活発な議論がされている「 H_0 不一致問題」、「 σ_8 不一致問題」などは、その兆候である可能性がある。

観測量としては、広天域の銀河イメージング・分光サーベイや 21 cm サーベイに基づく宇宙論的弱重力レンズ効果、銀河クラスタリング統計量、中性水素のクラスタリング統計量、CMB偏光、背景原始重力波などが挙げられる。さらに、Ia型超新星による標準光源に加え、将来的には重力波標準サイレン(standard siren)も有力な距離指標となる。加えて、CMB と銀河サーベイなど、後期宇宙の多波長観測を統合するマルチプローブ解析も有効である。

宇宙はどうやって生まれたのか？宇宙の誕生を科学的に探ることは、人類の誰もが一度は抱く根源的な問いに直結する、究極の研究テーマである。現代宇宙論の立場からは、これはインフレーション

ンの物理を解明することに他ならない。代表的な手法は、CMBの温度および偏光の角度異方性である。特に「Bモード」偏光の検出は、量子ゆらぎを伴うインフレーションが実際に起こったことを示す証拠となると考えられており、極めて重要である。同様の理由で、重力波望遠鏡(あるいはテーブルトップ干渉計を用いた実験)や、電波望遠鏡を用いたパルサータイミングアレイによる背景原始重力波の探索も重要である。

■ 宇宙を構成する基本的な要素の解明

上述のとおり、宇宙の標準理論 Λ CDM を構成する主要成分であるダークマターとダークエネルギー、いわゆる「宇宙のダーク成分」の正体は依然として不明である。宇宙のダーク成分の解明は宇宙物理学、物理学の最重要課題の一つである。

ダークマターの探査については、これまで素粒子物理学の要請に基づき、約2桁の質量範囲のWIMPパラダイムに研究が集中してきた。しかし、LHCに代表される加速器実験においても、WIMP候補はこれまで発見されていない。このため、質量で約 90 桁に及ぶ広範な領域を対象とする、WIMP 以外のダークマター候補の探索の重要性が改めて認識されている。具体的な候補として、波の性質をもつ超軽量ダークマター、電波・可視光・赤外線の波長帯に対応する質量スケールのダークマター、あるいは宇宙初期に生成された可能性がある原始ブラックホールなどがあり、宇宙観測によって探索可能である。一方で、従来のWIMPシナリオの間接的検証手法の高度化も並行して進められている。以上の理由から、さまざまな宇宙観測データを用い、多様なアイデアと手法を駆使してダークマターを探索することが重要である。手法としては、重力マイクロレンズ効果を用いた方法や、未同定の輝線・吸収線の探査、WIMP対消滅により生成される荷電粒子起源のシンクロトン放射や逆コンプトン散乱に伴う電波放射、あるいは原始ブラックホールのホーキング放射に起因するガス加熱が 21cm 線シグナルに与える影響を調べる手法などが挙げられる。さらに、ダークマターの性質の解明を目的とする間接的手法の研究を推進することも重要である。ダークマターが卓越する矮小銀河について、メンバー星のイメージング・分光観測データに基づき、ダークマターの空間分布を復元する手法は独自性が高い。例えば、矮小銀河において普遍的にコア構造を持つダークマター分布が観測されれば、超軽量のフェジーダークマターやアクシオンライク粒子などの存在を示唆する可能性がある。また、矮小銀河におけるダークマター分布の高精度な復元は、ダークマター起源のガンマ線探査をはじめとする研究において重要な役割を担うことも指摘しておく。これらに加えて、小スケール構造に感度をもつライマン α 吸収線系や21cm吸収線系のパワースペクトルなどの統計量も、ダークマターの性質を検証する手法になる。

ダークエネルギーについては、現宇宙の加速膨張を説明するために導入されたことから分かるように、その性質を検証できるのは宇宙観測によってのみである。特に、2025年には、米国主導の Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI) プロジェクトが、広天域銀河分光サーベイデータからバリオン音響振動 (BAO) スケールを高精度に測定し、ダークエネルギーがアインシュタインの宇宙定数ではなく、時間変化している可能性を示唆する結果を報告している。これが本当であれば、画期的な発見である。今後の宇宙論観測データによって、この時間変化するダークエネルギーの可能性を独立に検証することは、喫緊の課題である。手法として有効なのは、Ia型超新星による標準光源、銀河分光サーベイや21 cmサーベイによるBAO測定などであり、将来的には重力波標準サイレンも有力な手段となると期待される。また、吸収線系の超精密分光観測により、宇宙の加速膨張を直接観測することもできる。

■ 自然の実験場として新しい物理を探る

標準理論 Λ CDMモデルを超える新しい物理を観測的に探ることも、極めて重要である。代表的なものとして、修正重力の検証、初期宇宙の物理、たとえばインフレーションの物理機構の探索、さらに微細構造定数の時間変化の探索が挙げられ、いずれも宇宙観測で検証可能である。

修正重力を考える主な動機は、ダークエネルギーを導入せずに現宇宙の加速膨張を説明できる可能性がある点にある。このため、重力理論の宇宙論的スケールでの検証は重要である。手法としては、宇宙論的弱重力レンズ効果や、銀河の固有速度による赤方偏移空間歪み効果 (redshift space distortion: RSD) などの測定を用いる手法がある。

宇宙誕生の瞬間には、観測可能な約138億年の宇宙全体が 10^{-26} cmよりも小さく、宇宙そのものが量子の世界であったと考えられる。そこでは、時間と空間そのものが量子的になり、これまで構築されてきた物理法則は適用できない。この理由で、インフレーションの物理を探ることは、新しい物理を探ることと等価である。インフレーションの物理を探るアプローチとしては、宇宙の曲率、原始ゆらぎのパワースペクトル形状、原始非ガウス性の探索なども有効であり、広天域の銀河サーベイや 21 cm サーベイのデータによって検証できる。

物理定数が時間とともに変化するのか、また宇宙のあらゆる場所で同一かを観測的に検証することも、宇宙の起源に迫る重要な問いである。遠方銀河や銀河間ガスに由来する吸収線系を高精度分光で測定することで、微細構造定数の時間的・空間的变化を調べることができる。

§3.2.2 銀河形成と宇宙進化

銀河の形成とその中心にある超大質量ブラックホールの形成を解明する上で、すばる望遠鏡、アルマ望遠鏡、JWSTをはじめとする超大型の観測装置群は大きな役割を果たしてきた。第5期中期計画期間においてはPFSによる大規模分光探査観測の成果が生み出され、Roman宇宙望遠鏡、ULTIMATE-Subaruによる赤外線の大視野探査観測が開始され、大きなブレイクスルーにつながることを期待される。このような探査で見つかる天体を赤外線の高空間分解能で観測するTMT、サブミリ波の広帯域で観測するアルマ2、近赤外線の高精度位置情報を与えるJASMINE等の建設も進み、次のブレイクスルーに発展するであろう。SKA-lowが開く再電離期のHI21cm線観測は初代の銀河の誕生とともに銀河間空間が電離される様子をはじめ描き出すことが期待される。銀河形成の理解に対するこれらの超大型観測装置群から科学成果を最大限引き出すために、大視野多波長のデータを最大限活用するデータインターフェースを整備することも基盤として重要である。

■ 銀河形成史の解明

宇宙誕生から4億年の赤方偏移10を超える銀河の検出やその追求観測はJWSTの近赤外線撮像観測と分光観測により飛躍的に進展している。赤方偏移10を超える銀河の輝線と連続光の診断によって、こうした宇宙最初期の銀河の元素組成や星種族の情報を得る事ができ、宇宙最初の星形成の物理過程の解明に迫ることができる。第5期中期計画期間にはJWSTによる探査ではカバーできない大視野の赤外線探査がRoman宇宙望遠鏡によって行われ、宇宙誕生から2億年にせまる赤方偏移13に至る宇宙で高紫外線光度の銀河が多数発見されることが期待される。さらにULTIMATE-Subaruによる狭帯域フィルター大視野探査はLy α 輝線をプローブにこれらの銀河の大規模分布と周辺の電離構造を解明するであろう。これらの大視野探査により初期の宇宙で大質量銀河が形成される様子を明らかにすることができる。発見された天体の赤方偏移を決定し、物理状態を解明する上で広帯域のアルマ2によるサブミリ波での赤方偏移探査や高解像度のTMTによる赤外線面

分光観測が重要な役割を果たす。将来的にはGREX-PLUSによる波長2-8 μm の広領域探査により更に宇宙初期に迫る赤方偏移15を超える宇宙の高紫外線光度の銀河の探査へと発展するであろう。

宇宙の初代星の性質に制限をつける上では銀河系のバルジ領域に存在する銀河形成初期に生まれた星の系統的な理解も重要である。赤外線での広視野撮像観測は、これまで高い星密度と大きなダスト減光が制約となってきた銀河バルジ領域の構造と形成史の解明でも大きな進展をもたらす。Roman宇宙望遠鏡の広帯域撮像観測に加えてULTIMATE-Subaruのさまざまな狭帯域フィルターによる撮像観測は星吸収線強度の統計解析を可能にする。さらにJASMINEによる近赤外線の高精度位置測定は視差と天球方向の運動の情報を与え、銀河バルジの立体構造に踏み込む。将来は視線方向の力学情報を与える近赤外線の高分散分光観測による展開も期待される。また遠方宇宙にある初代星の残骸をとらえる上で重力波は新しいプローブとなる。将来計画として検討が進む Einstein Telescope をはじめとする第三世代重力波望遠鏡はほぼすべての赤方偏移の範囲にある中間質量ブラックホールからの重力波を検出できると見積もられており、重力波観測で得られるブラックホールの統計は初代星の質量分布に対して新しい制限を与える。

大質量銀河の成立過程を解明する上でダストに隠された激しい星形成を示す銀河種族の系統的な理解も必要である。このような銀河はダスト減光により可視・赤外線では暗いことが多く、従来の方法で赤方偏移を決定することができない天体も多数存在する。ASTE-TIFUUNやアルマ2のサブミリ波での広帯域観測は赤方偏移を決定し、これらの天体の物理状態を明らかにする上で新しい手法となる。さらにLST/AtLASTやATT30で可能になるサブミリ波での高感度広視野観測はダストに隠されて他の波長では捉えられない激しい星形成を捉え、大質量銀河の最終段階の解明につながると共に、銀河の化学進化にともないダスト形成が進む様子を明らかにすることも期待される。

銀河形態の確立過程を明らかにするためには1kpcを切る空間分解能で銀河内部の星種族の構造の力学構造の進化や化学進化を捉える必要がある。TMTによる赤外線での高解像度の面分光観測は銀河の星形成がピークを迎える宇宙年齢20-30億年程度の時期から、星形成が終焉を迎え銀河の内部構造が確立する時期に対して星の吸収線を用いて銀河の内部構造の進化を捉えることを可能にする。

■ 超巨大ブラックホールの起源の解明

超巨大ブラックホールの起源の解明においても赤外線広視野探査による初期宇宙のブラックホール探査は鍵となる。超大質量ブラックホール成長の時間スケールは0.5億年程度であり、宇宙がはじまってから数億年に存在する超大質量ブラックホールの統計はその起源に対して強い制限を与える。Roman宇宙望遠鏡による初期宇宙の超巨大ブラックホールの探査は宇宙年齢2億年（赤方偏移13）までをカバーし、GREX-PLUSによる探査は宇宙年齢2億年を切る宇宙(赤方偏移15)での探査を可能にする。これらの観測から得られる統計と追求観測による物理性質の解明により超巨大ブラックホールが種から巨大化する過程に迫ることが期待される。

超巨大ブラックホールの初期の成長期に近づくにつれ、ブラックホール周辺に存在する大量のガスやダストに隠された急激な成長段階を捉えることも重要になる。このような成長段階を系統的に探査するためにはブラックホール周辺コロナからのX線を捉える探査やダスト遮蔽領域からの中間赤外線を捉える探査が必要である。20 μm を超える中間赤外線での深宇宙探査を可能にするPRIMAは宇宙初期のダストに隠されたブラックホール成長に切り込む観測が期待される。ダストに隠された急激な成長段階は激しい星形成を伴うことが考えられ、サブミリ波によるダストに隠された激しい星形成の広域探査も急激な成長を捉えるうえで有効である。このような探査で検出された天体は可視光や近赤外線

では検出することが難しいことが予想され、アルマ2ALMA2での広帯域観測や将来的にはLST/AtLASTでの超広帯域分光観測で赤方偏移を決定することも重要となる。

ブラックホールの合体過程が超巨大ブラックホールの成長の上でどのような役割を果たしたのかは超巨大ブラックホールの形成を理解する上でのミッシングピースとなっている。LISAによる直接観測あるいは、SKAやngVLAでのパルサータイミング観測は超巨大ブラックホールの合体過程からの重力波を検出することを可能にし、超巨大ブラックホール形成の新たな描像をもたらすことが期待される。

■ 銀河-銀河間物質の進化の理解

銀河の形成過程を考えるうえで、大規模構造の形成と連動した銀河周辺領域から銀河へのガス流入と銀河内の活動性に伴う銀河からのガス流出の影響を定量的に測定することが求められる。すばるPFSによる分光探査観測は宇宙年齢20-30億年程度の銀河の星形成がピークを迎える時期の宇宙において銀河周辺の大規模構造に付随する中性水素ガスの分布を「影」として捉えることを可能にする。一方、銀河そのものの分光赤方偏移探査やULTIMATE-Subaruによる狭帯域撮像探査により銀河分布を捉えることができる。これらの吸収線で捉えられる銀河間ガスの大規模構造と銀河の大規模構造の比較により銀河周辺に広がるガス分布が可視化される。さらに暗い銀河を背景光源として用いることが可能になるTMT-WFOSによる分光探査観測は、より銀河に近い空間スケールで銀河に直結する中性水素ガスの分布を統計的に描き出すことが期待される。電波波長域ではアルマ望遠鏡による観測も銀河周辺の[CII]吸収線を捉えることに成功しており、アルマ2による高感度観測により新しいプローブでの銀河周辺物質の解明も可能になる。大規模構造が確立し、それと連動したガス流入過程により銀河の形成が進む様子が明らかにされる。

電波波長域での広視野高感度の観測は銀河の分布や大規模構造に付随するガスを捉える上で新しい手段となることが期待される。SKA1-LOWは大規模構造や銀河周辺領域に存在する水素21cm輝線を遠方宇宙において系統的に捉えることを可能にする。将来にはngVLAによる水素21cm輝線やLST/AtLAST・ATTによるCO/[CII]輝線およびSZEをプローブとした広域の銀河分光探査・多色撮像探査も可能になるだろう。ガスが集中し銀河の形成が活発に進む原始銀河団を系統的に探査する新しい方法につながると期待される。加えてSKAに代表される電波波長域での高感度観測では、大規模構造形成時に衝撃波で加速された宇宙線粒子と大規模構造に存在する弱い磁場によるシンクロトロン放射の直接検出可能となると期待される。

逆にSKA1-LOWによる宇宙再電離期中性水素21cm輝線の検出は銀河の誕生とともに再電離の過程が空間的にどのように進展したのかの重要な情報をもたらす。すばる望遠鏡(PFS分光探査、HSC中帯域フィルター、ULTIMATE-Subaru狭帯域フィルター)やRoman宇宙望遠鏡で行われる再電離期に到達する銀河探査、また[OIII]88 μ m輝線をターゲットとしたサブミリ波広域分光探査で得られた宇宙初期の銀河分布の情報と組み合わせ、相関を取ることで、銀河が誕生する周囲で進行する再電離の様子を捉えることができる。将来には月面のTSUKUYOMIによるさらに宇宙初期の中性水素21cm輝線の検出に発展することが期待される。

宇宙再電離過程を理解する上で銀河から脱出する電離光子について理解することも必要である。TMT-WFOSによる星形成のピークを迎える宇宙年齢20億年の中間赤方偏移にある銀河の静止系紫外線観測やLAPYUTAによる近傍銀河の紫外線観測は銀河の電離光子脱出率の統計的な情報を与える。将来的にはHWOによる静止系紫外線の高感度観測による遠方矮小銀河の探査とそこからの電離光子脱出率の情報が宇宙再電離を起こす電離光子源の議論に進展をもたらすと期待される。

§3.2.3 高密度天体・極限物理・マルチメッセンジャー天文学

表題からもわかるとおり、本節に該当する分野や研究課題は多岐にわたる。一般的には、大質量星の進化の最期に形成される中性子星やブラックホール、銀河中心の巨大ブラックホールなどのコンパクト天体や、その形成や進化に関連した現象である超新星やガンマ線バースト、活動銀河核などに伴う高エネルギー現象を、様々な波長、そしてニュートリノや重力波という非電磁波による手段(マルチメッセンジャー)で観測し、宇宙の多様な極限現象を暴いて人類の知見を広げる研究分野である。それにより、基礎物理学法則の検証、多様な恒星進化の全体像の理解、巨大ブラックホールの形成と進化、さらには宇宙における元素の起源や組成進化の解明などに貢献できる。

対象天体が絞られた他の節に比べ、本節で扱われる研究は定義や対象が曖昧で、様々な天体现象や研究テーマが含まれるため、この分野の全体像を網羅的かつ短くまとめることは不可能に近いが、ここでは国立天文台が進めるプロジェクトに関連する研究課題に絞って記述する。

■ 時間領域天文学の推進による新たな宇宙像の確立

コンパクト天体、特に恒星スケールのそれは短時間で明るさが激しく変動する現象を伴う。超新星、ガンマ線バースト、連星中性子星合体、活動銀河核のフレアなどの時間変動や突発天体现象をとらえ、「時間軸」に新たなフロンティアを切り開く「時間領域天文学」が、今後の天文学の一大重要課題と広く認識されている。多くの波長で感度の限界に達した状況を、新たな軸である時間軸によって打開することが期待される。

特に、新しい天文学として花開いた重力波天文学は、今後もこの分野をリードしていくと予想される。その中心となっている地上の干渉計型重力波望遠鏡では、国立天文台は現在KAGRAを推進している。将来計画として、高周波領域で世界最高感度を目指す KAGRA-HF や、KAGRAの技術や経験を活かせる欧州の次世代地下重力波望遠鏡 Einstein Telescope への参加などが提案されている。

重力波以外でも、伝統的な電磁波によるサーベイで発見される超新星やガンマ線バースト、高速電波バーストによる時間領域天文学の発展は今後も期待され、それによって大質量星の終末に関わる現象の理解が進むであろう。特に、今世紀になってから発見された新種の突発天体、高速電波バーストはまだ研究の歴史が浅く、謎も多い。台湾を中心に日本も参加するBURSTTによるVLBI観測で近傍のFRBを検出・位置決定できれば、その起源の理解が深まると期待される。さらにSKA が稼働を始めれば、膨大な数の高速電波バーストの検出が予想され、それによって中性子星表面の爆発現象や、電波での突発現象の全貌解明が期待される。さらには、高速電波バーストによる銀河間物質や宇宙論の研究も発展が予想される。

時間領域天文学では、突発天体やフレアを最初に見つけるだけでなく、その後続く残光現象や母銀河を観測し、その現象の全貌を解明することが重要である。この追観測は、その対象天体や研究テーマによって、様々な波長や手法で行われる。したがって、興味深い突発天体が発見された際に、強力な望遠鏡を迅速に使用できる環境を整えることが、時間領域天文学で最先端の成果を創出するうえで不可欠と言える。国立天文台が関連する望遠鏡群で言えば、可視光ではすばる、TAOやTMT、また、せいめい望遠鏡など光赤外線天文学研究教育ネットワーク事業で整備される国内の中小口径望遠鏡がある。また、電波での アルマ望遠鏡, ASTE, LST/AtLAST, VERAやJVNなどのVLBI観測、紫外線のLAPYUTAなども突発天体追観測で有用である。なお、ここ及び表3に挙げたプロジェクト名は、LOIに陽に突発天体や時間領域天文学が科学目的として書かれていたものを列記して

いるが、時間領域天文学における追観測では、ほとんど全ての望遠鏡や観測装置が有用となる可能性がある点にも注意されたい。

■ 巨大ブラックホールの形成進化と極限現象

銀河中心にある巨大ブラックホールは、その起源や形成と進化についてはまだ不明な点が多く、今後の天文学の重要課題の一つである。また、EHTの撮像観測で注目されたように、ブラックホールのシュバルツシルト半径付近を角度的に分解できるほどの大きさがあり、相対論的な時空の物理学や、ジェット形成など、ブラックホール周辺の極限現象を探る上で重要な対象である。国立天文台では、従来から巨大ブラックホール周囲のVLBI観測を進めており、たとえばngVLAのLong Baseline Arrayなども含めた高感度化や高分解能化などの技術革新を伴う最先端の観測の発展継承により、ブラックホールスピンの測定やジェットの駆動機構の理解などが期待される。また、アルマ望遠鏡やASTEによる分子ガス運動の観測や、JASMINE による銀河系中心付近の恒星運動観測により、巨大ブラックホールへのガス供給メカニズムを探ることができる。

一方で、レーザー干渉計とは全く独立な重力波観測として、パルサータイミングアレイ(PTA)による低周波の重力波背景放射の探索が注目されている。すでにこれまでの観測から有望なシグナルが捉えられているが、SKAやngVLAなどの将来計画により、確実な検出が期待できる。PTA が探索する周波数域では、恒星スケールではなく、巨大ブラックホール連星起源の背景重力波が支配的であることが予想され、これにより巨大ブラックホールの形成や合体の歴史に新たな光があてられる。また、インフレーションの時代のような超初期の宇宙由来の背景重力波放射が検出される可能性もあり、今後の発展が期待される。

■ 銀河考古学による元素の起源の解明

銀河系の中の様々な年齢をもつ恒星の重金属量を精密に測定することで、この宇宙において、様々な元素がどのように生み出され、組成が進化してきたのかを探ることができる(銀河考古学)。これは、元素を生み出す元である超新星や連星中性子星合体の観測と組み合わせて、元素組成の進化を解明する上で重要なアプローチである。

この課題に関連するプロジェクトとしては、すばる(HSC, PSF, ULTIMATE-Subaru)、TMT、JASMINE、また、せいめい望遠鏡で開発が検討されている超精密分光などが挙げられる。

§3.2.4 太陽と星

■ 外層大気加熱・恒星風加速機構の解明に向けて

現在、太陽大気(彩層・コロナ)の主な加熱過程と考えられているのは、(1) ナノフレア (2) 波動散逸の2つである。

前者は、太陽大気にあまねく存在する磁気ループが相互に影響し合うことにより、小規模な磁気リコネクションが多数発生し、大気を加熱するという仮説である。これまでのHi-Cなどのコロナ観測により、少なくとも1秒角よりも小さな構造に磁気素要素が存在すると考えられているが、高解像度観測は撮像のみに限定されている。分光観測では2006年に打ち上げられた我が国のHinode衛星搭載の極端紫外線撮像分光装置(EIS)が存在するが、2秒角程度の解像度に限定されている。1秒角を切る解像度で分光観測を実現するSolar-C_EUVSTでは磁気素要素を分解しつつ、そのダイナミクス(流れ

場、密度、温度)を精密に測定することで、ナノフレアの太陽大気加熱への寄与を定量化することが期待される

一方、波動加熱説についても状況は同様である。波動加熱説の理解には、太陽表面で励起された磁気波動のエネルギーフラックス(ポインティングフラックス)がどのように太陽大気中を伝播し、散逸していくか定量化することが肝要である。そのためには、太陽光球からコロナまでを切れ目なく分光観測することが必要であるが、Hinode衛星EISの分光観測では、彩層に感度がなく、首尾一貫した理解が妨げられていた。2万-2000万Kの広い温度域の分光観測が可能なSolar-C_EUVSTでは、太陽大気を一貫して観測することにより太陽大気加熱への波動散逸の寄与も定量的に取り扱うことが期待される。また気球実験SUNRISEやロケット実験CLASPでは、彩層の磁場を定量化することに成功している。このような取り組みが進めば、太陽大気のダイナミクス解明に手助けになるであろう。

また、太陽大気加熱は、太陽風加速に直結していると考えられる。磁気的なエネルギーが散逸し、内部エネルギーとなった場合は大気加熱、運動エネルギーとなった場合は太陽風となると解釈することができる。上記のSolar-C_EUVST, SUNRISE, CLASPなどの大気加熱理解への取り組みは、太陽風加速理解へとも続くことが期待される。

■ プラズマ爆発現象の機構解明とその予測に向けて

我が国のようこう衛星などのX線観測により、これまでに太陽フレアが磁気リコネクションにより発生していることが明らかになってきた。太陽フレアについて残された謎は、(1) 太陽フレアでは、なぜ「速いリコネクション」が実現しているのか？ (2) 大規模な太陽フレアはいつ・どこで発生するのか？ (3) フレアに伴う高エネルギー粒子はどのように生成されるのか？である。

(1)については、実際(?)にリコネクションが発生している領域(X点)の詳細観測が重要だと考えられている。X点では、プラズモイドやそれに伴う衝撃波などにより、リコネクション過程を「速く」する効果が働いているとする理論が提唱されている。1秒角を切る高解像度に加えて、1秒の観測ケーデンスを実現するSolar-C_EUVSTによりその物理が明らかになることが期待される。

(2)については、太陽活動の地球への影響を予測する「宇宙天気」的な要請からますます重要な課題となっている。これまでにHinode衛星の可視光望遠鏡(SOT)が大きな成果を上げてきた。太陽表面の磁場構造変化により、太陽大気を占める磁場が不安定化、何らかのトリガーにより太陽フレアが発生することが理解されてきている。このフレアトリガーは、黒点全体からすると微小な磁気要素によってなされると考えられており、その特定は容易ではない。高解像度・高感度・高ケーデンスを実現するSolar-C_EUVSTならば、フレアトリガーに対応する彩層・コロナでの特徴検出に貢献し、より精密な宇宙天気予報の確立に進むことが期待される。また、太陽フレアの規模ごとの発生頻度は、冪乗則に従うことが知られている。よって、100年に1度などの大規模なフレア発生イベントも生じうる。このような極端イベントを継続的に監視する意義はますます高まっており、三鷹キャンパスの太陽フレア望遠鏡のさらなる長期観測が期待される。

(3)については、太陽フレア中のどこで、どのような時間スケールで、どのようなエネルギーの粒子が生成されているか理解することが肝要である。これまでに実施されているロケット実験FOXSIや現在計画中のPhoENiXでは、軟X線から硬X線帯域までの空間・時間・エネルギー分解能を持つ装置によって、太陽フレアを中心とするコロナ観測を実施する予定である。太陽フレアにともなって生成されるプラズモイドや加速された粒子からのX線などを観測することにより粒子加速過程やエネルギー分配則などの一層の理解の進展が期待される。

■ そのほかの取り組み

太陽の長期変動の理解に向けて

太陽の磁気活動11年の周期を持ち、さらに数十年スケール程度の長周期の変動もあることが知られている。よって(1) 次期活動周期予測 (2) 長周期変動の把握も太陽物理学における重要課題である。

(1)は次の11年周期の黒点数を予測するものである。一般に、活動周期間の黒点数の相関は悪く、現在の周期の黒点数から次周期を予測することは困難である。その一方で、前周期の極小期における極地方の磁場強度と、次の極大期の黒点数の間には良い相関があることが知られている。これは、極地方の磁場が、黒点の種になっていることが原因と考えられている。しかし、極地方は、地球から観測したときに視野角が悪く、磁場の観測が困難である。Hinode衛星可視光望遠鏡(SOT)ではその高い解像度での観測により、極地方でも精度良い磁場強度測定に成功している。2030年頃に迎えると考えられる第25周期の終わりまでHinode衛星の極磁場観測を継続することで、極磁場観測に関する重要なキャリブレーションデータが取得できると考えられる。

(2)は、長期観測の一貫性を担保するものである。太陽黒点の観測はガリレオの時代から始まり、すでに400年以上の歴史を持つ。その一方で、各個で短期間実施された黒点観測は、その個人や観測所に依存するパラメタが存在し、首尾一貫した記録を得るためには、丁寧なキャリブレーションが必要である。三鷹で実施している太陽黒点の長期間観測は、歴史的に重要なものであるとともに、このようなキャリブレーションにおいても重要な意味を持つ。また、今後はngGONGなどへの参加により、地上望遠鏡による、世界的な太陽継続観測のネットワーク網を重要な補完経度観測地となることも期待される。

また、活動周期の物理機構解明のためには、太陽内部の流れ場・磁場などのダイナミクスの詳細を推定する必要がある。探査機が黄道面を脱出するなどして、多点による観測を実現し、ノイズの少ない状況で、日震学を実施することが期待される。

星としての太陽

太陽は、宇宙に膨大に存在する恒星の一つであり、恒星研究のプロトタイプとしての太陽研究も重要な視点である。多くの低質量星では、最大級の太陽フレアの10から10000倍のエネルギーを解放するようなスーパーフレアと呼ばれる現象が近年のKeplerやTESSの観測によって見つかっている。一方、恒星観測は一点での観測にとどまるため空間分解可能な太陽での知見が資する機会がある。例えば、京都大学飛騨天文台のドームレス望遠鏡ではCa II HK線などの太陽・恒星比較観測により、恒星表面ダイナミクスの詳細を明らかにした。国立天文台で検討されている各種観測でも同様の比較検討が期待される。

また、Solar-C_EUVSTにより、コロナ加熱や太陽風加速の詳細な物理過程を明らかにすることは、太陽以外の恒星の同様な大気加熱・恒星風加速を重要な知見を提供するであろう。

§3.2.5 星惑星系形成

■ 星・惑星系の形成過程とその多様性の解明

星およびその周辺における惑星系の形成過程は、AU以下のスケールから、母体となる分子雲のスケールまで遡ると、約8桁もの空間的なダイナミックレンジをもって理解する必要がある。高いダイナミックレンジの必要性は、角運動量や磁場についても8桁あるいはそれ以上、また密度を考えると20桁にも及ぶ。近年では、さらに大きな空間的スケール(kpcスケール～銀河のスケール:spiral arm/inter arm、銀河の形態や活動性など)の「環境」に応じた星・惑星系形成過程の違いがあるのではないかとする予想もある。環境という観点では、金属量による違い・爆発的星形成や活動銀河核のある強い輻射場・宇宙線に晒された環境・星の初期質量関数や連星の割合についての多様性とその起源も、重大な未解明課題である。こうした観点を踏まえ、第5期中期計画中には、アルマ望遠鏡やJWST、またVLBIやVLTなどの装置・手法による高い解像度での原始惑星系円盤・原始星形成領域の観測から、分子雲コア・フィラメントから分子雲スケール、あるいはそれ以上の広域の観測、また多様な環境での観測をそれぞれ推進することに加え、これらの観測を組み合わせ、関連づけて統一的に理解するための観測的および理論的研究をさらに推進していくことが求められる。

現在稼働しているアルマ望遠鏡はもちろん、アルマ2の稼働により、原始惑星系円盤のリングやギャップ、snowline をミリ波サブミリ波帯で直接観測し、惑星形成がどのように進むかを明らかにする研究がさらに進展する。特に、惑星の存在や成長の証拠を円盤構造から直接捉えることで、惑星形成の物理過程とその多様性を具体的に描き出すことが期待される。GREX-PLUS計画で提案されている、赤外線での高分散分光による氷snowlineの検出も実現が期待される重要な方向性の一つである。

地球質量規模の惑星によって生じる微細な円盤構造を検出し、惑星形成の初期質量関数を統計的に導く研究では、ミリ波帯からセンチ波帯にかけて、現在のアルマ望遠鏡より、さらに高い解像度と感度を達成することが鍵となる。たとえば提唱されているSKA高周波帯やngVLAの観測仕様が実現されれば、系外惑星の多様性を生み出す初期条件を円盤観測から直接制約することが可能になると期待される。

銀河スケールから分子雲スケールに至る希薄な中性ガスの流入過程をHI 21cm線で捉え、星形成の環境依存性を探る研究は、銀河の進化や星形成率を左右するガス供給メカニズムを理解し、星惑星系形成の外的条件を明らかにする。ここでもSKAおよびngVLAが重要な役割を担うであろう。

大質量星形成領域における降着バーストの時間変動をVLBIの手法を使った高い空間的解像度でモニターし、星形成過程の動的多様性を解明する研究では、非定常的で突発的な物質流入現象をメーザーの観測を通してとらえ、こうした物質流入が星形成を駆動する上で担う役割を解明することが期待される。ここでは大学VLBI連携、東アジアVLBIでの観測が想定される。

分子雲や星形成領域をミリ波帯広視野で分光撮像探査を進め、星形成の統計的性質を導き出す研究は、個々の特殊な事例に依存しない一般的な星形成像を統計的に導出するうえで重要であり、多様な環境下での星形成過程を比較可能にする。サブミリ波帯においては、特に中性炭素[CI]輝線など広域分光撮像探査の拡大が急務であり、また、星形成領域の磁場構造を広域偏波観測で明らかにし、その役割を解明する研究は、磁場が星形成を促進するのか抑制するのかという根本的問題に迫り、理論と観測をつなぐ重要な鍵を与える。現在稼働中のNRO 45m、ASTE 10m鏡に加え、より大型化し掃天能力を高めるLST/AtLAST、またテラヘルツ帯での[CI]($^3P_2-^3P_1$)輝線の広域探査が可能なATTなどによる観測が期待される。

原始星や若い星団を光赤外線で広域的に探査し、形成環境の多様性を調べる研究は、異なる母体環境が星惑星系形成にどのように影響するかを比較することで、銀河内での星形成の多様性を定量的に明らかにする。すばる2およびすばる3がここでの主役となるであろう。

観測で得られる現象を数値シミュレーションで再現し、星惑星系形成の多様性を物理モデルとして理解する研究は、複雑な観測事実を統合し、形成過程に潜む普遍法則と多様性の源を明示することに貢献する。CfCAによる研究はもちろん、観測と理論を結びつけた研究プロジェクトの推進が鍵となる。

■ 惑星系に至る物質進化とその多様性の解明

惑星系形成の理解には、星形成領域や円盤において物質がどのように進化し、惑星に取り込まれていくかを解明することが不可欠である。分子雲から原始惑星系円盤までのスケールで化学進化を追跡し、その多様性を統計的に理解することが、惑星系の組成や最終的な居住可能性を規定する鍵となる。近年のアルマ望遠鏡の観測により、原始惑星系円盤の形状は、多数のリングやspiral構造を示すものから、非軸対称なもの、こうした構造がほとんどみられないものまで、驚くべき多様性を示すことが明らかになっている。連星系で観測されるcircum-inner diskやcircumbinary diskも含め、惑星系形成領域の物理的な多様性とその起源に迫るとともに、そこでの化学進化・物質進化にどのような環境依存性が現れるか、理解を進めることが大きな課題の一つである。

星形成領域や円盤における分子分布の進化を捉える研究は、惑星系の化学的・物質科学的な初期条件を明らかにするうえで重要である。アルマ望遠鏡による高解像度観測を通じて、有機分子や水の空間分布を直接マッピングすることで、惑星がどのような化学的環境で形成されるのかが定量的に明らかになる。また、含む揮発性分子の分布をsnowlineと共に把握することは、固体とガスの分離過程や惑星の組成を制約するために不可欠である。このsnowlineは、質量降着率に応じてその位置が変わることも予想されており、たとえばメーザーの高分解能モニター観測で得られる非定常な物質流入と、snowlineそして揮発性分子分布を関係づけるような観測も今後重要であろう。現在こうした観点で精力的に進められているアルマ望遠鏡などでの観測に加え、第5期中期計画期間中には、より大型の分子の観測に適したミリ波からセンチ波帯での、さらに高感度な観測の実現に向けた活動が望まれる。アルマ望遠鏡/アルマ2に加え、SKA、ngVLA、またGREX-PLUSの高分散中間赤外線分光によるsnowlineの観測などがここでの役割を果たす。

地球質量規模の惑星やその形成環境を可視光～近赤外の高感度分光で直接探査することも重要な知見をもたらす。特に、円盤中の微細な化学組成や時間変動を観測することで、惑星系形成の多様性をもたらす初期条件を解明し、系外惑星の多様な性質を説明する理論的基盤を与えることが期待される。すばる2/すばる3に加え、稼働が期待されるTMTへの期待が大きい。

広視野での分子探査により、環境依存性を統計的に捉える研究では、ミリ波からサブミリ波帯での広域分光撮像観測を活用し、多数の星・惑星系形成領域を対象とした化学進化の比較が進められる。これにより、分子組成の多様性がどのように環境条件(星の質量、密度、放射場など)に依存するかを明らかにできる。化学進化・分子の生成過程の観点では、晩期型星や超新星の周辺領域に着目した広域分光撮像探査も重要であり、星間空間における物質循環の全貌の理解に向けた観測的および理論的研究が望まれる。こうした観測は、アルマ望遠鏡等による詳細観測の前段階としても重要であり、統計的に代表性のあるターゲットを選定する基盤を提供する。ここでは、NRO45mとASTE10mが、将来的にはLST/AtLASTとATTの活躍が期待される。

進化の異なるステージを体系的に比較する研究では、分子雲コアから原始星、円盤、そして惑星系に至るまでの各段階で化学進化・物質進化を追跡することが鍵となる。高い解像度の観測から広域観測のデータまで用いた系統的・統一的な解析により、進化に伴う分子組成の変化を一貫して描き出し、特定の化学的特徴がどの段階で形成されるのかを明らかにする。これは、太陽系の起源を宇宙の中で位置づけるうえでも重要な知見を提供する。

分子進化と惑星系の居住可能性を結びつける研究では、水や有機分子の起源とその輸送過程に注目する。これらの物質が惑星にどのように供給されるかを理解することは、生命に適した環境の形成条件を定量的に制約する鍵となる。今後は、円盤観測と理論モデルの緊密な連携によって、太陽系と系外惑星系の化学的進化の多様性を包括的に理解することが求められる。ここではCfCAおよび理論・観測連携の研究推進が期待される。

■ 将来的な課題

遠赤外線・テラヘルツ帯での高空間分解能観測は、星・惑星系形成の分野においても重要な貢献をすることが期待される。この波長帯での干渉計は、技術的にはまだ基礎研究フェーズにあると位置付けられ、実現のためには、今後さらに技術開発を進めていく必要がある。当面、アルマ望遠鏡のテラヘルツ帯への拡張が技術的には最も実現性が高いと考えられるが、そのためには、既存のアルマ望遠鏡 Band-10での成果拡大も含め、その意義・アルマ2以降への展望などについての議論をさらに具体化していく必要がある。

こうした観測を解釈していく上で不可欠な理論研究・シミュレーションにおいても、今後の方策を探っていく必要がある。たとえば星間ガスの乱流まで含めた3次元シミュレーションは、現時点では、粒子数で(10,000)³規模が実現されつつあるが、それでも高い空間ダイナミックレンジの理解という観点ではさらなる飛躍的な拡大が望まれる。

§3.2.6 惑星系と宇宙における生命

■ 惑星の性質と多様性の体系的理解に向けて

現在、JWSTによる赤外線大気分光観測が精力的に進められ、主に主星近傍のガス惑星について、大気組成の観測的制約が進められ、惑星大気組成の多様性が徐々に見えてきている。今後、Ariel宇宙望遠鏡によるサーベイによって、惑星大気組成の多様性や傾向について体系的理解がさらに深まると期待される。Ariel計画には日本も本格参加しており、爆発的に増加する大気データの解釈への貢献が期待される。

これらの宇宙望遠鏡が低～中分散分光観測により多数の系外惑星について大気組成を調査していく中で、日本の独自の観測的貢献としては、大気構造について相補的な情報を提供する以下の二つの方向性が検討されている。

一つは、地上望遠鏡を活かした系外惑星大気の高分散分光観測である。JWSTやArielで分光データが得られた天体のうち数個のベンチマーク・ターゲットに対して、地上望遠鏡の高分散分光を活かして追観測することで、大気の運動やシグナルが小さい分子のロバストな同定といった詳細な大気の情報を得ることができれば、惑星大気の理解に対して独自の貢献が期待できる。系外惑星大気の高分散分光観測は、現在、すばる望遠鏡の既存の装置であるHDSやIRDで行われているが、より長波長をカバーする新しい分光器も検討されている。地上望遠鏡を用いた赤外線大気観測・解析技

術は、TMT時代の小さな惑星（ハビタブル惑星候補を含む）の大気観測の試金石という側面もあり、日本で知見を蓄積することは将来の基盤としても重要と考えられる。

もう一つは、紫外線領域で大気の高分散分光を行うLAPYUTA計画である。紫外線領域では、熱圏から外圏に至る高層大気の可能になる。下層大気の組成がJWSTやArielなどで制約されているものについては大気の散逸過程を制約が可能になり、下層大気の観測が難しい地球型惑星については上層大気を通じて大気組成についての情報を得ることができる。HSTに対するLAPYUTA計画の優位性は、酸素(OI)の検出感度であり、酸化的大気の探査および大気構造の理解に新たな観測的切り口を提供する。惑星の高層大気、特にメタル(H, He以外)に富む高層大気の構造の理論モデルを活かし、観測と理論の協働によって惑星大気進化への理解を進展させることが期待される。

■ 多様な惑星系および太陽系の形成史の解明に向けて

今後、Roman宇宙望遠鏡やPLATO計画によって系外惑星の探査範囲は長周期の軌道へ大きく拡張される。また、JWSTやArielによって惑星大気の高層大気組成の多様性および傾向が得られる。そのような広いパラメータスペースで得られる惑星分布および大気組成の傾向のデータを、包括的な惑星形成の描像の中で説明できるようにすることは、今後の世界的な課題である。日本は、「京都モデル」の時代から継続的に惑星形成理論に強みを持ってきており、この土壌を活かした理論モデルの進展が期待される。これは、CfCAによる数値シミュレーション環境によって支えられる。

上述の系外惑星大規模サーベイと並行して、アルマ望遠鏡、そしてJWSTとすばる望遠鏡による高コントラスト観測により、原始惑星系円盤の詳細構造の観測の大きな進展が期待される (§3.1.5)。また、すばる望遠鏡のSCEXAOによる高コントラスト観測では、形成中もしくは形成直後の若い惑星の観測の直接撮像・分光も行っており、これらへの質量降着過程や形成後の大気構造といった貴重な情報が得られると期待される。これらのさまざまな時代の惑星系の姿を踏まえた、惑星系の多様性を説明する包括的なシナリオの構築が、長期的には期待される。

一方、太陽系形成史の理解の進展は、探査機による実地調査が大きな役割を担っている。第5期中期計画期間において、国立天文台は、測地学という専門性を活かし、MMXプロジェクトにおける探査機の軌道決定や火星衛星Phobosの内部構造決定、さらに Hayabusa2 拡張ミッションによる高速回転小惑星の構造研究を予定している。これらは火星衛星系や始原的小天体の起源を明らかにすることに貢献し、太陽系形成過程の理解を進展させる。

■ ハビタブル環境の成立条件の解明、および生命探査に向けて

ハビタブル惑星の表層環境の観測は、既存の装置では限界があり、TMT時代の主要なサイエンスと考えられている。TMTによるハビタブル惑星候補の大気組成の観測の鍵を握るのが、高分散分光および高コントラスト技術である。これらの技術をすばる望遠鏡で実証し発展させることは、第5期中期計画中の重要な目標であり、次世代大型望遠鏡 TMT における観測へと直結する。すばる望遠鏡の極限補償光学装置SCEXAOはTMTにおける高コントラスト装置PSI-Blueの原型となるものであり、若い惑星をターゲットとして実際に観測を行う中で要素技術を実証していくとともに、技術を持つ次世代の育成を進めることが期待される。

一方、2040年代の実現を目指して、TMTやELTなどとは相補的なターゲットにおける生命探査およびサーベイを主要サイエンスとした超大型宇宙望遠鏡計画が、世界的に検討されている。これらの将来計画には不定性もつきまとうが、高コントラスト技術開発や理論的な準備を行うことで日本の貢献可

能性を高めることは重要である。NASAが主導する紫外線～近赤外線領域の宇宙望遠鏡HWOに向けて、天文台からは、高コントラスト技術および科学的な側面からの貢献が期待される。また、欧米を中心に検討されている中間赤外線宇宙干渉計計画LIFEは、超精密編隊飛行技術がその実現の鍵を握っているが、その実証という意義を持つSILVIA計画への技術的協力も考えられる。

これらの地上・宇宙のハビタブル惑星候補分光観測計画の効率を最大化するには、観測に適した明るい恒星（つまり太陽系近傍の恒星）の周りで観測ターゲットとなる系を検出し、惑星の基本的なパラメータ（質量・半径・軌道）や惑星系の構造、そして主星の性質を制約しておくことが重要である。低質量星周りのハビタブル惑星候補はすでにいくつか検出されているが、中期M型星回りでは宇宙・地上ともに観測が難しく、未開拓領域として残る。また、HWOやLIFEなどによる観測でターゲットとなる明るい太陽型星周りのハビタブル惑星候補は観測精度の問題でまだ検出が進んでいない。天文台が主導しこの領域を切り開くことで、日本は独自の貢献を果たせる。具体的には、JASMINE による宇宙からのトランジットサーベイや、すばる望遠鏡および岡山188cm 望遠鏡およびせいめい3.8m望遠鏡といった岡山望遠鏡群に設置予定の高精度分光器による視線速度観測が挙げられる。特に、太陽型星を対象とする場合には、恒星起源の視線速度変動を精密に補正する必要があり、この課題に挑むことは国際的にも重要である。

高度文明からの信号を探すSETIにおいては、国立天文台の電波や光の望遠鏡を用いて実施する可能性もある。電波ではデジタル信号処理による超広帯域分光技術を生かし、さらにVLBIをRFI除去のフィルターとして使うなど、国立天文台独自の装置や技術を生かした展開が可能であり、また、SKAやngVLA等に向けた萌芽的研究とすることができる。

§3.3 第5期中期計画における実施提案

本章では、§3.1(表3.1.2.1)の分類に従って、各提案の内容について記す。

提案のID番号は提出順に割り当てられたものであり、その順番に掲載してある。各項目内において、ID番号および掲載順は、優先順位とは無関係である。

§3.3.1 地上望遠鏡プロジェクトの提案

§3.3.1.1 優先度が極めて高い提案

(ID01) Square Kilometre Array Phase 1

南アフリカとオーストラリアの超大型の電波干渉計を建設して、アルマ望遠鏡が観測できない長波長電波行きで宇宙論、宇宙における物質進化、太陽地球磁場に至るまで幅広いサイエンス分野の最前線を切り拓く計画である。本提案は、SKA Phase 1に対して日本が、「宇宙再電離の解明」「宇宙磁場の詳細探査」「パルサータイミング観測による重力波天文学」という3つの柱を立てて参画することを目指している。SKAの科学的な意義や、国際的な協力の重要性については明らかである。限られたリソースで計画の細部まで検討が進んできており、SKAが必要とされる重要な科学的課題の検討がしっかりなされている。SKA先行機への参入により、次世代を担う若手の育成にもつながっていることも高く評価できる。このプロジェクトにどのように日本が関わっていくのかという点について、名古屋大学を中心としてフロンティアを目指すという方針は評価できる。

(ID05) 重力波望遠鏡KAGRAによる重力波天文学の推進

日本初の大型重力波望遠鏡であるKAGRAを、東京大学宇宙線研究所などと共同で推進する提案である。海外の重力波望遠鏡(LIGO・VIRGO)との協同観測を行うことで重力波源の位置精度の改善に大きく貢献し、フォローアップ観測を効率化することでマルチメッセンジャー観測を促進する意義は高い。重力波望遠鏡の中で、独自の冷却鏡技術や地下環境、kHz帯の感度を向上する量子光学光源技術などの将来技術の開発に特徴があり、将来の3G重力波望遠鏡を見据えた技術者のハブ・若手教育の場としても期待される。

(ID09) 次世代大型電波干渉計ngVLA

本提案は、この2040年代にフル稼働するセンチ波—ミリ波の世界最大の電波干渉計ngVLAへ日本として参画する計画である。ngVLAは、現行のアルマ望遠鏡やJVLA等の10倍高い感度と10倍以上高い空間分解能を実現し、そのサイエンス対象は宇宙論から星惑星形成に至るまで非常に広い。ngVLAに日本が参画することによって、日本がこれまで培ってきた競争力のあるアンテナ技術や受信機技術で大きく貢献できる。アルマ望遠鏡で若手研究者が育ったように、建設期からの国際プロジェクト参加によって、マネージメント、機器開発、サイエンス運用、そしてなにより初期のサイエンスを刈り取る人材が育つことが期待される。NRAO(米国国立電波天文台)を含めアルマプロジェクトとの連携を前面に出している点も本提案の強みである。

(ID13) 30m光学赤外線望遠鏡計画TMT

TMTは、日米印加で協力して建設を進めており、2030年代半ばより科学運用を開始することを目指している口径30mの光赤外線望遠鏡である。TMTは、北半球唯一の30mクラスの光赤外線望遠鏡

である。観測対象は広く、その集光力を生かしてすばるとの連携観測も期待される。日本がプロジェクトの重要技術を担っており、早くからサイエンス主導できるポテンシャルを持つ。科学的意義が高く、実現にはいくつかの課題はあるものの、現時点では日本の光赤外線天文学における次世代の旗艦プロジェクトである。可視～近赤外領域のサイエンスにおいて、北半球の天体については地上望遠鏡として最も高い感度が実現できる。トップクラスのデータにより、若手でサイエンスを担う人材への貢献が期待できる。国際協力による巨大プロジェクトの手本となるような記録と経験が他分野にも波及することも期待される。

(ID20) サブミリ波望遠鏡ASTEでの広域/広帯域観測に基づく天体形成・構造形成の研究

チリ北部アタカマ砂漠に設置された口径10 mのサブミリ波望遠鏡ASTEで、宇宙史を通じた星・銀河・ブラックホール・銀河団・ダークマターハローなどの形成と進化を明らかにすることを目標とした提案である。単一鏡望遠鏡の利点を活かしてアルマ望遠鏡では実現の難しい広範囲・高赤方偏移領域を観測するとともに、革新的技術の迅速な応用を促進する実験基盤を提供する。中心課題の一つは、[C II] 158 μ m輝線を用いた $z\sim 6$ でのライン強度マッピングで、多数の暗い銀河を統計的に捉えることで宇宙再電離期の金属生成史やダークマター分布の構造を明らかにする。それ以外にも、ガンマ線バースト(GRB)や重力波イベントの迅速な追観測、CO・[CI]輝線の銀河面マッピングなど、時間・空間スケールの広い多様なサイエンスを展開することを提案している。このために、新開発の超伝導面分光装置TIFUUN (Terahertz Integral Field Unit with Universal Nanotechnology)を搭載する計画である。科学的目標は明確で、技術面・運用面での課題も把握されており実現性は高いとともに、開発プロジェクトを通じて貴重な実地経験を提供することから次世代の研究者育成に資すると評価された。

(ID21) 宇宙と生命の起源を探究する大型ミリ波サブミリ波望遠鏡アルマ2計画

アルマ望遠鏡は、国立天文台が米国・欧州と協力し、チリ・アタカマ高地(標高5000m)に建設し、2011年より科学運用を開始した大規模電波アレイである。2023年度より開始した「アルマ2」は、「宇宙と生命の起源の探究」を目指し、「地球軌道スケールでの惑星系形成過程の理解」「惑星系誕生過程での生命素材物質の理解」「宇宙における元素合成の開始地点の探究」を主要目標にかかげて現在のアルマ望遠鏡に対して、2倍以上の解像度と、約2倍の感度、2倍以上の同時観測可能な周波数帯域を実現する計画である。アルマ望遠鏡は電波天文学にとって非常に重要な装置であり、国立天文台で実施する必然性や国際的競争力が高い。大学理工学系分野を含めて共同研究や人材の育成が検討され、アルマ望遠鏡で成果を挙げた若手が日本はもちろん海外でも活躍の場を広げるなど、次世代育成への貢献も大きい。米国・欧州と進める大型国際プロジェクトの中で、日本から技術的にも運用面でも重要な貢献をしており、国立天文台の柱となるプロジェクトである。

(ID22) すばる望遠鏡の安定運用と機能向上:「すばる2」から「すばる3」へ

すばる望遠鏡は、1999年に国立天文台がハワイ・マウナケア山頂(標高約4200 m)に建設した口径8.2 mの光学赤外線望遠鏡である。共同利用観測施設として、長年にわたり多くの世界最先端の科学的成果を挙げており、その実績は国内外で高く評価されている。日本の光赤外線天文学コミュニティからの強い支持も得ており、国立天文台が推進するプロジェクトとしての優先度は高い。本提案は、2031年度までの「すばる2」による望遠鏡の安定運用を継続しつつ、TMTとの連携や次世代構想「すばる3」への移行を見据えたものであり、光赤外線天文学における日本の国際的競争力を維持・強化する上で重要な意義を持つ。このような連続的な発展は、次世代育成の観点からも重要である。これまでの科学的成果を踏まえても、2033年までの運用継続は科学戦略的にも妥当であり国際競争力を持った科学成果の創出と次世代育成へのさらなる貢献が期待される。

§3.3.1.2 優先度が高い提案

(ID02) Advanced R&D hub for future GW detectors with TAMA300

国立天文台三鷹キャンパスにある300 m アーム長のレーザー干渉計型重力波検出装置TAMA300を基盤として、将来の重力波検出の技術開発のための先端R&D拠点の整備する提案である。KAGRAのアップグレード計画であるKAGRA-HFを見据え、量子雑音低減技術をはじめとする最先端の技術開発をさらに発展させるとともに、LIGO/KAGRA型デジタル制御システムの導入を進め、リアルタイム信号処理・遠隔操作の実現を目指している。TAMA300は世界で唯一の中規模重力波R&D専用施設であり、KAGRAの観測装置では困難な自由度の高い実験環境を提供することで、国際的なハブとなりうるとともに若手研究者の育成にも貢献すると期待される。

(ID03) 光赤外線天文学研究教育ネットワーク事業

大学が所有する中小口径の光赤外望遠鏡(国内12台、国外1台)をネットワーク化し、時間軸天文学領域を含む萌芽的サイエンスと機動的な学生教育を同時に推進する構想である。すばる望遠鏡などの大型望遠鏡では難しい大型では難しい長期継続監視や迅速な追跡に強みがあり、時間軸天文学で独自の価値が期待される。授業・実習・遠隔観測の標準化やデータ連携基盤の整備も視野に入れており、コミュニティの裾野拡大に資すると考えられる。

(ID04) 大学VLBI連携

国内5大学と国立天文台が連携し、大学の電波望遠鏡およびVERAを用いてVLBI観測網を構築し、マイクロ波領域における突発現象・時間変動現象の研究を推進するという計画である。国内でこの周波数領域をカバーできるのは本提案 だけであり、高感度・柔軟な運用・長期的なモニター観測という点で国際競争力がある。メーザー・星形成、AGB星、超新星、ブラックホール連星、突発天体といった個々の科学テーマは国際的にもインパクトがあり、教育・人材育成や装置開発面にも貢献すると期待される。

(ID06) 第3世代重力波望遠鏡(3G)

2030年代後半に観測が開始される見込みの第3世代重力波望遠鏡(3G)時代に備え、国立天文台重力波プロジェクト内に、3Gサブプロジェクト、および3Gで先行する欧州の Einstein Telescope(ET)のResearch Unitを設立し、正式にETに加盟する提案である。KAGRAとも共通の課題となる地下環境雑音評価、極低温鏡システムの開発、防振装置試験、高性能結晶性鏡開発、量子光学技術などで共同開発を進め、一部の設計や計測を担う。基本方針は技術的に貢献することであり、大きな参加経費を負担することなく3Gで日本の存在感を示すことを狙うとともに、アジア地区における3Gのデータセンター設立を目指している。アジア・オセアニア地区の超大型重力波望遠鏡を3.5Gとして建設する可能性も模索する。

(ID30) LST/AtLAST計画推進とサブミリ波多次元掃天観測による天体・構造形成の研究

星の材料となるガス・塵の検出に長けたサブミリ波帯において、広い視野・広い波長帯域をカバーする観測装置を備えた大口径単一鏡を実現し、アルマ望遠鏡をはじめとする大型観測施設と相補的なディスカバリー・スペースを開拓する計画である。アルマ望遠鏡で培われた超伝導検出器技術に加

え、集積超伝導分光技術など独自技術を駆使した焦点面装置の実現を目指している。アルマ望遠鏡に対して高品位なtotal powerデータを提供し、またアルマ望遠鏡の一アンテナとして干渉計に組み込むことでその感度向上にも資する。サブミリ波天文学の次世代を切り拓く国際的にも高いインパクトを有する野心的計画で、広視野・高感度のサブミリ波単一鏡として、アルマ望遠鏡との補完性を活かし多様なサイエンスに貢献しうると評価された。技術実証・国際連携も進んでいる。

(ID32) 岡山光赤外望遠鏡群を中心とした時間軸天文学・人材育成・国際連携の拠点構築

国内最大の口径3.8mを持つ京都大学せいめい望遠鏡の共同利用を継続して遂行し、突発天体への即応や変動天体の長期モニターをはじめとする時間軸天文学を推進し、アジアの国際連携拠点へと進化させる計画である。恒星活動現象や第二の太陽系の探索のための高分散分光装置の技術開発の場でもあり、すばる望遠鏡やTMTへ活用する。身近な望遠鏡として、運用、開発、観測、解析などひとつおりの経験が accrue するため、人材育成に貢献できると考えられる。

(ID33) 野辺山45m鏡を用いた次世代技術開発とミリ波大口径アンテナによる天文学

波長3mm帯において、依然として世界トップクラスの性能を維持している野辺山45m電波望遠鏡を活用し、アルマ望遠鏡と相補的な広域探査によって銀河スケールから星・惑星・コンパクト天体に至るガスの流れを明らかにしようとする提案である。国内で世界トップクラスの望遠鏡にアクセスできる利便性を活用し、これまでも次世代技術の開発促進・若手人材育成にも大きく寄与してきている。サイエンス面や運営面において今後のビジョンは明確になってきており、軸となるサイエンスでの成果と柔軟な運用を活かした次世代の教育は相乗効果が十分あると期待される。

(ID40) 太陽活動の継続的観測: ひので衛星、三鷹地上観測、さらに将来観測への布石

2006年に打ち上げられたひので衛星、1917年から続く三鷹地上望遠鏡を継続的に運用し、「恒星磁気活動のプロトタイプとしての太陽」「太陽圏ダイナミクスのドライバーとしての太陽」の理解を進めることを目的とする提案である。ひので衛星については、2028年打ち上げ予定のSOLAR-Cとの相補的な観測を実施予定である。三鷹地上望遠鏡での100年にわたる長期・継続的な太陽のモニター観測は、他に例を見ない天文学的財産となり、10から100年程度の太陽活動の変遷・周期活動を理解することにも資すると評価された。

(ID41) 東アジアおよびグローバルVLBIの推進とその最高分解能を生かした観測研究

超長基線干渉計(VLBI)により実現される、他の波長と比較してもユニークな高い空間分解能での観測能力を活かし、ブラックホールや星の誕生と終末など極限状況にある天体の構造や進化の観測的研究を行う計画である。東アジアVLBIやミリ波国際VLBI等の国際的な観測網の構築とその運用を推進し、関連技術を維持・発展させるとともに、それらの観測機会をユーザーコミュニティに提供し、超高分解能の観測天文学を推進するという提案となっている。VLBIの特徴を活かしたM87ブラックホールの高解像度撮像やその時間変動モニター観測など、インパクトの高いサイエンス・ケースが示されており、VLBIならではの研究の発展が期待される。

§3.3.1.3 さらに検討が期待される提案

(ID36) 南極 30m テラヘルツ望遠鏡計画

極低水蒸気の南極サイトを活かしテラヘルツ帯での大規模観測を目指す長期的構想である。2034年度以降に国立天文台の主導を要請する提案で、ATT12からの発展や国際連携を前提に、国家規模の研究基盤整備を視野に入れる点が特徴である。日本の南極天文学への本格的な関与という大胆なビジョンを提起し、必要性検討と課題共有を始動させた点は評価された。

§3.3.2 宇宙望遠鏡・探査機プロジェクトへの協力の提案

§3.3.2.1 優先度が極めて高い提案

(ID17) NASA Habitable Worlds Observatoryへの参加

HWOはHST、JWSTに続く、NASA主導の紫外線～近赤外線宇宙望遠鏡計画であり、2040年代中頃の実現を目指している。日本は、(1)近赤外線コロナグラフ装置、(2)紫外線分光器の開発で貢献することを目指し、そのための要素技術を確認し、装置開発へと進める計画である。本提案はこれの中で系外惑星及び銀河形成進化研究のハブを国立天文台に設置するとともに、先端技術センターの観測機器開発への協力を求めるものである。

主要なサイエンスは系外惑星の直接撮像・分光によるバイオシグニチャーの探査で、大きなインパクトが期待できる。日本が計画する装置によって地球型惑星の大気分光から生命の痕跡を目指す点は、国民からも注目をあびるだろう。また、この超大型計画のある分野において、日本人が観測時間を取りサイエンスをリードできる意義も大きい。

(ID26) 赤外線位置天文観測衛星JASMINE

JASMINEは近赤外線での高精度アストロメトリを可能にする天文観測衛星プロジェクトで、JAXA/宇宙研の公募型小型ミッションの候補に選定され、現時点では2031年度末の打ち上げを目指している。「我々が住む天の川銀河の形成と進化の探究」という目的のもと、アストロメトリによって銀河系の中心付近の構造を明らかにするとともに、「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」を目的として、中期M型星周りのハビタブルゾーンにあるトランジット惑星を検出する。科学意義が明確になっており、国際的な競争力や技術的な準備の点でも高く評価できる。

(ID38) 高感度太陽紫外線分光観測衛星SOLAR-C

2028年度の打ち上げを目指して進行するJAXAプロジェクトSOLAR-Cの主観測装置である望遠鏡部分を担当し、国内担当メーカーや構成機器を開発する海外機関と協力してプロジェクトを推進する提案である。プラズマ宇宙がどのように誕生し進化してきたのか、また太陽が太陽系の地球や他惑星へどのような影響を与えるのかを解明するため太陽大気全体でどのように質量とエネルギーが輸送されるかを包括的に理解することを目的としている。極端紫外線では現在運用されているひので衛星の同種の観測装置よりも約一桁向上する解像力と感度を持ち、二万度から二千万度の温度範囲を切れ目なく観測できる点がユニークで、他の太陽観測装置の中での位置付けや国際的な優位性は明確であると評価され、技術・開発人材の育成にも資することが期待される。

§3.3.2.2 優先度が高い提案

(ID12) 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

(LAPYUTA) 計画

ISAS/JAXAの公募型小型ミッションの候補の一つである口径60cm級の紫外線宇宙望遠鏡計画LAPYUTAの一部を国立天文台で担当する提案である。「宇宙の生命生存可能環境の探査」「宇宙の構造と物質の起源の理解」という2つの目的に対して、太陽系内惑星・衛星と系外惑星の大気分子の検出、銀河Ly α ハローの観測、中性子星合体のフォローアップなどで迫る計画で、2033年度の打ち上げを目指し、紫外分光観測(中分散・高分散)、紫外スリットイメージャ・視野ガイドカメラという機器の開発が進められている。

(ID16) 超精密フォーメーションフライト実証機SILVIA

宇宙重力波望遠鏡や系外惑星の大気分析用MIR波長帯宇宙望遠鏡などといった将来の野心的な天文観測構想を見据え、宇宙機の超精密フォーメーションフライト実現させるための技術実証を行う計画である。100m程度離れた3機の衛星を軌道投入し、衛星間位置をサブマイクロメートル精度で制御する点に特徴がある。また、構築したプラットフォーム上に光赤外干渉計プロトタイプを搭載し、天体観測を行うことも視野に入れている。よく検討されている計画であり、他のフォーメーションフライト実証計画に比べて位置制御の精度が最も優れていると考えられ、技術実証内容は具体的で非常に興味深い内容である。若手研究者を引き付ける魅力を持っている。

(ID34) 赤外線宇宙望遠鏡GREX-PLUS

口径1mの冷却宇宙望遠鏡により、初代銀河の探査による銀河形成進化の理解と、原始惑星系円盤のスノーラインの探査による惑星系形成過程の理解を目指す提案で、JAXAが2030年代に2030年代に実施する戦略的中型ミッションの候補の1つである。前者については、2~8 μ m波長帯でジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡よりも遥かに広い10, 100, 1000平方度の超広視野中間赤外線撮像観測を行うという特徴を活かし、ビッグバンから数億年未満という遠方宇宙の明るい銀河というユニークなパラメータスペースを狙う。後者は、オプションとして用意されている10~18 μ m波長帯の高分散分光観測というこれまでにない装置によって実現される。赤外超広視野観測および中間赤外高分散分光観測という2つのユニークな観測装置によって、銀河形成と惑星形成という2つの大きな科学分野に寄与することを目指した計画であり、科学的な意義は十分に認められる。

(ID35) 月面天文台TSUKUYOMI

地球の電離層や人工的な電波干渉により観測が困難なデカメートル波長(10~100メートル)の電波を、月面という静かな環境で観測することで、新たな天文学を切り開く計画である。主要な科学目標として宇宙暗黒時代の中性水素21cm線のグローバル信号の検出があるが、惑星科学や月科学まで広範囲の科学目標を見据える。段階的な開発を計画しており、まずは試作アンテナを2027~2029年に月面に設置し、システム検証を行った後、本格的な干渉計アレイ「TSUKUYOMI」へと発展させる計画である。科学データの公開は2030年度を予定している。

(ID37) 太陽フレアX線集光撮像分光観測計画

ロケット実験(FOXSI)、SmallSat、観測衛星の機会を用いて、太陽フレアのX線帯域での2次元集光撮像観測を実施し、太陽フレアの粒子加速・加熱過程、エネルギー分配過程を理解することを目指す提案である。特にX線用ミラーを用いた集光撮像による高いダイナミックレンジと空間分解能の実現など、これまで積み重ねてきた特色ある技術を活かした計画となっている。

(ID42) 太陽系内小天体探査計画における惑星測地学の推進

火星系探査プロジェクトMartian Moons eXploration (MMX) および小惑星探査プロジェクトはやぶさ2 拡張ミッション (Hayabusa2#) に参加し、宇宙における生命居住環境の理解に貢献することを目指す提案である。MMXの中で2027年頃から行われる火星の衛星フォボスの探査においては、探査機の軌道決定(精度:10 m, 10^{-3} m/s)、フォボスの詳細な形状決定(空間分解能 < 4m)、重力場の推定(5次までの球面調和展開)、自転パラメータの測定(誤差 < 2-3%)を行い、フォボス内部構造の解明と起源(捕獲あるいは巨大衝突起源)の決定に貢献する。はやぶさ2 拡張ミッション (Hayabusa2#) においては、2031年の小惑星1998 KY26への接近探査に向けて、高速自転・微小重力環境下における探査手法の開発、および高速自転小惑星の内部構造への制限を得ることで、微惑星における最大の単一要素とも考えられる高速自転小惑星の物性を解明し、太陽系形成過程やおよびその構成要素に物理的な制約を与える。日本主導のユニークな探査計画で得られる新しいデータは、惑星測地学における若手の育成に資すると期待される。

§3.3.2.3 さらに期待される提案

(ID39) 大型宇宙光学赤外線望遠鏡

「宇宙における人類の認識可能領域と活動領域を継続的に拡大すること」を大目標とし、「人類の起源と運命を知ること」を科学目標として、2030年代に宇宙空間に8m級の紫外線・可視光・近赤外線望遠鏡を打ち上げる計画である。掲げている大目標は、天文学全体の究極の目標とも言え、その重要性は多くが賛同するものと思われる。将来の進むべき大きな方向性を考える上で、現在の様々な制約に縛られずに発想し、科学的に重要である検討を提案したことは評価できる。

§3.3.3 その他の天文台内組織の提案

本カテゴリーは、上記2つのカテゴリーに当てはまらない提案で、現行の国立天文台の1プロジェクト、あるいはプロジェクト・センター内の1つの目標として適当なものである。

§3.3.3.1 優先度が極めて高い提案

(ID23) マルチメッセンジャー天文学連携拠点

重力波、ニュートリノ、宇宙線などの観測と連携して電磁波観測を行う体制を整え、マルチメッセンジャー観測を電磁波の面から支える基盤を整備する提案である。鉄より重い元素の起源の解明や重力理論の検証、宇宙線の起源、大質量星の最期、ダークマターの性質の解明や新素粒子の性質に対する制限などの成果が期待される。すばる望遠鏡、アルマ望遠鏡、KAGRAなどの主要観測装置を統合的に活かす構想が明確で、マルチメッセンジャー天文学という世界的に注目を集める分野において国立天文台の強みを活かした拠点形成を目指すことは重要と考えられる。国際的な競争が激しい分野でもあり、タイムリーに体制整備を行うことが重要である。電磁波観測装置を中心とした時間軸天文学の推進という方向性は、共同利用機関として理にかなっており、国内外の研究者に有益な枠組みとなるとともに科学的成果が期待できる。

(ID24) 次世代シミュレーションで探る天体の構造と起源

共同利用として国内外の研究者に計算資源を提供している「天文シミュレーションプロジェクト」の継続運用の提案である。計算天文学の基盤として、富岳などの大型計算機との連携を含めた研究環境の整備に貢献している。若手研究者による積極的な活用と成果創出により、計算天文学における国内コミュニティ支援の中核的存在となっている。理論研究の基盤としての役割が明確であり、そういった環境の必要性は明らかである。成果の蓄積と人材育成の両面において、継続的な貢献が期待される。

§3.3.3.2 優先度が高い提案

(ID10) ダークユニバース宇宙論研究拠点

理論と観測との連携により、ダークマターおよびダークエネルギーに関する研究を系統的に進める拠点を形成する提案である。ダークマターおよびダークエネルギーの研究分野において、国立天文台が主導する観測プロジェクトの結果を引き出し、次の研究の方向性を打ち出す理論研究の拠点として貢献が期待される。特にこれから10年のうちにすばるPFS、Rubin / Euclid / Romanなど大統計の天体測定による宇宙論研究の進展が期待され、その先の世代のプロジェクトの大型化が想定される中で、日本国内の研究者が連携して理論的研究を推進するための拠点を早急に形成し、世界的に研究をリードする意義は認められる。

(ID11) 国際滞在型天文学宇宙物理学研究会・スクールの拠点形成

国際研究会やスクールを国立天文台を拠点として定期的を開催する提案である。国際的に著名な研究者が国立天文台に滞在し、研究会やスクールを開催する。定期的に開催することで国際的な知名度も上がり、招待する著名な研究者だけでなく関連する多くの研究者を引き寄せる良い機会となることが期待される。国内の若手研究者が限られた財源であっても長期に参加し、詳細な議論を持つことができる良い機会となるだろう。

(ID15) 銀河形成研究拠点: プロジェクト・分野横断研究に基づく新しい銀河形成研究の展開

初代星・銀河の誕生から、現在の銀河までの進化を理解することを大目的とし、学際的な研究分野の創出、複数の装置・観測計画の横断的な統合、将来プロジェクトの種の発見と新たな提案の国立天文台からの発信、などを目指した研究拠点を形成する提案である。専任教員と複数の兼任助教が中核を担い、計算機資源や旅費等の継続的な財政支援を要望している。提案されているサイエンスは宇宙における銀河形成進化の全体像を把握しようというものであり、これまで日本で欠けていた取り組みであるため、全体的な方向性は有意義と考えられる。

(ID18) 系外惑星研究拠点形成

系外惑星の形成・進化から大気・気候・内部構造までの包括的理論研究と、すばるやせいめい望遠鏡による超高分散分光観測、ハビタブル惑星候補を探索する赤外トランジット観測、すばるKLM・宇宙望遠鏡でのトランジット分光による惑星大気観測等を連携して進める拠点を形成する提案である。宇宙における生命の存在を探る系外惑星研究は世界的な大潮流であり、その重要性は論を俟たない。科学研究部の中の柱として拠点を形成をし、戦略的に科学研究推進を図る意義は認められる。

(ID19) 電波・赤外線観測と理論に基づく星惑星形成領域から惑星系への進化の解明

電波・赤外線観測と理論研究に基づき星惑星系形成過程の解明を進める研究拠点を形成する提案である。原始惑星系円盤におけるダストとガス分布、分子組成・化学進化、円盤環境(乱流・磁場・放射・金属量)の効果を、観測と理論・数値シミュレーションを密接に組み合わせて明らかにすることを目指す。アルマ望遠鏡やすばる望遠鏡、TMT、そして将来的にはngVLAからのデータを活用する。科学的目的は非常に重要であるとともに人材育成への貢献も期待できる。

(ID27) 大規模広視野観測検討グループの構築

さまざまな望遠鏡の広視野観測により得られる大規模データを統合・提供するためのデータセンター整備を行う提案で、国立天文台が国内コミュニティに対して果たすべき重要な役割を担う構想といえる。広視野観測は日本が国際的に優位性を持つ分野であり、複数の観測装置から得られるデータを一元的に管理・解析可能なデータプラットフォームの整備は、天文学研究を長期的に支える基盤となることが期待される。国際的な標準に準拠したソフトウェア・ハードウェアの整備や、日本独自の機能の提示を通じて、国際的な役割分担の中での日本の貢献を明確にする意義もある。

§3.3.3.3 さらなる検討が期待される提案

(ID25) 遠赤外線テラヘルツ干渉計による天体の形成と進化の解明

遠赤外線テラヘルツ波領域で観測できるダスト熱放射、原子微細構輝線、水素分子(重水素を含む)や水分子(水の氷含む)の観測により、様々な天体の物理的・化学的および運動学的状態を明らかにすることで、宇宙の歴史における天体の形成および進化の過程を明らかにすることを目的とする提案である。南極に設置するテラヘルツ強度干渉計による高解像度テラヘルツ観測を実現し、その技術を用いてスペース遠赤外線強度干渉計による超高感度超高解像度の観測を目指す。世界的に遠赤外線観測の重要性が見直される中、実現すれば、観測としては画期的なものになると考えられる。

§3.3.4 天文台の設備を利用する提案

本カテゴリーは、多目的地上望遠鏡への装置単位の提案である。主として個人やスペース、技術を要求している。プロジェクト・センター内の科学目標となりうる。

(ID07) Ultra-Doppler - 地球の双子惑星を探索する超高精度ドップラー装置

恒星の視線速度を数cm/sの精度で検出できる可視光高分分光装置をすばる望遠鏡に設置し、太陽型星周りのハビタブル惑星候補を探索する計画である。高精度の視線速度観測は、すばる望遠鏡の極限補償光学装置SCEXAO/AO3000による可視光波長での高Strehl比回折限界観測、フォトリソグラフィによる高効率ファイバー入力、小型化によって高安定性を実現する分光器、光周波数コムによる高精度波長校正等を組み合わせることによって実現するとしている。Habitable World Observatoryなど地球型系外惑星の大気観測を目指す将来計画にターゲットを提供するという意義も高い。

(ID14) 恒星系の深・広視野探索で拓く銀河系・局所銀河群の化学動力学進化

「銀河系と局所銀河群における化学進化、力学的進化の解明」というテーマのもと、宇宙における物質の起源を明らかにすることを大目的として、「バリオン物質の起源解明」「ダークマターの本質解明」「銀河系を実験室として利用した星の運動と化学組成の探査」を具体的目標とする提案である。このために、すばる望遠鏡の観測装置PFSに高分散分光モードを新たに開発する。これと既存の装置群や将来の宇宙望遠鏡による観測を合わせて、恒星分光による銀河考古学を銀河系外縁部や局所銀河群にまで広げ、銀河の化学動力学進化を探るという科学的に重要なテーマで、さまざまな過程について新たな知見が得られることが期待される。国際的競争力も高いと評価される。

(ID28) 宇宙望遠鏡と地上望遠鏡の協調観測による系外惑星のキャラクタリゼーション

すばる望遠鏡に、熱近赤外(K-L-Mバンド)における高分散分光器(R=70,000)を新たに開発し、これまでに観測できなかった低温の褐色矮星の大気観測や、宇宙望遠鏡で観測された系外惑星大気のフォローアップを行い、これらの天体の大気の性質を調査する提案である。少量の分子の検出や大気の運動の測定といった地上望遠鏡の高分散分光の強みを活かし、宇宙望遠鏡と協調観測を推進することで、惑星系の多様性・普遍性の理解に貢献することを目指す。同波長帯で高分散分光を行う既存の類似装置としてVLTのCRIRES+があるが、CRIRES+が異なる波長帯を同時に観測することはできず、同時観測が可能な本提案の装置は高い観測効率に強みがある。また、TMTなどで地球型惑星の大気観測を狙う上での基盤としても重要と考えられる。

(ID29) 超精密分光観測による天文学

岡山188 cm望遠鏡およびせいめい3.8 m望遠鏡に天文コム搭載の新型分光器「Super-HRS」の開発と、すばる望遠鏡高分散分光装置HDSのアップグレードを行う提案である。これらを用い、超高分解能($\lambda/\Delta\lambda > 300,000$)、超広波長域(近紫外～近赤外)、視線速度精度10 cm/s以下、時間分解能10秒以下の高分散分光観測によって、恒星大気の動的描像の確立、系外惑星探査、および宇宙の化学進化史の解明を目指す。東京科学大学を中心に、国立天文台や多数の研究機関が協力している計画である。科学目標が明確である。外部資金による高精度分光装置の導入、そしてHDSのアップグレードは、国立天文台および天文学コミュニティにとって大きな資産となると考えられる。岡山での系外惑星探査は国際的にも強みがあり、若手研究者の参画も見込まれる。

(ID31) Exoplanet Imaging and Characterization with Subaru SCExAO and TMT-PSI

すばる望遠鏡の極限補償光学装置SCExAOによる系外惑星および原始惑星系円盤の直接撮像を発展させるとともに、それを技術的基盤としてTMTの高コントラスト装置TMT-PSI-blueを開発する提案である。TMT-PSI-blueにより、惑星や原始惑星系円盤中のダストの撮像分光、惑星大気組成の検出、円盤ダストの偏光観測、さらには太陽系近傍のM~K型星の地球型惑星の直接撮像およびバイオシグニチャーの検出も目指している。科学的意義は高く、TMT、さらにはHWOへの発展性・継続性があり、日本が主導的役割を果たす基盤として重要と考えられる。現在すでにすばる望遠鏡を活用した柔軟なR&D体制を構築して、継続的な技術革新と科学成果を実現している。今後も、NAOJ・ABC・大学・国際機関が連携し、極限補償光学・フォトニクスなど世界最先端の技術開発を推進するとともに、人材育成を促進していくことが期待される。

(ID43) すばるHSC-MB+PFSサーベイ: 高赤方偏移における大規模構造の探査

すばる望遠鏡のHyper Suprime-Cam (HSC) に新たに導入する中間帯域フィルターと、Prime Focus Spectrograph (PFS) を活かした、高赤方偏移の銀河サーベイの提案である。標準CDM宇宙論の検証

や大規模構造の形成現場を明らかにすることを目的とした、オーソドックスながら王道を行くサイエンステーマである。革新的な大発見ができるかどうかは未知数だが、一定の成果やレガシー的なデータの獲得は着実に期待できる。取得されたデータは、銀河進化やAGN統計、重力波天体のホスト候補特定など、幅広い分野への幅広い展開が期待できる。

§3.4 共通基盤の整備

天文データセンター、先端技術センター、天文情報センターは、それぞれ独立したミッションに基づき業務を担い、国立天文台の各プロジェクトを横断的に支える共通基盤としての役割を果たしている。同時に、センターの共同利用を通してコミュニティに開かれており、コミュニティの発展に貢献する役割も持つ。さらに、情報センターは最新の天文学や関連する技術の成果や情報提供をすることにより社会へ資する。これらの重要な役割を担うためにセンターは適切な規模で維持していく必要がある。また、科学研究部の活動は、観測と理論の橋渡しを行い、国立天文台を「観測・理論の連携による研究組織」として機能させている。これらの研究基盤は、国立天文台の国際的競争力を維持し、成果を出すための中核的要素であり、未来の天文学を切り拓く鍵となる。

§3.4.1 国立天文台のセンター

天文データセンターは、国立天文台が運用する観測装置(すばる望遠鏡、アルマ望遠鏡、国内望遠鏡など)で得られた膨大な観測データを保存・公開し、国内外の研究者が利用・再利用できる環境を整備している。天文データセンターが開発・運用している日本仮想天文台(JVO)は、世界中の天文学データベースを繋ぎ、その検索・解析環境を提供している。観測データを「二次利用できる科学資産」へと転換することで、オープンサイエンスの推進にも寄与している。さらに、AIや機械学習を用いたデータ駆動型天文学の新手法開発にも積極的に取り組んでいる。

先端技術センターは、天文学の最前線を支える観測装置および要素技術の研究開発を担う中核拠点である。光学・赤外・サブミリ波・電波といった多波長領域に対応する受信機、検出器、冷却装置、光学素子などの開発を行い、すばる次世代装置、TMT、アルマ望遠鏡アップグレード、KAGRA、SOLAR-Cなどの国際的な大型プロジェクトを技術面から支えている。特に、極低温技術、高周波受信システム、高精度光学加工などの高難度技術については、国内外の研究機関や産業界と連携して開発を進めており、日本の天文技術研究の拠点として不可欠な存在である。これらの技術成果は、量子センシングや通信技術など他分野への波及効果も生み出している。

天文情報センターは、最新の研究成果を市民や教育現場に分かりやすく伝える広報普及活動を展開し、市民天文学の窓口としての役割も果たしている。ウェブサイト、SNS、動画、公開イベントなどを通じて研究成果を社会へ還元するとともに、施設公開、学校出前授業、教材作成などを通じて「すべての人に天文学を」の理念を実現している。これらの活動により、国立天文台の研究成果が研究者だけの閉じた領域に留まることなく、社会・教育・産業へと広がる橋渡し役を果たしており、プロジェクト横断的な基盤として不可欠な存在といえる。

§3.4.2 科学研究部

科学研究部は、プロジェクト横断的なサイエンスに取り組み、新たな科学的価値の創出を目指している。観測、理論、情報科学など多様な専門分野の研究者が所属し、個々のプロジェクトや装置の枠を超えた研究活動を展開している。アルマ望遠鏡やすばる望遠鏡の観測成果を理論モデルや数値シミュレーションと統合して解釈する「観測・理論融合研究」や、AI技術を活用した多波長・マルチメッセンジャー天文学を推進している。また、国際共同研究の学術的推進、若手研究者の育成、大学との連携・教育活動のハブとしての役割も担っており、国立天文台の科学的価値向上に貢献している。

§3.5 第6期中期計画以降に向けて

国立天文台は、このサイエンスロードマップに則り、日本の天文学研究において自らが果たすべき役割を吟味しながら、将来計画を策定し様々なプロジェクトを推進・支援していくことが期待されている。近未来である第5期中期計画期間中においては、運用中のフロンティアプロジェクトである、すばる、アルマをそれぞれ「すばる2」「アルマ2」として位置付け、続く大型計画として建設進行中のTMT計画を推進していくことが国立天文台の主軸となる。これに理論天文学の中核研究施設である天文シミュレーションプロジェクトを優先プロジェクトとして、その実施形態を最適化しながら維持推進する。運営費交付金を用いた観測所運用である、野辺山宇宙電波観測所、水沢VLBI観測所は、生み出すサイエンスの価値とコミュニティからの期待のバランスを取りながら、その運用形態や規模、資金獲得手段などを工夫していく必要がある。その他、様々な既存プロジェクトは、他機関との連携や外部資金獲得の努力をしつつ、サイエンスの方向性・将来性を吟味しながら推進していかなければならない。その中には、他機関が主導しながら、国立天文台が重要な役割を担っているプロジェクトもあり、そうしたプロジェクトについては、主導機関との約束を果たす義務がある。こうした共同利用、共同研究および様々な研究開発を支える基盤施設として、先端技術センター、天文データセンター、天文情報センターの役割はますます重要となるであろう。そして、国立天文台全体の科学研究を推進し共同利用による科学成果の最大化を目指すため、各プロジェクトを科学面から支援する部門としての科学研究部の位置付けを明確にすべきである。提案された様々な研究拠点は、科学研究部をプラットフォームとして展開・推進されていくことが期待される。

本サイエンスロードマップに提案されたプロジェクトには、第6期中期計画以降に実現する大型プロジェクトも少なくない。すでにフロンティアプロジェクトとして認められているTMTは、実際の稼働は2030年代半ばとなる。アルマ2もその根幹となるWSUが完成して本格稼働するのは、第5期中期計画の終盤であろう。JASMINEの打ち上げは2030年代とされている。SKAも本格的な運用は第5期の終わりごろと想定されている。さらに、ngVLAや次世代重力波望遠鏡などは第6期あるいはそれ以降に実現する計画となっている。天文学全体の発展を考えた場合、国立天文台が将来、よりスペース天文学にコミットしていく方向を追及することは、コミュニティからも期待されている。LAPYUTA、GREX-Plus、HWOなどのスペースミッションは、いずれも他機関が主導するものであるが、こうしたプロジェクトにどういう形でどこまで関わるのか、これは第6期中期計画以降のサイエンスロードマップの主眼となると思われる。

しかしながら、現在、国立天文台の人的資金的リソースは非常に切迫しており、第5期中期計画期においても、すべての既存プロジェクトを100%維持し、さらに発展させる余地は非常に少ないと言わざるを得ない。基盤施設も全プロジェクトを支えるだけの十分なリソースを確保し続けることが難しい局面に入っている。また、共同利用機関として重要なコミュニティに対する様々な貢献—共同開発研究、研究集会サポート、大学支援、研究員・フェロー等の若手研究者育成など—も縮小を余儀なくされるような事態ともなっている。国立天文台が将来、より発展して、日本の天文学研究を支援・牽引し、日本が世界をリードし続けるようにするためには、将来を見据えた新たな研究プロジェクトの芽を育て、コミュニティ全体を底上げするような仕組みが必要である。現在の国立天文台を取り巻く厳しい環境を鑑みるに、既存プロジェクトの単なる維持継続すら簡単ではないことは明らかであり、いかにして国立天文台のリソースを将来大きな花を開く可能性のある新しい試みに割くのか、既存プロジェクト推進と将来への取り組みのバランスをどこに置くのか、その方策は第5期中期計画期間前に具体的に検討を開始し、第5期の間にも実現していく必要がある。

第6期中期計画以降を考えた場合、どのプロジェクトは次に繋がるのか、既存プロジェクトの科学的価値はいつまで有効なのか、コミュニティとの連携によって新たな方向性を獲得する余地はあるのか、などを真摯に検討し、ある程度大胆な改革方針を策定しなければならないだろう。現行プロジェクトの運用方式の発展的改革を行い、そこに新たな大型プロジェクトを育てる基盤を築くことも重要である。そうした検討と具体策の実施を今から第5期中期計画期間にかけて行っていかなければならない。とは言え、第5期中に現行のフロンティアプロジェクトを中止したり大幅な縮小や改変を行うことは、コミュニティからの強い需要・要望があり、また、文部科学省からの強い支援がある中で、適切なことではない。国立天文台が、コミュニティの意向を無視して独断でフロンティアプロジェクトの方向性を変えてしまうようなことが起これば、コミュニティおよび政府からの信頼を失い、ひいては共同利用機関としての崩壊にも繋がりがかねない。もちろん、様々な要因により、フロンティアプロジェクトと言えども中断、最悪の場合には断念せざるを得ない状況も起こりうる。その場合にどのようにソフトランディングして次に繋げるのかは、プロジェクト推進中にもプランBとしてコミュニティと共に常に検討しておく必要がある。国立天文台はフロンティアプロジェクトの実施機関であり、その推進に全面的な責任を負うが、プロジェクトが重大に危機に陥った場合、どのように方向性を位置付けるのかの最終判断はコミュニティと国立天文台が連携して行うべきである。

第5期においては、国立天文台は、コミュニティとの意思疎通を大事にして連携を深めつつ、フロンティアプロジェクトを今後どのように進めていくか、新しい芽をどのように育てていくか、既存のプロジェクトをどのように整理・発展させるか、を一緒に検討していくことが重要である。第6期中期計画期間は、第5期よりさらに厳しい状況が待っている可能性があることを深く認識し、最悪の状況を想定したプランを第5期の間に練り、準備をしていく必要がある。ここで注意すべきは、そうした「プラン」はあくまで将来を見据えた大きな流れ「サイエンスロードマップ」に則ったものでなければならないということである。したがって、国立天文台のサイエンスロードマップは不断に見直しを行い、国立天文台が目指すべき道筋を照らすものとなっていなければならない。第6期以降のプランを練るさいには、現実に合わせてることを重視しすぎて大きな流れを見誤って縮小再生産に陥る、現状維持に汲々とするあまり新しい芽を育てることを阻害する、あるいは逆に、守るべきものを切り捨ててしまっている、といった罫に落ちていないかをくりかえし精査して臨むことが肝要である。

国立天文台を取り巻く環境が厳しさを増す中、プロジェクトの推進・運用にかかる困難さは増し、時には痛みを伴う改革も必要とされるであろう。そうした状況においては、往々にして、関係者に大きなストレスがかかる。そして、コンプライアンス違反やハラスメント等の問題行動を引き起こす可能性がある。また、関係者のモチベーション低下やメンタル危機を誘発し、荒廃した雰囲気の中で、全体のパフォーマンスに重大な影響が及ぶことも考えられる。こうしたストレスフルな状況が想定される中であるからこそ、なおさらプロジェクトや研究開発の現場におけるコンプライアンス遵守やハラスメント防止は重要であり、そのための方策も同時に進める必要がある。しかも、そうした方策は、職場の活気あるポジティブな雰囲気を損なわずに行わなければならない。これは簡単なことではないが、国立天文台として常に気を配るべき事項であり、あえてこの場で注記しておく。

補足資料

§A.1 執筆者

§2については、以下の方々に執筆いただいた。また、SRM委員が編集を補佐した。

§2.1 宇宙論・・・郡和範(科学研究部)

§2.2 銀河形成と宇宙進化・・・大内正己(科学研究部)

§2.3 恒星・高密度天体・極限物理・マルチメッセンジャー天文学・・・富永望(科学研究部)

§2.4 太陽と星・・・石川遼子、勝川行雄、成影典之(太陽観測科学プロジェクト)、下条圭美(アルマプロジェクト)

§2.5 星惑星系形成・・・野村英子、原田ななせ(科学研究部)

§2.6 惑星系と生命探査・・・生駒大洋、藤井友香(科学研究部)

そのほかの章は、以下のSRM委員が執筆・編集を行った。

SRM委員会内部委員・五十音順

井口 聖 (アルマプロジェクト)

生駒 大洋 (科学研究部)

齋藤 正雄 (副台長・(財務担当))

都丸 隆行 (重力波プロジェクト)

竝木 則行 (RISE月惑星探査プロジェクト)

野村 英子 (研究連携主幹)

藤井 友香 (副委員長・科学研究部)

本原 顕太郎(委員長・先端技術センター)

吉田 道利 (副台長・(総務担当))

SRM委員会外部委員・五十音順

秋山 正幸 (東北大学大学院理学研究科)

石原 安野 (千葉大学ハドロン宇宙国際研究センター)

高田 昌広 (東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構)

高橋 慶太郎(熊本大学大学院先端科学研究部)

濤崎 智佳 (上越教育大学大学院学校教育研究科)

戸谷 友則 (東京大学大学院理学系研究科)

堀田 英之 (名古屋大学宇宙地球環境研究所)

渡邊 誠一郎(名古屋大学大学院環境学研究科)

河野 孝太郎(東京大学大学院理学系研究科)

住 貴宏 (大阪大学大学院理学研究科)