

記 録

文書番号	S C J 第 26 期 080911-26510300-104
委員会等名	日本学術会議物理学委員会天文学・宇宙物理学分科会
標題	天文学・宇宙物理学の長期計画 － 2030-2040 年代のビジョン － (改訂版)
作成日	令和 8 年 (2026 年) 9 月 11 日

※ 本資料は、日本学術会議会則第二条に定める意思の表出ではない。掲載されたデータ等には、確認を要するものが含まれる可能性がある。

この記録は、日本学術会議物理学委員会天文学・宇宙物理学分科会の審議結果を取りまとめ公表するものである。

日本学術会議物理学委員会天文学・宇宙物理学分科会（第26期）

委員長	奥村 幸子	（第三部会員）	日本女子大学理学部数物情報科学科教授
副委員長	浅井 歩	（連携会員）	京都大学大学院理学研究科附属天文台准教授
幹 事	長尾 透	（連携会員）	愛媛大学宇宙進化研究センター教授
幹 事	藤澤 健太	（連携会員）	山口大学大学院創成科学研究科教授
	倉本 圭	（第三部会員）	北海道大学大学院理学研究院教授
	杉山 直	（第三部会員）	東海国立大学機構副機構長/名古屋大学総長
	生田ちさと	（連携会員）	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所学際科学研究系准教授
	今田 晋亮	（連携会員）	東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻教授
	大朝由美子	（連携会員）	埼玉大学教育学部/大学院理工学研究科准教授
	梶田 隆章	（連携会員）	東京大学卓越教授
	河北 秀世	（連携会員）	京都産業大学理学部宇宙物理・気象学科教授
	坂井 南美	（連携会員）	国立研究開発法人理化学研究所主任研究員
	佐々木 晶	（連携会員）	大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻教授
	新永 浩子	（連携会員）	鹿児島大学学術研究院理工学域理学系准教授
	住 貴宏	（連携会員）	大阪大学理学研究科宇宙地球科学専攻教授
	田代 信	（連携会員）	埼玉大学大学院理工学研究科教授
	常田 佐久	（連携会員）	千葉工業大学天文学研究センター所長
	中畑 雅行	（連携会員）	東京大学名誉教授
	林 正彦	（連携会員）	日本学術振興会ボン研究連絡センター長
	深川 美里	（連携会員）	東北大学大学院理学研究科教授
	藤井 良一	（連携会員）	大学共同利用機関法人情報・システム研究機構国立極地研究所特任研究員
	村山 斉	（連携会員）	カリフォルニア大学バークレー校物理学科教授／東京大学国際高等研究所カブリ数物連携宇宙研究機構教授
	山崎 典子	（連携会員）	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所教授
	山田 亨	（連携会員）	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所教授

渡部 潤一

(連携会員)

京都産業大学神山宇宙科学研究所長特別客員教授

本記録の作成にあたり、以下の方々に御協力いただいた。

高田 昌広	東京大学国際高等研究所カブリ数物連携宇宙研究機構教授
井上 昭雄	早稲田大学理工学術院先進理工学部教授
田中 雅臣	東北大学大学院理学研究科教授
成田 憲保	東京大学先進科学研究機構教授
田越 秀行	東京大学宇宙線研究所教授
小久保英一郎	自然科学研究機構国立天文台天文シミュレーションプロジェクト教授
荻尾 彰一	東京大学宇宙線研究所長
吉田 滋	千葉大学大学院理学研究院教授
森山 茂栄	東京大学宇宙線研究所教授
田村 陽一	名古屋大学大学院理学研究科教授
栗田 光樹夫	京都大学大学院理学研究科教授
日比野 欣也	神奈川大学工学部応用物理学教授
中澤 知洋	名古屋大学素粒子宇宙起源研究所准教授
下条 圭美	自然科学研究機構国立天文台アルマプロジェクト准教授

本記録の作成にあたり、以下の職員が事務及び調査を担当した。

事務	渡邊 英一郎	参事官（審議第二担当）
	角田 美知子	参事官（審議第二担当）付参事官補佐
	加藤 雅之	参事官（審議第二担当）付審議専門職付
調査	辻 政俊	上席学術調査員

目次

1	はじめに	1
(1)	記録（改訂版）策定の背景と意図	1
(2)	天文学・宇宙物理学の果たす役割	2
(3)	我が国の天文学・宇宙物理学の発展と大型研究基盤の役割	5
(4)	研究者コミュニティによる長期計画の提案	6
(5)	私たちの学術と社会	7
2	2010年代以降の成果と2030-2040年代の展望	13
(1)	宇宙論	13
(2)	銀河	18
(3)	活動銀河核と巨大質量ブラックホール	21
(4)	星・高密度星・元素合成	23
(5)	星・惑星系形成と星間化学	26
(6)	太陽系外惑星	28
(7)	太陽	32
(8)	粒子線・ニュートリノ・ダークマター	34
(9)	重力波	37
(10)	コンピュータ・シミュレーション	39
3	推奨する天文学・宇宙物理学分野の長期計画と課題	42
(1)	推奨する天文学・宇宙物理学分野の長期計画	42
(2)	長期計画実現に向けた課題ー共同利用	44
(3)	長期計画実現に向けた課題ー国際協力	48
(4)	長期計画実現に向けた課題ー人材育成	50
4	各研究者コミュニティの将来計画	55
(1)	電波天文学分野の計画	55
(2)	光学・赤外線天文学分野の計画	63
(3)	宇宙線分野の計画	69
(4)	高エネルギー天文学分野の計画	72
(5)	太陽物理学分野の計画	76
	<参考文献>	80
	<用語集>	82
	<参考資料1>	87
	<付録>	88

1 はじめに

(1) 記録（改訂版）策定の背景と意図

日本学術会議の天文学・宇宙物理学分野では、これまで研究者コミュニティの意向を反映した大型研究基盤計画を取りまとめ、その実現に向けた提言を定期的に行ってきた。例えば、第15期日本学術会議天文学研究連絡委員会は、1994年に「21世紀に向けた天文学長期計画について」[1]と題する報告書をまとめている。さらに、2010年に第21期日本学術会議物理学委員会天文学・宇宙物理学分科会（以下、「分科会」とする）が「天文学・宇宙物理学の展望と長期計画」[2]（以下、「2010年報告」とする）を、2014年には第22期分科会がそこではカバーしきれなかった相補的な計画を取り上げた「天文学・宇宙物理学中規模計画の展望」[3]（以下、「2014年報告」とする）を、それぞれ学術会議の「記録」として公表している。これらの発出からほぼ10年が経過し、報告書で提案された大型研究基盤の一部は実現あるいは建設中である一方、いくつかの計画はそれらの進展を受けて再検討が必要となった。

そこで、第25期分科会では、広く研究者に呼びかけ、2030年から2040年代にかけて実現すべき大型・中型研究基盤の提案を募り、これらの長期計画を取りまとめた。提案されたすべての計画は、分野別の研究者コミュニティに検討を依頼し、学術的価値、実現可能性など様々な観点から評価した上で推薦に値する計画の提案を受けた。このような過程を経て推薦された長期計画を、分科会で再度慎重に議論し、それらの学術的意義とともに記録として残した[4]（以下、「2023年報告」とする）。

第26期分科会は、前回の記録から3年が経過したのみであるが、第25期日本学術会議にて新たに発出された提言「未来の学術振興構想（2023年版）」[5]を踏まえ、そこに提案された天文学・宇宙物理学分野の長期計画を主な対象として、「2023年報告」[4]と同様なプロセスで、2030年から2040年代にかけて実現すべき大型・中型研究基盤計画を「天文学・宇宙物理学の長期計画 ―2030-2040年代のビジョン―（改訂版）」という形でとりまとめることとした。

したがって、1章及び2章は部分的な改訂とし、3章で、「未来の学術振興構想」を踏まえて、第26期に新たに推奨する天文学・宇宙物理学分野の長期計画とその課題をまとめた。4章は、分野別の研究者コミュニティによる第26期後半時点での将来計画の検討状況である。

(2) 天文学・宇宙物理学の果たす役割

歴史上最古の学問の1つである天文学は、我々が住む世界とは何かを知るための営みである。そしてそれは、哲学的思索と実際の観測事実に基づく定量的な検証の積み重ねを経て進歩し続けてきた。その結果、暦計算や航海術に不可欠な実学としての役割をも担ってきた。例えば、ガリレオ・ガリレイは望遠鏡が開発されたという情報を受けて、直ちに天体観測のための望遠鏡を自作し、月、金星、木星とその衛星、土星の輪、太陽の黒点などを詳細に観測した。その結果は、アリストテレス的世界観を覆し、観測に基づいた現代的宇宙観への変革を迫るものとなった。この例は、実証と合理的推論を通して真実を明らかにするという近代科学の方法論の先駆けであり、その後百科に分岐して発展する近現代科学の源泉となった。以来、宇宙を知る営みである天文学は、宇宙を支配する法則を探求する物理学とともに、人類の知の創造に本質的に寄与し続けている。

宇宙に始まりがあったことを示す宇宙膨張と、遺伝のメカニズムを解明した二重らせんの2つは、20世紀の大きな科学的発見であろう。そして、21世紀になり、今やこの宇宙と生命が1つの大きな研究分野を創成しつつある。

20世紀の天文学・宇宙物理学の到達点については、2010年報告[2]に詳しい。ここでは、その中から特に知の創造に寄与する4つの観点、①宇宙と物質の起源、②宇宙における天体と生命の共進化、③宇宙の新たな謎の発見、④宇宙への展開と地球文明の未来、を概観しておく。

① 宇宙と物質の起源

この宇宙を構成する物質をどこまでも分割し、その基本構成要素が従う基本法則を明らかにする、このいわゆる要素還元的方法論は20世紀の物理学において大きな成功を収め、その結果は、クォークとレプトンと呼ばれる素粒子が従う標準素粒子モデルを確立させた。しかしながら、この微視的世界とは対極にある巨視的宇宙は、この標準素粒子モデルだけでは記述できない。

宇宙を占める物質の大半が、標準素粒子モデルから構成される元素だけでは説明できない可能性は、20世紀後半の天文学観測によって示唆されていた。そして、20世紀末から21世紀初頭にかけての宇宙マイクロ波背景放射全天地図の精密な解析により、現在の宇宙を特徴付けるパラメータ（宇宙の膨張率、宇宙年齢、宇宙の密度）が極めて高い精度で推定できるようになった結果、宇宙を構成する物質の95%は、標準素粒子モデルでは記述されないダークマターとダークエネルギーによって占められてい

ることが明らかとなった。この事実は、地上実験だけでは知ることのできない標準素粒子モデルを超えた物理学を、天文学観測を通じて探求できることを証明した。

つまり、素粒子物理学が記述する微視的世界は巨視的宇宙と密接に関係しており、両者の相補的研究の進展無しには、宇宙と物質の起源は解明できないのである。重力波を用いた一般相対論の精密検証と重力波天文学の開拓、宇宙背景重力波検出を用いた宇宙のインフレーション理論の検証、遠方天体からの高エネルギーニュートリノの検出など、素粒子物理学・原子核物理学・相対論・高エネルギー宇宙物理学の垣根を超えた学際的研究は、既存の物理学では説明できないダークマター、ダークエネルギー、インフレーションを解明し、新たな世界観を確立する上で不可欠である。

② 宇宙における天体と生命の共進化

宇宙には、惑星、恒星、星団、銀河、銀河団などに代表される様々な天体種族が存在する。それらは、質量にして約 20 桁もの範囲にわたり、下位の天体が重力的に集団化して上位の構造を形成するという階層構造をなしている。一般相対論的宇宙論の枠組みに沿ってそれらの誕生と進化を解明するのが天文学の主たる目的の1つである。

そのような天文学的知見の飛躍的拡大を支えるのは、伝統的な可視光にとどまらず、電波、赤外線、紫外線、X線、ガンマ線、さらにはニュートリノ、宇宙線、重力波に至る様々な手法を用いた極限観測技術である。

1990年代に初めて発見された太陽系外惑星の研究は、21世紀に入って飛躍的進展を遂げている。これは宇宙における地球の占める位置のさらなる相対化にとどまらず、我々人類の存在にも重要な示唆を与えつつある。太陽系内天体に生命の起源を探るサンプルリターン、さらには、太陽系外惑星に生命存在の指標たるバイオシグニチャーを観測する試みは、惑星科学と天文学の最前線となっている。

少なくとも、地球の生命の原材料は、宇宙誕生初期から存在する水素に加えて、その後誕生した恒星の内部で合成された炭素、酸素、窒素である。宇宙における天体の進化の帰結である元素合成と循環は、生命の誕生と不可分である。このように、宇宙とは天体と生命が共進化する舞台にほかならない。

地球のみならず、宇宙における生命の普遍性の探求は、惑星科学や天文学にとどまらず、物理学、化学、生物学を含む自然科学における最も根源的な問いである。21世

紀は、すべての自然科学の最新の知見を駆使して、宇宙における生命の起源の解明を目指す時期である。

③ 宇宙の新たな謎の発見

20世紀後半には、観測・理論・実験を支える観測装置やコンピュータ技術が大きく発展し、宇宙に関する理解が著しく進展した。天文観測衛星と惑星探査機は、身近な月や太陽にも数々の発見をもたらし、この地球を取り巻く世界についての人間の理解はより総合的・統一的なものへと進んでいる。しかしながら、それらの研究の進展が必然的に新たな謎の発見につながることは、科学の歴史が示してきたとおりである。既に①で述べたように、ダークマターとダークエネルギーの存在、さらには広く認められているインフレーション仮説は、21世紀に残された重要な未解明の謎である。それらの解決には、宇宙の極限観測技術の発展が不可欠である。その結果がどのような形の解決を見るかは現時点では予想できないものの、その先にさらに深いレベルでの新たな謎が待ち受けていることは確実である。宇宙の果てにある第一世代天体の発見、太陽系内天体の生命始原物質の発見、太陽系外惑星における生命の兆候の発見、ダークマター粒子の同定、原始背景重力波の発見など、天文学・宇宙物理学の最先端研究は、いずれも新たな謎の発見の可能性を秘めている。そして、それらが将来のさらなる世界観の革命をもたらすであろう。

④ 宇宙への展開と地球文明の未来

陸から海・空へ営々と生存圏を拡大してきた人間にとって、20世紀は広大な宇宙へステップを踏み出した世紀でもあった。宇宙は新たな活動の場となり、新たな知の宝庫となる。とりわけ宇宙空間（スペース）からの宇宙観測を進めている多彩な天文観測衛星、惑星や衛星の驚くべき世界の姿をもたらした無人探査機の活躍は目覚ましく、太陽系の認識は大きく書き換えられつつある。宇宙の探査は今、かつての大航海時代に続いた18世紀から19世紀の地球の科学探査の時代にも匹敵する時代にある。また、月面や宇宙環境でのその場分析や物質開発研究など、工学分野や物質科学分野との連携研究も大きく進むと期待される。人間が宇宙空間での活動を拡大し、宇宙空間を利用して宇宙・自然をさらに理解しようと努め、科学の発展と宇宙へのさらなる展開に力を尽くすのは、21世紀の自然な流れであろう。

私たち人間は、このような営みの結果として自然・宇宙を理解することで、今生きていることの意味を知り、自分自身とはどういう存在かを理解してきた。20世紀に獲得した認識を基礎に、21世紀の人間は宇宙の中の存在としての自己認識をさらに深めていこう。

今、拡大する一途の人間活動が地球規模の環境変化を引き起こしている。確かに科学・技術・産業は、急激な拡大の結果として環境に看過できない変化をもたらした。一方で、そうした環境変化の認識も科学によって獲得された認識なのである。人間活動の環境への影響を認識しなかった時代に比べれば、私たちの環境認識は確実に前進を遂げている。文明自体の危機すら叫ばれ始めている現在、地球と人類持続の指針を提示することは、21世紀の科学の重大な責任であることを認識しなければならない。これからは、環境変化に留意した学術の推進が必要となるだろう。そこでは、科学がもたらす宇宙・自然・生物・人間の総合的な理解の前進が、人間活動それ自身へのより高い理解と、優れた指針をもたらすことを期待したい。天文学・宇宙物理学は、大きな自然と歴史的・科学的視点から、そうした活動に寄与していくことができるだろう。

(3) 我が国の天文学・宇宙物理学の発展と大型研究基盤の役割

我が国の天文学・宇宙物理学分野の研究者は、過去半世紀以上にわたって、高い国際競争力を持つ地上観測装置や宇宙望遠鏡などの大型研究基盤施設を建設してきた。これらの装置は、日本独自の共同利用という優れたシステムを通して、主として国内の大学・研究機関に所属する研究者に広く利用され、天文学・宇宙物理学研究の発展に本質的な貢献を行ってきた。大型研究施設を用いた共同利用は、当初は大学に附置された研究所等を中心に行われてきたが、やがて装置の大型化や予算の増大に伴って、1981年には宇宙科学研究所が、1988年には国立天文台が相次いで大学共同利用機関として設置されるに至り、我が国の天文学・宇宙物理学分野の研究の中核を担うこととなった。一方で、大学附置の研究所では、各々特色のある装置や研究テーマによって、当該分野の共同利用を現在に至るまで推進している。

人材育成という観点からも、このような共同利用システムが我が国の天文学・宇宙物理学の発展に与えた影響は絶大である。すなわち、共同利用システムによって、大学院生やポスドクなどの若い世代の研究者に、あるいは必ずしも研究環境が整ってい

ない比較的小さな大学の研究者にも、第一線の研究機会が提供されてきた。世界をリードするスペースミッションやすばる望遠鏡の建設など、世界最先端研究施設を共同利用することで、宇宙科学研究所設立以来の45年間で、国内の天文学・宇宙物理学に携わる研究者数は大幅（日本天文学会の特別会員・正会員数は4倍以上）に増大した。年齢や所属を問わず、多数の研究者が最先端の研究設備を用いて成果を挙げることで、日本の研究レベルは世界の第一線に並ぶに至った。さらに、多くの大学と共同利用を担う機関との共同研究によって、大型装置を補完する独創的な研究装置・施設が実現され、研究の裾野は大きく広がってきた。

この分野における観測施設の大型化の流れは必然であり、日本にとどまらず世界的な潮流である。その結果として、建設予算の増大に伴い、税金によって建設される大型計画の推進にあたっては国民の理解は不可欠であるとともに、国際協力・連携も当然の前提となりつつある。このような状況の中、純粋に基礎科学の発展を目指すボトムアップの大型計画の中で、どれが最も重要な計画であり、早期の実現が望まれるかについて、当事者である研究者集団（コミュニティ）が真剣な議論を通じて合意を形成した上で、広く国民に提案して理解を得るとともに、その結果については責任を負うことを明確に示すべきである。

(4) 研究者コミュニティによる長期計画の提案

研究者コミュニティが中心となって大型計画を推奨する手続きは、例えばアメリカ合衆国のディケイダル・サーベイ[6]がよく知られている。その最初の報告書は1964年に提出され、直近では2021年に第7期の報告書が発出されている。この間、ディケイダル・サーベイはアメリカ合衆国における天文学・宇宙物理学分野の大型研究基盤の実現に向けた指針を与えると同時に、その発展に必要不可欠の役割を果たしてきた。

ヨーロッパでは、基礎科学の大型研究基盤を担う国際機関として、1954年に欧州原子核研究機構（CERN）が、1964年にヨーロッパ南天天文台（ESO）が発足している。これらは、第二次世界大戦で荒廃したヨーロッパを前に、どのようにしてヨーロッパの基礎科学研究を再生すべきかという研究者による議論を受けて設立に至っている。また最近では、ヨーロッパにおける大型研究基盤のロードマップを作成するためにESFRI[※]（参考資料 用語集参照）などのシステムも整備された。

日本においても、研究者コミュニティの議論による合意形成を経て大型地上望遠鏡や科学衛星を実現していくシステムは、1970年代¹には始まっていた。特に、1982年に完成した東京天文台（当時）野辺山宇宙電波観測所は、ミリ波帯の電波望遠鏡としては世界最大口径の45m望遠鏡を有し、「共同利用」を通して広く全国の大学等研究者による利用を促進した。その成果は、日本の電波天文学の水準を世界の第一線に押し上げたと同時に、天文学・宇宙物理学の研究者が日本の多くの大学に広がる端緒となった。

1980年代に入ると、光学・赤外線天文学分野の研究者コミュニティである光学赤外線天文学連絡会が発足し、世界最大口径の地上大型光学赤外線望遠鏡を建設する機運が高まった。この望遠鏡は1991年に予算措置がなされ、1999年に完成し、すばる望遠鏡として現在に至っている。

これらは、コミュニティでの議論の開始から早くても10年以上、場合によっては20年以上の歳月をかけて実現されていく長期計画である。天文学・宇宙物理学分野の学術的課題は、素粒子物理学分野などと並んで根源的かつ深淵であり、十分長い年月をかけて多数の研究者が検討の上に検討を重ね、国民に是非を問いつつ進めていく仕組みが築かれている。

(5) 私たちの学術と社会

ここまでは、純粹に学術という立場から天文学・宇宙物理学の重要性を述べてきた。しかし、この分野は社会活動からは距離のある基礎科学という側面のみならず、実はほかの様々な学術分野とも影響を与え合い、さらには我々の生活と密接に関係する実学的な性格をも併せ持つ。ここでは、そのような観点から天文学の意義を述べてみたい。天文学が実用的な知見を提供して、社会を築く一助となってきた代表的な例は暦である。暦の決定は、社会に共通の時間軸を与えると同時に、農耕や漁業など、第一次産業でのタイミングを測るためには必須であった。さらに、海を渡るための航海術に用いられるなど社会の交流にも役立ってきた。暦の作成は、現代でも天文学の社会への貢

¹ 電波天文学研究者のコミュニティである宇宙電波懇談会は1970年に発足した。なお、素粒子物理学の研究者を中心とした宇宙線研究者連絡会議は1953年に発足している。

献として重要であり、日本では国立天文台の暦計算室が毎年の暦の基本となる暦要項を発出し、春分・秋分を定めることで対応する祝日が決まっている[7]。

また、近代になると天文学は物理学や化学の発展にも多大な影響を及ぼし、我々の世界を形作るものの理解も進めた。太陽の光を分光したことで分光学が発達し、化学の一大分野となったばかりか、星やその周りのガスや塵に含まれる元素が、私たちの体を構成する元素と同じであることが分かってきた。これらの元素が恒星の中における核融合で生み出されることも分かると、宇宙と我々の繋がりが明確になった。分光学は、光を通して物質を「観る」学問である。そのため、20世紀に入って分光学が独自の発展を遂げると、今度は逆に天文学に大きな発展がもたらされた。光の波長ごとの特性を利用することで、天体や宇宙にある物質の組成を詳細に調べられるようになったからである。その結果、核融合で生み出された様々な元素が材料となり、星間空間でも複雑な分子が生成されていることが分かってきた。現在では300種近くもの数の様々な星間分子の存在が明らかとなり、隕石・小惑星などで検出される先太陽系有機物質との関連で、それらの星間分子の存在の普遍性や生成過程の解明に注目が集まっている。

一方、1990年代に入り太陽系外惑星が次々に発見され始めると、直接的に宇宙生命を探すための研究も本格的になった。20世紀に発展を遂げた極限環境生物学の研究に影響される形で、太陽系外惑星や木星・土星の衛星の地下の海などにおける原始的生物の存在可能性などが真剣に議論され始めたからである。地球惑星科学分野における太陽系内の探査研究と並行して、生命活動の兆候であるバイオシグニチャーを太陽系外惑星で探す研究など、現在本格的な研究が進みつつある。

このように、核融合で生み出された元素から私たち生命が誕生するまでの化学的な歴史を探求すること、そして地球以外の惑星や衛星に生命の痕跡を探すことは、この宇宙における生命の普遍性を探る上で不可欠であるとともに、天文学のみならず化学や生物学分野の研究にも深く関わる重要な課題となりつつあり、現在では宇宙生物学という分野として進展しつつある。

また、空間の概念、いわゆる宇宙観も天文学の発展によって変遷していった。地球が宇宙の中心であるという天動説は17世紀頃から次第に地動説へと変化し、星座をつくる恒星たちが、実は極めて遠方にある太陽のような恒星であることが明らかになり、20世紀には太陽さえも銀河系のかなり端にあることも分かってきた。この宇宙観の変遷は、我々が特別な存在ではないという視点を与えてくれつつある。地球が環境的に生命にと

ってバランスの取れた惑星である一方、そのバランスの危うさを明らかにすることで、気候変動やカーボンニュートラルに対する認識を深める一助として、天文学・宇宙物理学・惑星科学は大きく寄与している。

天文学は、長い時間軸で、かつ広い視点で物事を捉え、考察する格好の基礎科学分野である。将来の社会を担う若手がこうした視点を獲得することは、未来の日本や世界にとって極めて重要であろう。この考えは、天文学分野が人材教育や広報、普及活動を積極的に行う原動力となっている。得られたデータは画像化され、積極的に公開されているが、そこで見られる多くのアート作品のような美しい天体画像は、多くの人を魅了し、最近では美術館でこれらの天体写真展が開催されるなど人気を博しており、国民のQOL(生活の質)の向上に貢献している。一方、日本では学校教育の中で本分野を学ぶようになってだけでなく、生涯学習施設として科学館やプラネタリウム、公開天文台等の施設が多く存在し、教育に大きな貢献をしている。子供の頃に、こうした施設に通い続けて、その才能を伸ばし、世界的な学者になった例は少なくない。ちなみに、日本のプラネタリウム観客数は年間約800万人で、少なくとも2019年のJリーグの観客動員数に匹敵している[8]。

天文学は、もともと国際協力が必須であった。天文学の地上観測の場合、天球上の座標系や星座などを世界共通で決めておかないと、適切な情報交換ができないからである。また、突発的な天体現象が起こった場合、それを発見した後に継続的に観測する必要がある。発見地域が昼になると当然ながら見えなくなることが多いため、地球上の別の地域で観測を依頼する時には共通の座標が必要であった。そのため、この種の国際学術団体としては極めて早期の1919年に国際天文学連合が日本を含む7か国で創立され、天球の座標系決定とともに88星座が制定されたのである。20世紀になると、天体観測手法が多様化していくと同時に、望遠鏡などの装置が大型化し、国際協力の必要性は別の意味で大きくなっていった。一国ではなかなか実現不可能な巨額のプロジェクトになるケースが生まれてきたからである。現在、多くの国際協力によるプロジェクトがあり、地上の大型望遠鏡や宇宙の探査などが実現している。実際、本分野での研究論文の多くは国際共著論文である。こうした研究者の国際交流を通じて、社会全体の異文化への相互理解に貢献していることは確かである。

天文学の社会への貢献は、これだけにとどまらない。天文学の観測には最先端の技術が必要であり、イノベーションを起こしている側面があるからである。天文学における

研究開発によって発展した技術は、社会へ応用され、医療から空港のセキュリティまで、私たちの日常生活に不可欠なものを産んでいる。

電波天文学で開発された干渉計技術は、もともと広範囲に配置した多数の小型の電波望遠鏡で同時に同一の天体を観測し、その信号を電氣的に合成することで、非常に大きな望遠鏡で観測するのと同じ解像度を得る方法である。最近では地球上のいくつかの電波望遠鏡を組み合わせ、銀河中心のブラックホール・シャドウの画像化に成功したイベント・ホライズン・テレスコープ・プロジェクトが有名である。この手法は「開口合成」とも呼ばれ、ノーベル賞を受賞した電波天文学者マーティン・ライルによって開発されたものだが、現在は核磁気共鳴画像法（MRI）の医療診断における画像の解像度の向上やスキャン時間の短縮に貢献している。また、宇宙から飛来する高エネルギー放射線を観測する技術は、コンピュータ断層撮影（CT スキャン）という医用画像診断技術の発展に寄与した。

電波天文学によって発見された星間分子 HC_5N を実験室で再現生成させようとする過程では、フラーレン C_{60} が発見された。フラーレンは、現在では医薬品開発や電子材料への応用にも使われ始めており、天文学者を含む発見者らは、1996年にノーベル化学賞を受賞している。そしてまた逆に、吸収分光研究の発展により、2015年にはフラーレンが星間空間に存在することが証明され、長年の謎であった DIB (Diffuse Interstellar Bands) [※] と呼ばれる宇宙から届く光に見られる吸収線群の原因の 1 つがこのフラーレンであることも示された。これは、宇宙という極限環境下での現象の研究が、新たな化学分野の研究や実学に発展しただけではなく、フィードバックとして天文学にも影響を与えた良い例とも言える。

また、オーストラリア連邦科学産業研究機構（CSIRO）の研究チームは、ブラックホールから放射される電波を解析するために開発した技術を用いて、無線で情報を伝送する新しい技術を開発した。電波信号は周囲の物体の表面で反射するために情報の伝達に乱れが生じるが、そのような環境でも電波を利用できるマイクロチップを開発したのである。この特許によって、現在の Wi-Fi が生まれ、現代の我々の生活を支える技術の 1 つとなっている。

計算機分野では、膨大なデータを処理するための計算資源の確保の方法として、共通のネットワークを介したグリッドコンピューティング技術がある。その先駆的な例が 1999年に始まった代表電波天文学者による地球外知的生命体探査 SETI (Search for

Extra-Terrestrial Intelligence) であった。一般家庭の膨大な PC を繋ぎ、アレシボ天文台で受信した信号のデータ解析を行うとともに、科学の重要課題の解明に市民が参加する市民科学プロジェクトとして、2020年3月で終了するまで、170万人以上が参加し、広報普及事業として成功を収めた。天文学分野では、その後、欧州を中心に「ギャラクシー・ズー」や日本の「ギャラクシー・クルーズ」などの市民科学プロジェクトに引き継がれ、成果を収めている。

また、現在、正確な時刻を維持するために天文学者は尽力している。世界中の様々な機関に数百個の原子時計を高精度で運用し、世界の時刻のベースとなる国際原子時 (TAI) を国際度量衡局 (BIPM) が管理している。一方、日常生活に合わせて使うのは地球の自転と公転を基にした世界時 (UT) で、BIPM と国際地球回転・基準系事業 (IERS) は、国際原子時を基に、天文観測から決まる UT とのずれが ± 0.9 秒を超えないよう「うるう秒」による調整を加えた協定世界時 (UTC) を維持している。UTC は、我々の日常生活で用いる時刻であり、暦の基本となっていると言っても過言ではない。カーナビなどでお馴染みの全地球測位システム (GPS) にも、正確な時刻保持が必須であり、日常生活に欠かせないものとなっている。

最後に、学術と社会との関係において必ず考慮しなければならない問題として、天文学・宇宙物理学分野におけるジェンダー問題について触れておきたい。

天文学・宇宙物理学分野に関連の深い学協会として日本天文学会がある。同学会では、1999年に国内学協会ですべて初めて年会期間中の一時保育所を設置するなど、男女共同参画において先進的な取組を続けてきた。同学会の正会員数は、1980年代の約500名から現在の2000名以上へと大きく増加したが、正会員に占める女性比率は過去20年間にわたって13%前後でほぼ一定であり、有意な増加は見られていない。

2019年に同学会の男女共同参画委員会が実施した調査[9]では、天文学・宇宙物理学分野において女性比率が増加しない原因として、研究生活初期における影響が考察されている。その内容は、大学院進学から博士号取得くらいまでの期間において、進学にあたって女性は家族に反対される比率が男性より高いこと、女性は家庭や育児と仕事との両立を男性以上に強く意識する（させられている）こと、女性が担うことが多い改姓に伴う煩雑さなど、多岐にわたっている。

なお、博士号取得後のキャリア形成については、女性だからという理由で就職において不利な扱いを受けたと感じる女性会員の割合は多くはないようである。これは、例え

ば、第24期分科会が行った博士号取得後の就職率に関する調査[10]で、2010年以前に博士号を取得した世代では任期無し職への就職率に男女差があるのに対して、それより若い世代ではこの差が解消されている傾向が示されていることとも整合している。

以上は、天文学・宇宙物理学の分野に限らず、研究者を目指す若手に共通の問題と言えよう。学术界全体で、さらなる積極的な取組が必要なところであろう。こうした取組の一環として、日本天文学会男女共同参画委員会では、他の学会とも協力しつつ「女子中高生の理系進路選択支援事業」などを通じて、積極的な女性研究者支援モデルの育成に取り組んできている。国立天文台では2015年4月に本部のある三鷹キャンパス内に職員及び研究会での一時保育が可能な保育施設「保育ルーム・星の子」を開設し、受け入れ人数を徐々に増やしながら運営を続けている。さらに、本分野での国際組織である国際天文学連合主催の国際シンポジウム358「Astronomy for Equity, Diversity and Inclusion - a roadmap to action within the framework of the IAU centennial anniversary」を、2019年11月に日本学術会議物理学委員会 IAU 分科会の協力の下、あえて日本で開催したことを記しておきたい。国際天文学連合設立以来100年余の歴史で初めて正面からジェンダーを含む包括的なテーマでの歴史的な会合である。これらの取組が日本の現状を国際社会に恥じることのない、良い方向へと変える一助となったと信じたいところである。

2 2010 年代以降の成果と 2030-2040 年代の展望

20世紀の天文学・宇宙物理学の発展については、国内における当該分野の歴史的概観も含めて、2010年報告[2]に詳しい記述があり、その中の第2章では特に「21世紀の天文学・宇宙物理学の展望」が示された。その後の進展として、2023年報告[4]において、宇宙論、銀河、活動銀河核とブラックホール、星・高密度星・元素合成、星・惑星系形成と星間化学、太陽系外惑星、太陽、粒子線・ニュートリノ・ダークマター、重力波、およびコンピュータ・シミュレーションの各項目について、天文学・宇宙物理学分野の科学的目標と意義が俯瞰的に展望されている。これらを踏まえ本章では、2023年報告[4]を改訂する形で、2010年代から現在に至る約15年の進展を振り返るとともに、2030-2040年代に向けた展望を述べる。

(1) 宇宙論

「進化する宇宙」という概念は、最も根源的な意味において人類の自然観、さらには哲学観にまで深い影響を与えたものとして、20世紀の科学が成し遂げた偉大な成果の1つである。自然科学としての宇宙論研究は、アインシュタインの一般相対性理論の構築（1916年）から始まり、ハッブルおよびルメートルによる宇宙膨張の発見（1929年）、ガモフによるビッグバン理論の提案（1946年）、宇宙マイクロ波背景放射（CMB）の発見（1965年）、CMB角度異方性（温度ゆらぎ）の発見（1992年）、さらに超新星観測による宇宙加速膨張の発見（1998年）などの革新的な成果を通じて、理論と観測の双方から発展してきた。天文学と物理学に基づき、宇宙の創生から現在に至る進化を統一的に理解することが宇宙論の目標である。

現在の宇宙の標準シナリオでは、宇宙の始まりに起こったとされる急激な加速膨張（インフレーション）の過程で生成された量子ゆらぎが、宇宙構造の種である原始ゆらぎ（物質の空間分布の非一様性）へと転化し、その後、宇宙の質量密度の大部分を占めるダークマターの重力の作用でゆらぎが増幅され、現宇宙のあらゆる構造（銀河、銀河団、及び宇宙の大規模構造）が形成してきたと考えられている。一方、約138億年の宇宙史の後期にあたる約70億年前から宇宙は再び加速膨張期に入ったことが分かっている。重力の万有引力に打ち勝ち、加速膨張を引き起こしている謎のエネルギーとして、ダークエネルギーが理論的に導入された。加速膨張はゆらぎをならす方向に働くため、宇宙の大規模構造はダークマターとダークエネルギーの競争によって進化してきた。つまり、宇宙膨張と宇宙構造の進化の研究は、表裏一体の問題として互いに深く関わっている。超新星の観測、CMB角度異方性の観測、銀河の3次元地図など、積年の様々な宇宙観測により、現宇宙の全エ

エネルギー密度の組成は、約70%がダークエネルギー、約25%がダークマター、残りの約5%が通常の物質、ということが分かっている。インフレーションが予言する原始ゆらぎの特性と併せて、このエネルギー組成を仮定した宇宙の進化モデルは Λ CDMモデル[※]と呼ばれ、現在では宇宙の標準模型として確立している。しかしながら、この Λ CDMモデルでは宇宙の約95%が正体不明のダークエネルギー、ダークマターによって占められており、これらダーク成分の正体は、天文学にとどまらず21世紀科学の根幹的課題となっている。

上述の急激な宇宙論の理論的、観測的研究に呼応して、2010年代から今まで日本においても宇宙論研究が大きく進展してきた。

CMBの研究では、かつては欧米がリードしていたが、2010年頃から、高エネルギー加速器研究機構（KEK）、東京大学、京都大学、岡山大学、JAXA宇宙科学研究所（ISAS）など国内にCMBの研究グループが組織され、戦略的にPOLARBEAR[※]などのCMB地上実験に国際パートナーとして参加してきた。これにより、装置開発やデータ解析のノウハウと経験を蓄積し、関連技術の習得が進んだ。これらの研究グループが中心となり、次世代の大型CMB地上実験（Simons Observatory）[※]に参画しており、また日本主導のLiteBIRD衛星計画<13>（<番号>は3章（1）に記載の、推奨する天文学・宇宙物理学の長期計画の番号を示す）を推進している。特に、LiteBIRD<13>は、インフレーションの証拠となる原始重力波に起因するCMBのBモード偏光の検出を主目的とした独創的な計画である。実施体制の整備と技術成熟度の向上が進み、JAXAの戦略的中型2号機として検討されており、2030年代の打ち上げを目指してその検討が進められている。このように2010年以降の国内におけるCMBの実験的研究の進展は特筆すべき成果である。

一方、広い天域にわたる、多数の銀河の観測（以下、「銀河サーベイ」とする）による宇宙論研究も大きく進展した。日本が主導し、プリンストン大学、台湾の研究者が参加する国際共同研究チームは、すばる望遠鏡の主焦点広視野カメラHyper Suprime-Cam（HSC）[※]を開発した。HSC国際チームは、2014年からすばる望遠鏡の計330夜数を費やし、これまでにない広い天域、また遠方宇宙にある暗い銀河まで見渡す、大規模な銀河イメージングサーベイを行った。すばるHSCの集光力、広視野、また高い結像性能（シャープなイメージ）により、すばるHSCのデータは宇宙構造が及ぼす背景銀河像への弱重力レンズ効果の精密測定を実現することに成功した。その結果、国際HSCチームは、HSCサーベイの弱重力レンズ効果の測定と、宇宙の標準模型である Λ CDMモデルの予言を詳細に比較し、宇宙論パラメータを高精度に測定した。例えば、現在の宇宙構造の成長度合いを特徴付ける物理パラメータである S_8 [※]を約5%の精度で測定することに成功した。このすばるHSCの研

究成果は、装置の開発、大規模サーベイの立案・実行、データ取得・解析、さらに物理解析に至る各段階において日本が主導して達成した、「観測的」精密宇宙論における初の研究成果であり、特筆すべき進展と言える。

HSCサーベイを始めとし、2010年代には欧米で広天域銀河サーベイによる精密宇宙論が進展した。現在では、銀河サーベイは、CMBに並び、宇宙論パラメータを精密に測定する強力な手段になっている。さらに、ビッグバン後約38万年後の宇宙のスナップショットを測定するCMBと、宇宙構造が成長した後期宇宙を調べる銀河サーベイは相補的であり、二つを組み合わせることで、約138億年の宇宙構造の進化史を詳細に調べることが可能になる。

Λ CDMモデルは、これら最新の宇宙論データの宇宙論観測量を基本的に良く説明できているが、宇宙論パラメータの測定精度の向上に伴い、 Λ CDMの綻びを示唆する兆候が見つかっている。まず、CMBおよび銀河サーベイが支持するハッブル定数 H_0 の値と、近傍宇宙を直接観測して得られるハッブル定数 H_0 の値が一致しない問題、いわゆるハッブル定数の不一致（ H_0 不一致）問題である。次に、CMBが支持する Λ CDMが预言する現宇宙の S_8 の値と、様々な銀河サーベイの観測量が示す S_8 の値に 2σ 程度の不一致、いわゆる S_8 問題である。さらに、2025年には、米国のDark Energy Spectroscopic Instrument (DESI) [※]プロジェクトによる広天域分光銀河サーベイのデータを用いて、バリオン音響振動スケールが精密に測定され、ダークエネルギーが宇宙定数（ Λ ）ではなく時間変化している可能性を示唆する結果が報告された。これが本当であれば、ブレークスルーとなる重大な発見であり、独立な観測による検証が強く求められている。このように、 Λ CDMモデルを超える新しい物理の探究は極めてタイムリーな課題であり、世界中でその方向性に沿った理論・観測両面からの研究が進められている。

HSCサーベイの弱重力レンズ効果は、電磁波では直接観測できないダークマターの空間分布を復元することができるため、上記の研究以外にも様々な研究成果が実現した。宇宙の大規模構造におけるダークマターと銀河の分布の比較、あるいは個々の銀河におけるダークマターと星の空間分布を統計的に比較する研究が行われた。つまり、宇宙の構造形成のなかで、ダークマターの重力の影響下でいかに星・銀河が形成され、銀河の空間分布が進化してきたのか、という問題が観測的かつ定量的に研究できるようになってきた。さらに、HSCデータを用いたアンドロメダ銀河の重力マイクロレンズ効果の探査から、ダークマターの有力候補の1つである原始ブラックホール（PBH）について、これまでにない精度で月質量程度のPBHの存在量を制限することに成功した。このように、HSCデータは、天

の川銀河空間から銀河、さらに宇宙の大規模構造にわたる幅広いスケールに及ぶダークマターの「観測的」研究を可能にし、これらの天文学分野に飛躍的進展をもたらしたと言える。

今後の宇宙論が目指すべき方向性は、以下のものが考えられる。

- i. インフレーション宇宙の観測的検証、また現宇宙の構造の種である原始ゆらぎの特性（物理）の解明
- ii. 宇宙の標準模型 Λ CDMの徹底的検証および標準模型を超える新しい物理の探索
- iii. ダークエネルギーの時間変化の独立検証
- iv. ダークマターの正体の解明
- v. 膨張する宇宙における、ダークマターの空間集積、星形成史、多様な銀河の形成・進化に至る宇宙進化の観測的研究および統合的理論モデルの構築

各科学目標に対して、ターゲットになる観測量を定義し、物理的に意義がある制限、測定結果を創出するために必要な精度を達成することが、実験・観測のゴールとなる。

日本が主導し、世界をリードする宇宙論研究成果が期待されるのは、LiteBIRDおよびすばるHSC・PFSサーベイ計画である。日本が主導するLiteBIRD衛星計画はユニークであり、インフレーション起源のBモード偏光の探査に特化したデザインになっており、欧米では同様の計画がない、独創的な研究計画である。15年以上にわたる開発を経て、2025年に遂に完成したすばる望遠鏡超広視野多天体分光器Prime Focus Spectrograph (PFS) [※]も、8 m級望遠鏡において同様の装置が他に存在しない、圧倒的な多天体分光観測能力を有するユニークな装置である。2025年から、PFSによる宇宙の大規模分光サーベイが開始した。すばるPFSの分光データを用いたバリオン音響振動スケールの精密測定により、DESIで示唆されている時間変化するダークエネルギーを独立に検証することが喫緊の課題である。さらに、すばるHSC・PFSによる撮像・分光サーベイにより、暗い天体まで見渡す宇宙の3次元地図の作成が実現し、上述の各科学目標について相乗的な研究成果が期待される。

欧米でも広天域銀河撮像・分光サーベイが稼働中・計画中である。実質口径6.5mの専用望遠鏡を建設し、撮像サーベイを行うベラ・C・ルービン天文台（2025年開始）[※]、撮像及び低い波長分解能の分光サーベイを行うユークリッド衛星（2023年打ち上げ）[※]、撮像及び低い波長分解能の分光サーベイを行うNASAのローマン宇宙望遠鏡計画（2026年打ち上げ）[※]、原始非ガウス性の検出を目標とし、全天の多バンド撮像サーベイを行うNASA

の衛星SPHEREx（口径20cm、2025年打ち上げ）である。さらに、欧米や中国では、1000億円規模に及ぶ、すばるPFSのような広視野多天体分光器を搭載した2030～40年代の望遠鏡プロジェクトが計画されており、すばるPFSによる早期の科学成果の創出が強く求められている。加えて、総受信面積が約1平方kmに達する世界最大級の電波望遠鏡計画であるSKA<19>も2030年代に本格運用が開始され、宇宙に大量に分布する中性水素の21cm線による大規模サーベイの実施が予定されている。これらの究極的な大型計画により、宇宙論の研究は2030年代にも大きく進展することが確実視されている。

ダークマター研究においても、有力候補とされてきた未発見素粒子WIMP[※]に探索が集中してきたことへの反省から、多角的な視点に立ち、様々な手法によるダークマター探査が求められている。PBHの探査については上述の通りであるが、これに加えて、高エネルギー宇宙線も含む様々なエネルギー帯・波長帯における未同定輝線の探索、重力波観測で発展したレーザー干渉計やテーブルトップ実験を用いたアクシオンダークマターの探索、さらには矮小銀河などの小スケール天体におけるダークマターの力学的構造への影響の探索などが挙げられる。ダークマターの空間分布の解明には宇宙観測が本質的であるため、ダークマター研究は天文学と物理学の学際的研究が可能になる有望な分野である。

宇宙論研究に必要な宇宙地図のデータはビッグデータであり、そのデータ処理や解析はチャレンジングな課題となっている。データ解析を高精度に行うソフトウェアが重要であることは言うまでもないが、データから限なく宇宙論情報を引き出すためには、機械学習・AIを用いた手法が今後ますます威力を発揮すると期待される。こうしたビッグデータやデータサイエンスに関する手法・技術の開発に加え、人材育成も必要不可欠であり、宇宙論研究はこれらの分野の開拓において極めて有効である。

最後に、近年著しい進展を遂げている重力波観測に基づく宇宙論研究も、今後大きく進展すると期待される。重力波観測とほかの宇宙観測を組み合わせる、いわゆるマルチメッセンジャー天文学により、例えばハッブル定数を高精度に測定する新たな手段が進展し、 H_0 不一致問題をこれまでの手法とは独立に調べる事が可能となる。また、CMBが探るGpcの波長スケールから、数km（さらには短波長まで）にわたる背景重力波の探査を通じて、インフレーションの物理に迫ることができる。短波長の背景重力波は、原始ブラックホールの生成過程にも関連している可能性がある。このように、重力波宇宙論という新たな分野も、今後さらなる進展が期待される。

(2) 銀河

銀河は宇宙における物質分布の基本的なユニットであるがゆえに、その研究は本質的に多様である。その多様なテーマの中から、2010年報告[2]では、当時から10年の銀河研究の方向性として以下の2つを挙げている。

(i) 究極の銀河観測フロンティア

宇宙最遠方、すなわち最古と考えられる第1世代の銀河の探査は、すばる望遠鏡で到達した赤方偏移6～7の輝線銀河探査（水素原子の出す輝線で輝いている銀河）を拡張し、宇宙再電離がどの時代にどのように完了したかを解明し、また、アルマ望遠鏡を用いて第1世代の銀河がいつの時代からどのように誕生したのかを明らかにする。

(ii) 俯瞰から理解へ

銀河宇宙の歴史・進化を、銀河系（天の川銀河）を始めとする現在の銀河の姿と統一的に結び付ける。すなわち、宇宙年齢にわたり、銀河のたどる物理的な進化の筋道を系統的に分類し、それによって現在の宇宙で観測される銀河の姿を矛盾なく説明できることが「俯瞰から理解へ」の本質である。そのための観測には、地上超大型望遠鏡、次世代宇宙望遠鏡が主導的かつ大きな役割を果たす。

さて、銀河の研究は2010年以降も大きく進展したが、特に、2022年7月のジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡（JWST）[※]のデータ公開の前後で全く別の世界となった。JWST以前の最遠方天体探査では、アルマ望遠鏡による赤方偏移9（宇宙年齢5.5億年）の銀河の酸素輝線の検出や、赤方偏移8（宇宙年齢6.5億年）の銀河のダスト（ケイ酸塩や炭素物質の固体微粒子、宇宙塵）の検出が報告されていた。JWSTは、赤方偏移フロンティアを大きく広げ、赤方偏移10を超える（宇宙年齢5億年未満）銀河は分光確認されたものに限ってもすでに数十個を数える。また、赤方偏移14を超える（宇宙年齢3億年未満）銀河も2天体の分光確認に成功している（2026年3月末現在）。銀河の個数密度に関して、JWSTのデータ公開直後は、事前の予想に比べて明るい銀河の個数が極めて多く報告され、標準宇宙モデルとの矛盾が議論された。しかし分光追観測の結果、一部に低赤方偏移の銀河の混入があったことも明らかになり、現在では、予想に比べて多いことは確かなものの、星形成率の激しい時間変動、高い星形成効率、ダスト減光の少なさなど、銀河形成の物理過程の調整で説明が可能と考えられている。今後もJWSTによって初期宇宙の銀河観測が進展することは間違いない。

JWSTは超高感度を誇る一方、その視野には限りがあり、1平方度を超える面積を探査することは困難である。個数密度が少なく、平方度級以上の面積を探査して初めて見つか

る明るく大質量な銀河は、標準構造形成論のテストや銀河形成の物理過程の理解に重要な情報を与える。そこでは、2023年7月に打ち上げられた欧州のユークリッド衛星や、2026年に打ち上げられた米国のローマン宇宙望遠鏡による超広視野近赤外線探査が大きな役割を果たす。日本でも、2030年代の超広視野近赤外線探査衛星GREX-PLUS<5>の検討が進んでいる。

宇宙再電離過程の研究では、すばる望遠鏡の超広視野主焦点カメラHyper Suprime-Cam (HSC) に搭載された狭帯域フィルターによる、赤方偏移5から7の輝線銀河の撮像探査が本質的な貢献を果たした。2025年から稼働し始めたPrime Focus Spectrograph (PFS) により、大統計かつ分光的な研究へ質的に深化することが期待できる。一方、JWSTは宇宙再電離過程の研究でも画期的な成果を上げている。例えば、ライマン α 波長前後の銀河のスペクトル形状の詳細な解析から、宇宙の中性度の時間進化が制限されつつある。また、赤方偏移13の銀河のライマン α 輝線の検出に成功し、宇宙初期でも巨大な電離バブルが形成されていることが明らかとなった。このような結果から、明るい銀河の周囲から電離が進む、インサイドアウトと呼ばれる再電離様式が支持されている。今後、より大規模化、精密化した宇宙再電離数値シミュレーションの助けも借りつつ、PFSやJWSTの観測結果の解釈を進めることで、再電離過程の全貌が明らかにされていくだろう。

宇宙の星形成史の研究において、すばる望遠鏡HSCによる赤方偏移4から7の星形成銀河の超大統計サンプル構築は、遠方銀河研究の1つの集大成となった。これにより、銀河クラスタリング解析に基づくダークマターハロー質量の測定に成功し、ハロー質量と恒星質量の比「星形成効率」が推定できた。それを標準構造形成論に基づくハロー形成史と組み合わせることで、赤方偏移7（宇宙年齢8億年）から0（宇宙年齢138億年、現在）にわたる宇宙の星形成史の概形の物理を理解することができた。そしてJWSTによる観測により、赤方偏移10を超える時代（宇宙年齢5億年未満）まで星形成史が明らかにされつつある。今後、ユークリッド衛星やローマン宇宙望遠鏡による探査で得られる星形成銀河の超大統計サンプルによるクラスタリング解析も赤方偏移10前後まで行われるであろう。

銀河星形成活動の終焉「クエンチング」は、大質量ブラックホールを擁する活動銀河核からのフィードバックなのか、銀河数密度に応じた環境効果なのか、あるいは別の過程なのか、その解明は長年の課題である。従来、数億年以上星形成をしていない「パッシブ銀河」は赤方偏移4（宇宙年齢16億年）まで分光的に確認されていたところ、JWSTの観測により、赤方偏移7（宇宙年齢8億年）の「ミニクエンチ銀河」や、さらには赤方偏移11（宇宙年齢4億年）の銀河でありながら、星形成を急に止めてしまった例も発見されてい

る。今後のさらなるパッシブ銀河探査には広視野の近赤外線観測が必要となる。ユークリッド衛星やローマン宇宙望遠鏡の超広視野探査に加えて、すばる望遠鏡ULTIMATE[※]による多様なフィルターによる撮像探査の貢献も期待される。

アルマ望遠鏡は、遠方銀河の星間ガスやダストの観測を大きく開拓した。例えば、赤方偏移8を超える銀河のダストの検出に成功している。また、可視光や近赤外線では全く見えず、サブミリ波の連続光や輝線でのみ見える遠方銀河種族が赤方偏移7程度まで発見されている。今後もアルマ2[※]として機能強化し、この分野を牽引するだろう。星間ガスの観測は次世代長基線電波干渉計（ngVLA）〈16〉によっても拡充されるだろう。

銀河観測研究の新しい潮流として、地上8-10m級望遠鏡による可視光分光観測で、銀河間中性水素ガスの分布を明らかにするトモグラフィや、銀河周囲のガスとそこでの元素汚染の理解が進展した。銀河は宇宙空間に孤立しているのではなく、銀河間空間に存在するガスと相互作用しながら進化する描像が確立したと言えよう。この分野は、今後もPFSや、30m望遠鏡（TMT）〈21〉を始めとする地上超大型望遠鏡により大きな発展が見込まれる。また、2030年代前半の実施を目指す紫外線宇宙望遠鏡LAPYUTA〈12〉は、静止波長に近い銀河のライマン α ハローの観測を通して、近傍銀河周辺物質の構造を調べ、宇宙構造形成の枠組みで予言されたガスの流入による星形成を検証し、この分野に貢献するだろう。理論的には、銀河を、銀河間ガス、銀河周囲ガス、星間ガス、恒星系が物質とエネルギーを交換しながら進化する非平衡開放系として改めて捉え直す視点も興味深いだろう。

銀河形態学は、エドウィン・ハッブルの分類以来、銀河研究の主要な一翼を担ってきた。すばる望遠鏡HSCの可視光での高画質を活用した遠方銀河の形態学は一般市民をも巻き込んだ形で大規模になされた。さらに、JWSTの近中間赤外線での高画質を活用して、ほとんど全宇宙史にわたる銀河形態学が可能となり、初期の宇宙でも円盤銀河の割合が高いことが明らかにされている。また、赤方偏移5（宇宙年齢12億年）の明瞭な渦巻銀河が報告されている。将来的には、Habitable Worlds Observatory（HWO）〈7〉による超高解像度観測により、銀河形態学がさらに発展すると期待できる。

一方で、銀河系は個々の恒星の位置や運動、化学組成を最も高い精度で測定できる観測対象であり、銀河形成・進化を理解する上で中心的な役割を担っている。近年では、ガイア衛星[※]による多数の恒星の6次元位相空間情報と分光観測を組み合わせた銀河考古学により、銀河系の合体史や構造形成史の研究が大きく進展した。2030年代にはJASMINE衛星〈10〉によって、ガイア衛星では観測が困難な銀河系中心方向に対する高精度位置天文観測が実現される。PFSなどによる分光観測と組み合わせることで、銀河系形成

の包括的理解につながることを期待される。

(3) 活動銀河核と巨大質量ブラックホール

銀河中心核の巨大質量ブラックホールは、母銀河の進化に深く関わり（共進化）、銀河団の構造にも大きな影響を与えるなど、宇宙の重要な基本構成要素であることが分かってきた。その起源、及び環境との相互作用を解明することは、宇宙史の理解において不可欠で本質的な天文学的課題である。2010年に本分科会がとりまとめた報告[2]では、電磁波を用いた巨大質量ブラックホールの研究として、以下の3つの方向性について述べていた。

(i) ブラックホールと環境の共通化

巨大質量ブラックホールは、成長期間の大部分で激しい星生成を伴って母銀河と共進化するはずだが、巨大質量ブラックホールと銀河のどちらが先に質量成長を遂げたか、あるいは両者が常に協調して質量を増加させたのか、といった共進化の描像は不明である。そこで、大面積のX線望遠鏡と多波長大型望遠鏡との密接な連携によりこの過程を観測する。

(ii) ブラックホール降着流とジェットの物理

広い範囲のブラックホール質量及び質量降着率下での降着流の物理を統一的に理解する。特に、非常に高い質量降着率下での降着流の振舞、相対論的宇宙ジェットの起源の理解が重要である。そのために、銀河系内X線連星・超強度X線源・活動銀河核の多波長観測と、多次元シミュレーションを含めた理論的研究との連携を行う。

(iii) ミリ波・サブミリ波領域でのブラックホール撮像観測

ミリ波・サブミリ波VLBIにより、いて座A* (Sgr A*) [※]やM87中心核のブラックホールシャドウを撮像し、ブラックホール存在の直接的な証拠を与える。また、強重力場中の一般相対性理論効果の検証を行う。

巨大質量ブラックホール進化の研究に関する過去10年における大きな進展のひとつとして、すばるHSC、Pan-STARRS[※]、DES[※]等による可視光高感度広域撮像サーベイ、そしてEuclid衛星等による近赤外線高感度広域撮像サーベイが精力的に行われた結果、赤方偏移6～7程度の初期宇宙に多くのクェーサー（明るい活動銀河核）が発見されたことが挙げられる。これらのクェーサーのブラックホール質量は太陽の10億倍程度に達するものもあり、ビッグバンから10億年未満という短期間のうちにこのような巨大質量をブ

ブラックホールが獲得するための物理について精力的な研究が展開されている。今後は、ローマン宇宙望遠鏡やGREX-PLUS衛星<5>等による近赤外線および中間赤外線高感度広域サーベイにより、赤方偏移8を超すクェーサーも系統的に探査される。こうした高赤方偏移クェーサーについて、母銀河の性質が関心の対象となるが、JWSTやアルマ望遠鏡が星成分とガス成分を捉え、巨大質量ブラックホールとの共進化の理解が深まりつつある。こうしたクェーサー母銀河の星とガスを捉える研究は将来、TMT<21>等の地上超大型光学望遠鏡やngVLA<16>およびアルマ望遠鏡を機能強化させたアルマ2といった大型電波干渉計による高空間分解観測により、更に進展すると期待される。なお、近年のJWSTによる超高感度観測により従来の予想よりも遥かに多くの低光度活動銀河核が高赤方偏移宇宙に発見され、その中にはLittle Red Dotsと呼ばれる新種の天体種族も報告されている。こうした天体について理解するためには、全波長帯で高感度観測が可能な装置を活用してスペクトルエネルギー分布[※]を捉える必要があり、高感度観測が実現できていない遠赤外線・テラヘルツ帯における将来計画であるPRIMA<18>やATT<1>の実現が期待される。

一方、東アジアVLBI観測網 (EAVN) [※]のような長基線センチ波VLBIを用いて高角度分解能を実現することにより、ジェットの本元部分の撮像観測や、ジェット加速を示すモニタ観測が可能になってきた。また、2023年に打ち上げられたXRISM衛星[※]によって、搭載装置であるX線マイクロカロリメータを用いたX線高分散分光観測が可能になり、高速アウトフローガスの実態解明が大きく進展しつつある。今後は、降着流とジェットの加速を統一的に理解することや、母銀河スケールからブラックホールスケールにガスが降着する物理、ブラックホールスケールからのジェットやアウトフローが母銀河スケールに及ぼす影響を解明することが課題になると考えられる。

巨大質量ブラックホール存在の確固たる証拠を得るための観測についても、大きな進展があった。銀河系中心部の恒星運動の継続的な精密観測により、太陽の約400万倍の質量が銀河系中心のコンパクトな領域内に偏在することが確定的になり、その成果に対しては2020年にノーベル物理学賞が授与された。そして、さらに直接的な観測により巨大質量ブラックホールを捉えたのがイベント・ホライズン・テレスコープ (Event Horizon Telescope; EHT) [※]である。地球規模のミリ波VLBIであるEHTは、2019年にはM87について、そして2022年には銀河系について、それぞれの中心核にある巨大質量ブラックホールのシャドウ(穴)と考えられる構造を画像として取得することに史上初めて成功した。この成功の背景に、スパースモデリングの手法による超解像技術といった新しいデータ解析方法が活用されていることは、特筆すべきである。次の研究段階としては、時間分解を

行ったシャドー動画の取得や、Space VLBI観測を実施する次世代観測衛星を実現して更に高解像度のシャドー画像を取得することで、巨大質量ブラックホールに関する理解を深めることや強重力場中での一般相対性理論効果を検証することが期待される。より将来には、宇宙空間で超長基線重力波干渉計を運用し、巨大質量ブラックホール同士の合体現象を重力波で直接的に調査できる時代が来るだろう。

巨大質量ブラックホールへの降着流、及び巨大質量ブラックホール近傍から吹き出す相対論的ジェットや高速アウトフローの理解に向けて、スーパーコンピュータが果たした役割は大きい。具体的には、「京」や「富岳」などを駆使した詳細な輻射磁気流体シミュレーションにより、ガス降着率に応じて質的に異なる降着モードが生じる様子や、輻射圧や磁気圧によりガスが外向きに加速する様子が分かってきた。今後は、機械学習など昨今の計算機科学の進展をどう活用していくかが、この分野におけるシミュレーション研究においても重要になっていくと予想される。

(4) 星・高密度星・元素合成

星の進化は天文学・宇宙物理学における最も基礎的な要素であり、宇宙の化学進化や諸現象を統一的に理解する上で必要不可欠である。2010年報告[2]では、以下の方向性が述べられている。

(i) ガンマ線バースト：起源の解明

ガンマ線バーストを引き起こす爆発現象が、どういう星のどういう条件の下で起きるのか、通常の超新星爆発と何が異なるのか、の解明が次の重要な課題となっている（重力崩壊型超新星の多様性の理解）。また、継続時間の短いガンマ線バーストの起源についてはいまだ解明されていない。（連星中性子星の合体ではないかとも言われている。その場合、究極的な証明は重力波検出を待たねばならないだろう。）

(ii) Ia型超新星モデル：宇宙の加速膨張と鉄の起源

Ia型超新星は標準光源として遠方宇宙における距離測定の主役であり、宇宙の加速膨張の発見に本質的な役割を果たした。そのメカニズムは、連星白色矮星の核燃焼の暴走だと考えられているが、どのような連星がどのような進化を経てこの現象を起こすのかについては論争が続いており、解明が待たれる。

(iii) 中性子星とブラックホール：形成・進化モデルの確立

星質量ブラックホールと巨大質量ブラックホールの起源と、相互の関係、進化系列は、ブラックホール形成過程の解明に残された課題の1つである。パルサーの放射機構はま

だ不明な点も多く、また中性子星内部の物質状態は物性物理学とも関連しており、基礎物理学の観点からも大きな意義を持つ研究対象である。

(iv) 銀河考古学：宇宙の元素循環

鉄よりも重い原子核の起源や、我々の銀河系の形成初期の姿の再構築（銀河考古学）など、銀河進化の研究と相補的にさらなる発展が期待されている。

星・高密度星・元素合成の研究は、過去約10年で重力波や高エネルギーニュートリノという新たなメッセンジャーの直接観測が実現したことで、飛躍的な進歩を遂げている。また、ガイア衛星（Gaia）による恒星の距離・運動の網羅的な測定や、近年大きく発展している様々な波長における時間領域観測など、質的に新しい観測データによって大きく理解が進むとともに、新たな謎も明らかになっている。

2015年にLIGO（Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory）[※]によって初めて観測された重力波は、太陽質量の約30倍のブラックホールの合体によるもので、それまでX線連星などの観測では知られていなかった質量のブラックホールが宇宙に存在することが明らかになった。2026年8月時点で、重力波で観測されたブラックホール合体の数は約400例にものぼり、合体後の質量が100太陽質量を超える中間質量ブラックホールの存在が明らかになるなど、宇宙における（連星）ブラックホールの質量分布が測定できるまでに研究が急速に進んでいる。また、ガイア衛星による位置天文学測定によっても銀河系内の連星中にブラックホールの候補が発見されており、連星進化の多角的な検証が可能となっている。

2017年には、中性子星合体からの重力波が観測され、あらゆる波長の電磁波でもその対応天体が同定された。特に、重力波検出直後にガンマ線バーストが観測されたことから、中性子星合体がショートガンマ線バーストの起源であるという「究極的な証明」が実現している。また、中性子星合体からの可視光・赤外線対応天体も発見されたことで、中性子星合体で速い中性子星捕獲反応（r-process[※]）が起きていることが確認され、50年以上明らかになっていなかったr-process元素合成のサイトの直接検証が実現した。さらに、重力波観測からは中性子星の潮汐変形に関する情報も得られており、X線による中性子星半径の測定と併せて、中性子星内部の高密度状態方程式の研究も新たな展開を迎えている。

元素合成サイトの研究の進展とあいまって、銀河系・矮小銀河の恒星の観測による宇宙の元素循環の研究も大きく進んでいる。特に、ガイア衛星による恒星の6次元位相空間

情報の測定から、銀河系内の恒星の降着史を辿ることができるようになったことで、運動学的に分解した恒星種族ごとの化学進化の研究が可能となった。さらに、矮小銀河の恒星の元素組成の測定によって、中性子星合体のような頻度の低い爆発現象における元素合成も検証されている。

時間領域天文学の発展によって、これまで知られていなかった天体現象が次々と明らかになったことも、この10年の研究の進歩を語る上では欠かせない。可視光における時間領域広視野サーベイでは、これまで知られていた超新星爆発よりも10倍以上明るい「超高輝度超新星」や、極めて速く進化する突発天体現象などが発見されており、恒星の最期・高密度星形成の多様な姿が明らかになっている。また、爆発する直前の恒星の活動性などこれまで予想されなかった現象も見つかっており、基本的な恒星進化理論の見直しが進んでいる。2025年に運用が始まったベラ・C・ルービン天文台では高感度な時間領域サーベイが行われ、今後本分野がさらに発展することが見込まれる。

また、電波における時間領域観測では、高速電波バースト (Fast Radio Burst; FRB) [※]というミリ秒程度の突発的な放射が多数発見されている。銀河系内のマグネター [※]からも同様の現象が観測されたことで、マグネターが少なくとも一部のFRBの起源であると考えられており、FRBの理解を通してマグネター、さらには一般的なパルサーの放射機構の理解が進むことも期待されている。

このように、主に可視光から始まった時間領域天文学は全波長に広がっており、様々な時間領域をカバーするように発展している。日本の天文学・宇宙物理学分野においても、あらゆる波長域で時間領域天文学に関連する計画が提案されている (SKA1<19>、ngVLA<16>、LST/AtLAST<14>、TMT<21>、HiZ-GUNDAM<6>、CTA<3>など)。また、このような時間領域観測は重力波・ニュートリノとのマルチメッセンジャー観測とも親和性が高い。例えば、IceCube実験 [※] で観測されている高エネルギーニュートリノはまだその起源が解明されておらず、マルチメッセンジャー観測によって天体を同定することができれば、宇宙の高エネルギー宇宙線・ニュートリノの起源を明らかにすることができるだろう。また、重力波観測は「多波長」化が進むことが期待される。宇宙重力波望遠鏡LISA [※] では、銀河系内の連星白色矮星からの重力波が観測されることが期待されており、Ia型超新星に至る連星系の多様性が明らかになるだろう。このように、2030～2040年代には未開の時間領域の開拓、新しいメッセンジャーの獲得が進むことで、恒星進化・連星進化の理解、そしてその最終段階である高密度星や爆発現象の物理や元素合成の理解が進むことが期待される。

(5) 星・惑星系形成と星間化学

星の形成は、宇宙における最も基本的な構造形成過程であるとともに、星間物質から惑星系物質への物質進化の場でもある。「我々が住む地球のこの素晴らしい環境が宇宙の中でどのように生まれてきたのか」という根源的な問いに答えるために、我々は、「構造形成」という観点のみならず物質（化学）進化という観点からもその進化を捉えることが必要である。一方で、そのような物理・化学進化史を明らかにするには、非常に大きなダイナミックスケールで関係する物理・化学過程を調べるが必要不可欠であり、観測装置や計算機能力などの制約から研究が立ち後れていた。しかし、2010年以降、アルマ望遠鏡やVLA[※]、NOEMA[※]、IRAM 30m望遠鏡[※]、Yebes 40m望遠鏡[※]など様々な電波望遠鏡が運用開始あるいは高感度化・高観測効率化され、この十数年で研究は大きく進展した。星の誕生の大まかなあらすじが明らかになってきた一方、原始惑星系円盤における塵および分子ガスの分布を高空間分解能で直接捉える観測が可能となったことで、従来の太陽系形成理論（「京都モデル」などに代表される）では想定されていなかった構造や進化の様相が明らかになり、新たな理解を必要とする課題が次々と提示されている。また、星や惑星が形成される場の物質組成の詳細な観測と分子科学分野との連携により化学反応過程の理解が大きく進展し、従来の低温気相反応に加えて塵・氷表面と気相の相互作用の重要性が示されてきた。さらに、物理環境や進化履歴に応じた化学的多様性が惑星系に存在することが明らかとなり、その起源や、氷の蒸発などの化学組成変化が惑星形成に与える影響という新たな課題も浮かび上がっている。

これらの進展により、星・惑星形成は物理過程と化学過程が密接に結合した複雑系として捉え直されつつあり、その全体像の理解に向けた研究課題が一層明確になってきた。以下に、今後取り組むべき主要な課題を整理する。

(i) 物質循環のダイナミクス

分子雲やフィラメント構造の形成過程、星間・銀河間プラズマを含むガスダイナミクス、元素合成史が与える構造形成過程への影響、星間空間への重元素の供給、ダストの生成・破壊過程、磁場や乱流の起源、宇宙線の起源とその物質進化・星形成への影響などについては、観測および理論の進展により、異なるスケールの現象の間の関連が次第に明らかになりつつあり、星形成が大規模環境の影響を強く受けることも示唆されている。こうした知見を踏まえ、物質循環を多階層的に統合して理解することが今後の重要課題である。

(ii) 星形成の多様性とその起源

星形成は一様な過程ではなく、分子雲内のフィラメント構造やハブ-フィラメント系における質量集積、ストリーマーなどによる非対称なガス供給を通じて、多様な経路をたどることが明らかになってきた。こうした動的環境のもとで、磁場や乱流、フィードバックなどが複雑に作用し、星形成効率や形成される星の質量分布を含む統計的性質が規定されると考えられる。その起源を理解するためには、分子雲コアとの関係や局所環境、銀河スケールでの条件との結び付きを含めた統合的理解が不可欠である。また、大質量星形成における非定常な降着過程や複雑な構造形成、さらには初期宇宙環境における星形成の特性など、解明すべき課題が広がっている。

(iii) 惑星・惑星系の多様性とその起源

アルマ望遠鏡、すばる、VLAなどによる観測で、原始惑星系円盤内には形成途上の惑星が刻んだ痕跡と見られるリング状構造が普遍的に存在することに加え、スパイラルや非対称構造を持つもの、同じ進化段階でも顕著な構造を示さないものなど、多様なサブ構造が確認されている。惑星形成の進行が想定より早い段階で始まる可能性とともに、初期円盤構造の違いに応じて惑星系の多様性が生じている可能性も示唆されている。このため、原始惑星系円盤の形成と進化の解明は、太陽系外惑星との関係や太陽系の起源といった観点からもますます重要な研究課題となっている。さらに、ダスト輻射により不透明となる原始星近傍領域を見通し、地球のような岩石惑星の形成領域を直接探る観測の重要性も高まっている。

(iv) 星間化学

近年の星間化学は、2つの方向性で目覚ましい進展を見せている。第1は、惑星形成の舞台である原始惑星系円盤の化学組成の研究である。観測の感度・分解能の向上に伴い、物質が円盤へ持ち込まれる際の降着衝撃波領域など小スケールでの組成変化を捉えることの重要性や、原始惑星系円盤における様々な分子の「雪線（スノーライン）」の同定の重要性などが、化学進化の視点のみならず惑星形成の物理過程の理解においても重要であることが見えてきた。さらに、分子存在量や同位体比が物理環境や進化履歴を反映する指標として機能することも明らかになりつつある。第2の方向性は、アミノ酸の前駆体となる分子や、生体を構成する物質の材料となるような大型の有機分子、炭素を5つ以上含むような環状の大型分子などがミリ波・センチ波帯望遠鏡の高感度化で次々に発見されたことである。これらの分子の生成過程の解明が、生命の起源の解明とも繋がり得る極めて重要な課題として注目されている。加えて、JWSTによる氷・ダスト

の観測により気相と固相の連続的な化学進化の描像が明らかになりつつあるとともに、広帯域・高感度観測時代における電波・赤外領域の分光データの重要性や、反応過程の理論・実験研究の役割も一層高まっている。

これらの進展により、星・惑星系の形成は、銀河スケールの物質循環から原始惑星系円盤、さらには惑星形成に至るまで、多階層にわたる物理・化学過程が相互に結合した現象として捉えられ始めている。また、高空間分解能観測の進展により、惑星形成の現場における構造や物質分布が直接的に明らかになりつつあり、岩石惑星の起源やその存在の普遍性、そこで進行する化学進化の理解に向けた研究へと前進している。これらは、生命の起源に関する根源的問いに迫る上で重要な基盤を与えるものであり、宇宙生物学研究とも密接に関わるものである。さらに、彗星や小惑星など太陽系始原物質の探査によって得られる知見と、星・惑星系形成過程における化学進化の研究とを結び付けることにより、宇宙における太陽系の存在の位置付けやその意義の理解にも繋がると期待されている。今後は、観測・理論・実験の連携のもと、天文学が物理学のみならず化学や鉱物学、環境学、分子科学などの関連分野との垣根を越えて大きく発展していくことが期待される。

(6) 太陽系外惑星

1995年の太陽型恒星ペガサス座51番星を周回する惑星の発見（2019年ノーベル物理学賞）を契機に、太陽系外惑星の観測は運任せのプラネットハンティングではなくなっただけでなく、今や分野を超えた多数の研究者が参加する現代天文学の最重要分野の1つとなった。実際、いくつかの将来大型ミッションのサイエンスドライバーを担うまでに至っている。わずか四半世紀の間に、視線速度法やトランジット法など、独立した様々な手法で数千個の系外惑星が検出された。現在は、惑星の質量・半径と軌道の多様性を発見する「惑星探索」の時代から、多種多様な太陽系外惑星の密度（内部構造）や大気の高多様性に迫る「惑星評価（キャラクタリゼーション）」の時代になりつつある。さらに、観測手法や解析手法の高精度化に伴い、巨大惑星だけでなく地球型惑星の開拓に拍車がかかっている。また、これまでの太陽型星における惑星探査から、M型星[※]などの低質量星や若い恒星における惑星探査も進みつつある。太陽近傍の恒星周りの地球型惑星は、将来の生命兆候探査の重要な観測対象になる。過去10年間の進展と今後10～20年の展望としては、具体的には以下のものが挙げられる。日本でもこの10年間で、すばる望遠鏡による直接撮像、赤外線視線速度法、トランジット法ネットワークの構築などで大きな進展があった。

(i) 惑星統計

2009年に打ち上げられたNASA/ケプラー衛星 (Kepler) は、トランジット法によって太陽型恒星を周回する比較的短周期 (85日未満) の惑星の統計を解明し、海王星より小さな小型惑星 (スーパーアースやサブネプチューンなど) の頻度が多いこと、短周期の巨大惑星 (ホットジュピター) の頻度は1%程度であること、海王星程度の半径の惑星は短周期にはほとんど存在しないこと (熱い海王星砂漠) などの惑星分布の特徴を示した。この結果は、地上視線速度法の結果とほぼ一致している。ケプラー衛星はハビタブルゾーンにある地球型惑星の頻度についても、誤差は大きいが初めて10%程度であると言及した。また、M型星のハビタブルゾーンにある地球型惑星の頻度については、太陽型星よりも大きいことを示唆した。2027年打ち上げ予定のESA[※]/プラトー衛星 (PLATO) や2028年の打ち上げ予定の中国のEarth 2.0 (ET) 計画は、太陽型星のハビタブルゾーンを周回する地球型惑星のさらなる発見を目指している。しかし、公転周期が1年を超えるような軌道にある小型惑星は、トランジット法での発見は困難であった。

一方、日本も貢献している2026年打ち上げのNASA/ローマン宇宙望遠鏡は、ケプラー衛星ではカバーできなかった、より長周期の惑星の頻度について、重力マイクロレンズ法によって解明することを目指す。両望遠鏡の結果を併せることにより、様々な軌道にある地球質量程度までの惑星の統計が完成すると期待される (ただし、主に検出される主星のタイプは異なる)。一方、ケプラー衛星や重力マイクロレンズ法で検出された惑星は追観測に向かないため、キャラクタリゼーションはテス衛星 (TESS) [※]や地上望遠鏡で発見された近傍の恒星周りの惑星が中心となる。

(ii) 惑星内部構造・惑星大気

視線速度法による惑星質量下限値とトランジット法による惑星半径・軌道傾斜角のデータから惑星の平均密度が決定される。これらを惑星内部構造及び大気のモデルと比較することによって、ガス惑星・岩石惑星の区別だけでなく、惑星内部・大気のような組成が推定された。その結果、太陽系外惑星は惑星内部構造・惑星大気も多様であることが示された。2019年に打ち上げられたESA/ケオプス衛星 (CHEOPS) は、近傍の恒星の惑星半径をトランジット測光により精密に決定し、とりわけ地球型惑星やスーパーアース・サブネプチューンの惑星評価を狙う。

一方、トランジット分光は惑星大気上層を通過する光を分析し、惑星大気中の様々な原子・分子を検出する。巨大惑星からサブネプチューンについてはハッブル宇宙望

遠鏡やJWSTなどにより水蒸気・一酸化炭素・二酸化炭素・メタン・二酸化硫黄などいくつかの大気中の分子・原子が検出されている。2031年打ち上げ予定のESA/アリエル衛星 (Ariel) [※]は、1000個以上の系外惑星の精密トランジット分光を行う計画である。2030年代のTMT<21>などの地上30m級望遠鏡においても多数の系外惑星のトランジット分光が進む。これらの膨大なデータに基づく汎用的な惑星内部構造・惑星大気モデルの構築が期待される。

さらに、地上高分散分光器を用いて、惑星の位相変化に伴う惑星大気中の分子・原子を相関によって検出する手法は2010年以降急速に進展している。実験室における分子分光の進展とともに、地上30m級望遠鏡において最も発展する分野と期待される。

(iii) 直接撮像・分光

惑星の直接撮像と分光は究極のゴールである。巨大ガス惑星に関しては、すばる望遠鏡など8 m級地上望遠鏡により直接撮像・分光が実現された。また、JWST宇宙望遠鏡では、地上では難しい5 μ m以上の波長での直接撮像も実現された。これらにより、主星から離れた巨大ガス惑星の大気組成が解明される。また直接撮像は、トランジット法では困難な主星から離れたところにある若い惑星や原始惑星の検出が可能であり、惑星進化の始状態を理解する上で重要となる。一方、高コントラスト性能を必要としない孤立した褐色矮星や浮遊惑星の直接撮像と分光は、それら自身がユニークな中間的天体であるだけでなく、恒星を周回する惑星との比較研究上重要である。

TMT<21>などの地上30m級望遠鏡における直接撮像と分光への期待は極めて大きい。とりわけ、太陽近傍のM型星周りの地球型惑星の直接撮像（近赤外線）、数は限られるが太陽近傍のG型星[※]周りの地球型惑星（中間赤外線）が重要である。すばる望遠鏡は、超補償光学系などの技術開発のためのテストベッドとしても重要である。また、多数の浮遊惑星の赤外線分光観測が可能となり、伴星型惑星との比較研究が進む。

2040年代の6 m級高コントラスト宇宙望遠鏡においては、様々な種類の恒星周りの地球型惑星の直接撮像と分光がサイエンスドライバーとなっている（iv参照）。ローマン宇宙望遠鏡による直接撮像は、宇宙望遠鏡における高コントラスト技術実証でもある。

(iv) ハビタブル地球型惑星とアストロバイオロジー

近年の高精度視線速度観測によって、プロキシマケンタウリ[※]やティーガーデン星[※]などの近傍恒星周りの地球サイズ惑星やスーパーアースのうち、ハビタブルゾーンに位置する惑星（適温惑星）の存在が明らかになった。また、2018年に打ち上げら

れたテス衛星 (TESS) によるトランジット観測によって、7000個を超える系外惑星候補が検出されており、地球サイズ程度の惑星も多数含まれる。多数の惑星候補をいち早く確認するための多色同時撮像カメラMuSCATを用いた地上望遠鏡トランジット観測ネットワークは、世界の中でも重要な貢献をしている。テス衛星で発見された惑星の多くは、赤外線で見ると可視光で暗いM型星周りの惑星であり、すばるIRD[※]のような高精度赤外線分光器による観測も重要である。

2022年にファーストライトを迎えたJWSTは巨大惑星からトラピスト1惑星系[※]のような地球型惑星までのさまざまなトランジット観測により惑星大気の子、とりわけ、水の検出を目指す。TMTなどの地上30 m級望遠鏡に搭載される赤外線分光器IRIS[※]や高分散分光器MODHIS[※]はスーパーアースのトランジット分光を展開し、その大気組成を解明する。

2040年代の6 m級高コントラスト宇宙望遠鏡 (Habitable Worlds Observatory: HWO <7>)は、人類の根源的な問いである「宇宙で我々は唯一の存在なのか？」に答えるミッションである。そのために、近傍の太陽型恒星を公転する地球型惑星を直接に検出し、分析する。一方、それ以外の多彩な天文学にも応用可能な、紫外線・可視光・近赤外線望遠鏡となっている。

これらの観測データと生命の議論を結ぶためには、惑星大気における生命兆候のリモートセンシング研究が不可欠である。様々なバイオシグナチャーの提案とその地球上での実験・理論の進展が必要である。

(v) 汎惑星系形成・進化モデル

多様な系外惑星の発見を契機として、太陽系及び系外の太陽型星周りの惑星系の形成や進化モデルの再構築が進行中である。また、M型星や褐色矮星を含む様々な質量の天体の周りの惑星系を制約する上では、多様な惑星系の発見だけではなく、データ数を増やした統計的議論が必要である。また、惑星系の進化の解明には、成熟した惑星系だけでなく数多くの若い惑星系と原始惑星系円盤の観測を展開する必要がある。これらのデータ数が今後増加するに伴い、惑星系一般に適用可能な統一的な「汎惑星系形成・進化モデル」の構築が可能となるだろう。さらに、太陽系外衛星の確実な観測例が増加すれば、地球型惑星形成の最終段階である巨大衝突過程の理解、そして衛星系形成を含めた巨大惑星形成の統一的理解の進展も期待できる。

(7) 太陽

太陽は、我々に最も近い恒星であり、空間分解観測が可能な唯一の恒星であるという点で、天文学における最も基礎的な観測対象である。その詳細な観測を通じて、より普遍的に恒星の性質を理解することができる。また、太陽は地球上の生命や気象現象のエネルギー源であるという意味において、地球科学や地球環境科学の基礎でもある。

太陽物理学分野の基本課題と、それぞれの近年の進展と今後10–20年の展望は、以下に要約される。

(i) 外層大気加熱・恒星風の形成とダイナミクス（コロナ加熱・太陽風・彩層ダイナミクス）

太陽の表面（光球）温度はおよそ6000度であるのに対し、その上空には恒常的に1万度の彩層、100万度のコロナ、さらには太陽風領域が広がる。外層大気がいかに加熱され、恒星風がいかに加速されるのかという謎に取り組むためには、光球底での熱対流乱流による擾乱発生から、その輸送を経て、彩層・コロナや恒星風へのエネルギー注入までをすべて理解する必要がある。「ひので」衛星[※]は、エネルギー輸送を担うAlfvén波の同定などの貢献を行った。NASAのHi-Cロケット実験[※]では、ナノフレア時の磁気ループの捻れを示唆する高解像度画像が得られている。

特に近年、彩層が光球とコロナを結ぶエネルギー輸送・散逸の鍵となる領域であるとの認識が強まり、彩層ダイナミクスの理解が太陽外層大気加熱問題の解決において重要な研究対象となっている。NASAのIRISミッション[※]や米国国立太陽観測所 (NSO) の大型地上太陽望遠鏡（ダニエル K. イノウエ望遠鏡；DKIST[※]）に加え、彩層・遷移層磁場の偏光分光観測を実証した観測ロケット実験CLASP[※]や、国際気球実験SUNRISE-3に搭載された近赤外偏光分光装置SCIP[※]でも、彩層ダイナミクスの理解が進みつつある。一方、Solar Orbiter[※]やParker Solar Probe[※]による太陽近傍観測も進展しており、コロナ加熱や太陽風加速の理解に新たな制約を与えつつある。さらにSOLAR-C[20]は、 10^4 Kから 10^7 Kまでの、彩層からコロナを繋ぐ磁気プラズマ診断を行い、コロナ加熱機構との関連を発生・伝播・散逸まで結合した形で包括的・定量的に理解することを目指す。

(ii) プラズマ爆発現象（フレア・コロナ質量放出・粒子加速）

太陽面爆発（フレア）は、電磁波、放射線粒子、太陽風磁気プラズマ雲などを介し

て、地球生命、大気、磁気圏に甚大な影響を及ぼす。宇宙天気の社会的重要性は今後さらに高まると考えられ、宇宙天気の予測の範囲拡大と精度向上に向けた研究開発、さらにそのための基礎研究は、太陽物理学の重要な課題の1つであるとともに、地球物理学などとの学際的分野である。近年では、人工衛星運用、航空運航、さらには月・火星探査など将来の宇宙活動との関係からも、宇宙天気予測の重要性が一層高まっている。

「ようこう」衛星などにより、エネルギー解放機構としての磁気リコネクション（磁力線のつながりかえ）という描像が得られた。現在は「爆発現象の発生機構の解明とその予測」へと研究の方向が進んでおり、精密な観測とシミュレーション、統計的機械学習のような新技術による太陽活動の予測が重要な手段となりつつある。SOLAR-C<20>では、コロナ・遷移層・彩層で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、エネルギー解放の物理機構の理解に迫る。またDKISTをはじめとする光球・彩層磁場観測により、活動領域のエネルギー蓄積やフレアトリガの問題の進展が期待される。さらに現在運用中のSolar OrbiterとParker Solar Probeなどの惑星間探査機も加えた、軌道上・地上望遠鏡の連携により、フレアやコロナ質量放出（CME）の太陽圏擾乱を捉えることで、宇宙天気現象との関連が今後大きく展開すると予想される。加えて、太陽フレアに伴う高エネルギー粒子や非熱的プラズマの観測を目的とした次世代衛星計画PhoENiX<17>や、太陽風の起源を解明するための次世代太陽風観測装置の開発など、新たな観測計画の検討も進められている。

(iii) 磁場の起源（ダイナモ）

黒点の起源は依然として太陽の究極の謎として残っており、(i) (ii)を理解するための基礎となる。ダイナモの現場となるのは星の内部であるが、その探索には地上（NSOのGONG[※]）や宇宙望遠鏡（SOHO衛星[※]のMDIやSDO衛星[※]のHMI）による継続的均質な観測に基づいた、日震学的手法が威力を発揮してきた。これにより、例えば、太陽差動回転角速度の分布は、対流層全域にわたって精度よく求められている。一方で、「星表層で両極域に向かって流れる子午面還流が星内部でどのような構造をしているか」や、「星内部乱流」などの重要な課題が残っている。

また、上記(i)～(iii)が進展することにより、太陽物理学の知見をほかの恒星系へ適応する「星としての太陽」も発展的な課題として進展が見込まれる。系外惑星観測は、ケ

プラー衛星やテス衛星等により大きな展開を示し、今後TMT<21>などにより、惑星環境、特に大気についての理解が進むと期待される。一方、火星・水星・木星などの太陽系惑星探査ミッションにより、それらの惑星環境、ひいては太陽系の起源に迫ることを目指している。太陽系惑星環境、特にその大気環境の進化を理解するためには、太陽系の歴史を通じた太陽からの長期的な影響を評価する必要がある。これ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・長期的変動の理解が欠かせない。そして、恒星観測とも比較することで、これらの現象が宇宙においてどれほど普遍的であるのか検証することができるのは、太陽においてほかにない。加えて、太陽活動の長期的（活動周期100～1000年）変動は、地球の気候やひいては地球上の文明への影響を及ぼすことから、社会的な関心も高い。

「核融合反応とニュートリノ問題」[※]については、一定の解決を見た。しかし、太陽表面の化学組成比のアップデートに伴う、日震学から推定される音速構造と太陽標準モデルとのずれが顕在化した。この問題を検証するには、精度の良い太陽ニュートリノ強度観測などが必要である。これは依然、素粒子物理学との重要な接点である。

さらに、SOLAR-C<20>ミッションの実現を最重要課題としつつ、その成果を踏まえた次世代太陽観測ミッションや多点観測計画など、2030年代以降を見据えた将来計画の検討も国際的に進みつつある。

(8) 粒子線・ニュートリノ・ダークマター

宇宙線の研究は発見以来100年以上の歴史を持ち、電磁波だけでは解明できない天体現象・物理過程の解明を進めてきた。2010年報告[2]では、課題として以下が挙げられている。

(i) 宇宙線の起源：組成と加速機構

どのような宇宙線がどのような天体でどのエネルギーまで加速されているかは長年の未解決問題である。近い将来、GZKカットオフ（超高エネルギー宇宙線と宇宙マイクロ波背景放射の光子との相互作用に起因するカットオフ）が見え始め、また組成の同定に向けた実験などが進むであろう。また高エネルギーのガンマ線の起源（電子起源か陽子起源か）などの解明も期待される。

(ii) 超高エネルギーニュートリノと超新星背景ニュートリノ

ニュートリノ研究は、素粒子物理学として出発し加速器実験等でその性質が調べられてきた。一方、ニュートリノは星の中心で起こる核融合反応に伴って大量に生成され、さ

らに、超新星爆発の際に放出されるなど、天体现象とも極めて深く関わっている。太陽ニュートリノの観測や超新星1987Aからのニュートリノの検出を経て、ニュートリノ天文学が確立しつつある。日本はこの分野で圧倒的に世界をリードしており、大気ニュートリノの観測によりニュートリノに質量があることを発見（2015年ノーベル賞）し、素粒子の標準モデルを超える物理の必要性を明らかにするなど、基礎物理学にも大きなインパクトを与えた。

今後は、超新星ニュートリノの観測を通じた超新星爆発機構、超高エネルギーニュートリノの発見による超高エネルギー天体现象の解明が期待される。一方、超新星残骸等、宇宙線加速が行われていると考えられる現場では超高エネルギーニュートリノが生成される。その検出は超高エネルギー天体现象と宇宙線加速機構双方の解明にとって本質的である。また超新星背景ニュートリノの観測は、宇宙の星形成史を明らかにするための重要な情報となる。

(iii) ダークマター：直接検出へ

ダークマター粒子が超対称性粒子のニュートラリーノである場合、理論的に予言される断面積は現行の実験の検出感度と同程度であり、近い将来、直接検出が期待できる。また、銀河ハローや星の中心におけるダークマター粒子の対消滅によって生成されるガンマ線・陽電子・ニュートリノ・反陽子等を観測する間接検出についても、進展が見込まれる。

これらの課題について、過去10年の進展、今後の展望について述べる。

宇宙線の起源においては、超高エネルギーガンマ線の観測により電子起源に加えて陽子起源と考えられる放射天体が見つかり、拡散ガンマ線の発見により銀河系内PeVatron [※]の存在が明らかになった。将来のMega-ALPACAプロジェクト<15>では、銀河宇宙線のエネルギー収支の全容解明が期待できる。宇宙線のエネルギースペクトルと化学組成の観測的研究が進み、エネルギースペクトルには、これまで知られていた「knee」と呼ばれる $10^{15.5}$ eVにおける折れ曲がり以外にも様々な微細構造が明らかになった。特に、TeVまでのエネルギーでは直接観測によって粒子種、原子核種ごとのエネルギースペクトルが描かれ、それらの起源、伝播について詳細な議論が始まっている。 10^{17} eV付近の「2nd knee」領域についても原子核組成の測定報告数と精度が向上しており、今後の銀河系内起源宇宙線の全貌解明が期待される。最高エネルギー端でのカットオフの存在も確定したが、その起源が超高エネルギー宇宙線と宇宙マイクロ波背景放射の光子との相互作用によるものかについては、議論は収束していない。また、様々なエネルギー領域で宇宙線の到来方向

異方性が見つかっており、特におよそ 10^{19} eV以上の最高エネルギー領域では全天でいくつかの宇宙線源の兆候が見えている。このような最高エネルギー領域の議論に不可欠な宇宙線の原子核組成決定については、近年、急速に進展している機械学習手法を用いたイベント毎の一次原子核推定手法の開発が進められている。将来のGCOSプロジェクト<4>では、最高エネルギー宇宙線の加速天体の発見と加速機構の解明が期待できる。

超高エネルギーニュートリノにおいては、南極点深氷河に設置されたIceCube実験によって、TeV から PeV (1000 TeV) のエネルギー領域で宇宙ニュートリノが2013年に発見され、高エネルギーニュートリノ天文学が始まった。観測の積み重ねによって、超高エネルギーニュートリノの流量は超高エネルギー宇宙線のフラックスから期待される量と無矛盾であることを明らかにしたほか、ブレーザー[※]TXS 0506+056 及び、セイファート銀河[※]NGC1068が高エネルギーニュートリノ放射天体候補として同定されるに至っている。ニュートリノ観測による高エネルギー宇宙の研究は急速に進展しており、より高統計・高精度の観測により、宇宙線起源の解明及びニュートリノ放射天体の統計的研究は確実に実現されるであろう。さらに、フレーバー比や突発天体からのニュートリノ放射の時間情報の測定により、素粒子標準模型を超える新物理現象の探索が可能となり、非加速器素粒子物理学分野に貴重な貢献をすることが期待されている。IceCube-Gen2<8>は、この目的のために設計された次世代実験である。圧倒的な進展をもたらしたIceCube実験のレガシーを引き継ぎ、高エネルギーニュートリノを用いた宇宙物理学・素粒子物理学を高統計データに基づいて発展させることが期待されている。さらに電波・可視光・X線・ガンマ線・重力波天文学観測施設と連携し、マルチメッセンジャー宇宙物理学研究を先導する役割を担うであろう。超新星背景ニュートリノの観測においては、2020年にスーパーカミオカンデ[※]にガドリニウム (Gd) が0.01%の濃度で導入され、50%の捕獲効率で中性子を捉えることができるようになった (2022年には0.03%Gd濃度で75%中性子捕獲効率へ向上)。これにより、超新星背景ニュートリノの反電子ニュートリノの反応を中性子の同時遅延計測により捉えることができるようになり、年間数事象程度と予想されている超新星背景ニュートリノの観測が可能となった。Gdを導入したデータの解析によりモデルが予想する強度領域まで踏み込むことが予想される。

ダークマターの直接検出においては、過去10年の間にほぼ3桁の感度向上を果たしてきた。直接検出の原理は、原子核散乱を通じた太陽ニュートリノ等の観測原理を転用したものであったが、ついに太陽ニュートリノによる原子核散乱を観測できる高い感度に到達した。この著しい感度向上を実現した液体キセノン検出技術を基盤として、複数の既存

実験グループが協力し、XLZD実験グループ<22>を設立した。本実験の推進により、大気ニュートリノによる原子核散乱の観測が可能となるほど高感度なダークマター探索が実現するとともに、ニュートリノに関する研究の発展も期待される。他にも、より軽いダークマターや重いダークマター、さらにはニュートラリーノ以外の可能性も広く探られており、そのための異分野の研究者との連携が進んでいる。間接検出においては、近年観測された過剰な陽電子・電子数比がダークマター起源か天体起源かの結論は出ておらず、ガンマ線観測により一部の粒子質量範囲で断面積の強い上限を得た。より重い質量に対するガンマ線観測感度は、近い将来、理論で予言される断面積に達し検出が期待される。さらに、広い質量範囲で探索できるニュートリノ観測も高感度化が進んでいる。直接・間接検出いずれの方法でも、信号が得られれば、ダークマターの背景物理の解明や、宇宙の発展の筋書きの証拠を得る研究を進めることが可能となり、天文学及び素粒子物理学に跨る研究分野の著しい発展が期待される。

(9) 重力波

重力波を直接検出する重要性は、単に一般相対論の検証にとどまらない。電磁波やニュートリノとは相補的に宇宙を見る新たな天文学の窓、すなわち重力波天文学へと繋がる大きな可能性を秘めている。特に、電磁波では観測不可能な創生時の宇宙や、ブラックホールや中性子星の衝突の現場などの情報を伝えてくれる唯一の手段となり得る。このため、重力波の直接検出は、宇宙物理学のみならず物理学における21世紀最大のフロンティアの1つと言える。

以下に地上直接検出実験と人工衛星による次世代検出計画について、2025年までの進展と2030～2040年代の展望について記す。

(i) 地上直接検出実験の進展と将来計画

2015年9月に開始されたアドバンスドLIGO[※]としての第1回観測運転にて、連星ブラックホール合体時の重力波が2台のLIGO検出器によって直接検出され、さらに2017年には、連星中性子星合体による重力波も直接観測されるなど、この分野は過去10年の間に劇的な発展を遂げた。特に2017年の連星中性子星合体重力波の観測は、LIGOとVirgo[※]の3台による観測により、比較的精度良く到来方向が決定され、それを基にして光学観測によって電磁波対応天体が特定され、その後あらゆる波長の電磁波観測によって追観測が行われた。これはフェルミ衛星 (Fermi) [※]によるショートガンマ線バー

ストとほぼ同時に観測されたものであり、ショートガンマ線バーストと連星中性子星合体を繋ぐ初めての事例となったとともに、未解明の r 過程元素合成の証拠となるキロノバ[※]と考えられる放射が観測された。これは、重力波を含むマルチメッセンジャー天文学の大きな成果と言える。

2019年10月より、KAGRA<11>がLIGO-Virgoの協定に加わり、LIGO-Virgo-KAGRA (LVK) の体制となった。2023年5月より第4回国際共同観測運転 (04) がLVKとして開始された。04は2023年5月24日から2024年1月16日までの04aまでに検出された重力波信号はGWTC-4.0カタログ論文としてまとめて発表され、128個のコンパクト連星合体重力波が新たに追加された。そのほとんどは連星ブラックホール合体である。それ以前の重力波イベントと合わせて、これまでに検出された重力波イベントは合計218個となった。また2025年1月14日に検出されたGW250114はこれまでで最も強い信号であり、ホーキングのブラックホール面積定理[※]がこれまでにない精度で観測的に確認されるという成果があった。

KAGRA<11>は、2020年4月の03の最後にGE0600との共同観測を行ったのち、感度向上作業を経て04a最初の2023年5月24日から1ヶ月間の観測運転をLIGOと共にを行った。その後2025年6月11日にLIGOとVirgoとの観測運転を再開した。LVKの04cは2025年11月18日まで行われた。

LVKでは、2026年秋頃から半年程度の観測運転 (IR1) を行う予定である。第5回国際共同観測運転 (05) は現在のところ2028年頃に開始予定で、3年程度は継続する見込みである。05では、さらに多数のコンパクト連星合体が観測されると期待される。また、KAGRA<11>が国際観測ネットワークに加わって重力波源の方向特定精度が高まることで、連星中性子星合体重力波の電磁波対応天体が特定される可能性が高まる。それによってガンマ線バーストやキロノバ、r 過程元素合成の理解の進展などによって、マルチメッセンジャー天文学が発展すると期待される。

LVKの05以降の2030年代前半を目指したアップグレード計画としては、LIGOとVirgoではそれぞれLIGO A#(シャープ)、Virgo_nEXTと呼ばれる計画がある。KAGRA<11>には05後にkHz周波数帯に感度をもつ検出器に改造し、連星中性子星合体などの観測をし、重元素合成の現場の観測や中性子星の状態方程式の理解など、マルチメッセンジャー天文学に貢献していく計画がある。

2030年代後半から2040年代を目指した地上検出器の将来計画としては、第3世代レーザー干渉計とも呼ばれる欧州のアインシュタイン望遠鏡 (ET) [※]と米国のコスミック・

エクスプローラー（CE）[※]がある。特に、ETは地下に低温レーザー干渉計を建設するという、KAGRA<11>と同様のコンセプトを持つ検出器である。KAGRA<11>は重力波国際観測ネットワークの拠点の1つであるだけでなく、将来計画への重要な架け橋となっている。

(ii) 人工衛星による次世代検出計画

LISAは、宇宙空間での重力波の直接観測を目指す宇宙ミッションである。地上検出器では観測できないミリヘルツ帯の重力波を対象とし、銀河中心の超大質量ブラックホール合体、超大質量ブラックホールへコンパクト天体が落下する際の重力波、銀河系内白色矮星連星などの観測を主目的としている。2015年12月にはLISAの技術実証衛星であるLISA Pathfinderが打ち上げられ、2016年から2017年まで、衛星内の2つのテスト質量を重力以外の外乱を排除した自由落下運動させる実験が行われた。その結果、テスト質量間の加速度擾乱をLISAで要求される値よりもさらに小さく押さえることに成功し、LISA計画実現へ向けた大きな成果となった。2024年1月25日にLISAは正式に採択され、検討段階から実装フェーズへ移行した。LISAはESAが主導するミッションであるが、NASAが主要なパートナーとして参画している。打ち上げの目標は2035年頃とされている。

また、国内においてもDECIGO計画[※]が検討されており、地上検出器とLISAを繋ぐ周波数帯でのサイエンスを目指している。DECIGOは宇宙空間に置かれた3機の衛星間でファブリ・ペロー干渉計を実現するという野心的な計画である。それが最終期待感度を達成した暁には、初期宇宙のインフレーション時に生成した量子的重力波を検出し、そのスペクトルの形状によってビッグバンがいつ起こったかを同定する可能性があるなど、大きな科学的成果が期待される。現在ではその前哨計画であるB-DECIGO<2>の検討が進められているが、DECIGOのみならず、B-DECIGO<2>の実現も極めてチャレンジングなものであり、その技術的実現可能性や国際協力の下での研究体制の検討が進められている。

(10) コンピュータ・シミュレーション

現代天文学・宇宙物理学においてコンピュータシミュレーションは、観測、理論に次ぐ第3の研究手法として必要不可欠なものになっている。その目的は、理論の検証や実験的探索を通して、天体现象の物理を解明することにある。さらに現実的なモデルを用いたシミュレーションによって、天体现象の観測的予測を与えることも可能である。実際、最先端の望遠鏡と観測装置によって観測される天体を理解するためには現実的な物理を考慮

した高精度シミュレーションとの比較が必須となってきた。

シミュレーションには様々な種類があるが、ここでは第一原理的シミュレーションについて取り上げる。近年のコンピュータハードウェアとソフトウェアの発展、特にGPU等のアクセラレータの急速な普及とそれを活用した並列計算技術の高度化により、これまで不可能だった観測との比較に耐えうる現実的かつ大規模なシミュレーションが可能になってきている。このようなアクセラレータを中心とした計算機アーキテクチャへの移行は今後も加速すると見込まれ、我が国においても「富岳」に続く次世代スーパーコンピュータ（いわゆる富岳NEXT）が2030年頃からの運用開始を目指して計画されている。一方で、こうした新しい計算環境の性能を十分に引き出すためには、既存コードのGPU対応やアルゴリズムの再設計など、ソフトウェアの抜本的な改良が不可欠となっている。

シミュレーションの高度化には大きく2つの方向性がある。1つは粒子数や格子数の増大による高解像度化、そしてもう1つはより現実的な物理を導入することである。現在、各分野で様々な公開コードが開発されており、それらを用いた成果が増えてきている。

以下では、大規模第一原理的シミュレーションを用いた研究が行われている主な分野について、過去10年の進展と今後の展望について述べる。

(i) 大規模構造

現在、1兆体規模のダークマター粒子を用いた構造形成の宇宙論的重力多体シミュレーションが可能になっている。今後はさらに粒子を10-100兆体に増やし、銀河スケールを解像しながら、銀河群、銀河団の構造形成を調べる。

(ii) 恒星系

恒星系では、100万体の恒星を用いた球状星団の多体シミュレーションが可能になった。また、個々の恒星を分解した銀河の多体シミュレーションも可能になりつつある。これからは星形成・恒星進化・連星進化・化学進化等を考慮したより現実的なガス-恒星系モデルを用いた大規模流体多体シミュレーションによって銀河や星団の形成・進化の解明を目指す。

(iii) 星形成

近年、磁場や自己重力だけでなく、輻射輸送や化学進化・ダスト進化など現実的な素過程を考慮した星形成・星周円盤形成シミュレーションが可能になりつつある。今後は、より精緻な素過程を考慮した星形成・星周円盤形成シミュレーションにより、原始惑星系円盤の初期条件が明らかになるだろう。太陽では高解像度の計算で自転プロファイルの詳

細が観測と調和的になった。今後、表面から深層まで一貫した高解像度シミュレーションを実行し、11年周期の磁場の変化を解明する。

(iv) 惑星系

近年、ハミルトニアン分割に基づく高効率コードが開発されており、これまで現実的な合体条件を考慮した、10万倍規模の微惑星を用いた惑星集積の重力多体シミュレーションが可能になった。今後は、ガス円盤の進化を考慮し、惑星の移動も含めた1000万～1億倍規模の微惑星を用いた数十auスケールの広域シミュレーションによる多様な惑星系の形成が重要になるだろう。

(v) 高エネルギー現象

重力波が検出された中性子星連星の合体に関して、シミュレーションを用いて光学観測結果を解釈できた。超新星爆発に関しては、以前のシミュレーションではニュートリノ加熱により爆発を起こすことができなかったが、現在では爆発させることが可能になってきている。これらの分野では、重力、強い相互作用、電弱相互作用のより良い取扱を目指し、重力波、ニュートリノ、電磁波のマルチメッセンジャー天文学を推進する。降着円盤ではイベント・ホライズン・テレスコープの観測の解釈に不可欠なシミュレーションが行われており、今後さらに一般相対性理論に基づく高解像度計算を実行し、ジェットや円盤状態を解明する。

今後のシミュレーション天文学においては、AI・機械学習、とりわけ高精度シミュレーション結果を学習した代理モデル（シミュレーションの振る舞いを高速に再現するモデル）の活用が重要な役割を担うと考えられる。これにより、従来は膨大な計算時間を要していた広範なパラメータ探索や観測データとの比較を短時間で行うことが可能となり、理論モデルの検証と予測能力が大きく向上する。さらに、シミュレーションと観測の結果をその場で往復的に比較・更新するような、新しい研究スタイルの実現も期待される。一方で、物理的妥当性の担保や外挿領域での信頼性評価が不可欠であり、第一原理的シミュレーションと機械学習を相補的に統合する枠組みを整備することが求められる。今後は、計算資源基盤とデータ基盤の整備、人材育成、ならびに理論・観測との密接な連携を通じて、この新しい研究様式に体系的に対応していく必要がある。

3 推奨する天文学・宇宙物理学分野の長期計画と課題

本章では、2章で述べた天文学・宇宙物理学が目指すべき科学的目標を踏まえ、分野別コミュニティの議論を基に2030年から2040年代にかけて実現を図るべき長期計画を(1)に記述し、それらの計画を実現するために重要な鍵となる、共同利用・国際協力・人材育成の課題を(2)から(4)にまとめた。

(1) 推奨する天文学・宇宙物理学分野の長期計画

本分科会では、2030年から2040年代にかけて実現を図るべき長期計画を議論・検討するため、主として日本天文学会に所属する研究者に向けて、2025年前半において、未来の学術振興構想(2026年版)の募集に合わせて、天文学・宇宙物理学分野の将来計画の提案(意志表明)を募った。その結果、以下の22件の計画が提案された。各計画名末尾のカッコ内は略称を示す(番号は略称のアルファベット順)。

- 〈1〉 南極テラヘルツ望遠鏡による南極天文学の開拓と銀河進化の解明及び宇宙論パラメータの決定 (ATT)
- 〈2〉 宇宙重力波望遠鏡 B-DECIGO による天文学・宇宙物理学の新展開 (B-DECIGO)
- 〈3〉 CTA 国際宇宙ガンマ線天文台 (CTA)
- 〈4〉 極高エネルギー宇宙線国際共同観測実験 (Global Cosmic ray Observatory, GCOS)による次世代天文学の開拓と極限宇宙物理現象の解明 (GCOS)
- 〈5〉 赤外線観測用冷却宇宙望遠鏡で革新する銀河と惑星の起源の研究 (GREX-PLUS)
- 〈6〉 多波長・マルチメッセンジャー観測による初期宇宙探査・極限時空探査 (HiZ-GUNDAM)
- 〈7〉 NASA 6m 紫外線可視近赤外線望遠鏡 Habitable Worlds Observatory への参加 (HWO)
- 〈8〉 IceCube-Gen2 国際ニュートリノ天文台によるニュートリノ天文学の長期的展開 (IceCube-Gen2)
- 〈9〉 惑星間宇宙望遠鏡による新時代のダストフリー天文学の創成 (IPST)
- 〈10〉 宇宙望遠鏡 JASMINE による近赤外時系列位置・測光天文学で拓く天の川銀河と系外惑星の探究 (JASMINE)
- 〈11〉 大型低温重力波望遠鏡 KAGRA 計画 (KAGRA)
- 〈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計画

(LAPYUTA)

<13> 宇宙の起源と根本法則を探る (LiteBIRD)

<14> 大型サブミリ波望遠鏡 LST 計画の実現に基づくサブミリ波帯多次元掃天
天文学の創出 (LST)

<15> 南天における PeV 領域ガンマ線広視野連続観測 (Mega ALPACA)

<16> 次世代大型電波干渉計 ngVLA でもたらず宇宙史と生命の理解の新機軸
(ngVLA)

<17> 太陽 X 線・ガンマ線観測衛星 PhoENiX (PhoENiX)

<18> 冷却宇宙望遠鏡 PRIMA による赤外線天文学の革新 (PRIMA)

<19> 国際電波望遠鏡計画 SKA0 による現代天文学の開拓 (SKA)

<20> 次期太陽観測衛星計画: SOLAR-C(高感度太陽紫外線分光観測衛星)
(Solar-C)

<21> 30m光学赤外線望遠鏡 TMT による天文学・宇宙物理学の革新と太陽系外惑星
における生命の探求 (TMT)

<22> 大型液体キセノンを用いた宇宙暗黒物質直接検出実験 (XLZD 実験計画の
推進) (XLZD)

これらはすべて未来の学術振興構想(2026年版)に提案されたものであり、21件は2023年に発表された未来の学術振興構想[5]からの継続、1件が改訂版への新規提案であった。22件の計画の概要説明を付録として末尾に添付した。これらの提案を中心として、分科会では以下の5つの分野別コミュニティに将来計画の検討を依頼した。

- ・ 宇宙電波懇談会：電波天文学の研究者コミュニティ。1970年設立。会員数約400名。
- ・ 光学赤外線天文連絡会：光学・赤外線天文学の研究者コミュニティ。1980年設立。会員数約300名。
- ・ 宇宙線研究者会議：宇宙線物理学者（重力波研究を含む）のコミュニティ。1953年設立。会員数約400名。
- ・ 高エネルギー宇宙物理学連絡会：X線・ガンマ線天文学分野の研究者コミュニティ。1999年設立。会員数約200名。
- ・ 太陽研究者連絡会：太陽物理学分野の研究者コミュニティ。1994年設立。会員数約200名。

1章で述べたように、長期計画はコミュニティでの議論の開始から早くても10年以上、場合によっては20年以上の歳月をかけて実現されていくものであり、多数の研究者が検討を重ね、国民に是非を問いつつ推進される。本分科会では、その過程として各分野別コミュニティからのボトムアップの検討結果を以下に示す。

各分野別コミュニティが最優先あるいは優先すべき計画としたのは、

- アルマ2 [11] (電波分野)
- TMT<21> (光学赤外線分野)
- カムランド2 [12]・IceCube-Gen2<8> (宇宙線分野)
- HiZ-GUNDAM<6> (高エネルギー分野)
- Solar-C<20> (太陽分野)

である。

5つの分野別コミュニティが検討した将来計画の経緯と結果、ならびに、現時点で将来計画として優先すべき計画の詳細は4章に記載する。なお、今回分科会の将来計画の議論への提案はなかったものの未来の学術振興構想[5]に記載されているカムランド2 ([12] GV19, No178) と、現時点において建設中で、2030年代に大きな成果が出ると期待されるアルマ2 [11]については、既存資料を引用する形で参照することとした。

また、建設中または既に完成して観測を実施中の大型計画 (スーパーカミオカンデ、Hyper-K、XRISM、ローマン宇宙望遠鏡、アルマ望遠鏡、すばる等) については今回含まれていないが、これらの装置が安定に稼働して継続的に成果を創出すると同時に、装置が将来にわたって発展・拡張されていくことも極めて重要であることを付言しておく。

(2) 長期計画実現に向けた課題ー共同利用

20世紀後半、天文学は高エネルギー物理学などと並んでビッグサイエンス化が進み、研究者が利用可能な観測施設や実験設備の優劣が、研究成果の質を直接左右するようになった。1章(3)でも述べたように、そこで重要な役割を果たしているのが「共同利用」というしくみである。ここでは、「共同利用」という形態でビッグサイエンスを推進することにより生じた諸課題について考察する。

① 日本における共同利用とその体制

日本の天文学・宇宙物理学分野において「共同利用」とは、一般に、地上または宇宙に設置された大型望遠鏡（電磁波、宇宙線、重力波などの集光器または検出器）を整備し、それによって得られる観測機会やデータを、公募や共同研究を通じて全国の大学・研究機関の研究者に提供する仕組みを指すといっている。

望遠鏡建設の中核的役割は、国立天文台や JAXA 宇宙科学研究所が担う場合が多いが、宇宙線研究所のように、共同利用・共同研究拠点として位置付けられた大学附置研究所がこれを担うこともある。また、建設過程、特に検出装置の開発においては、大学等が参画する場合も多く、こうした関与も広い意味で「共同利用」の一環とみなされている。

「共同利用」という日本の研究機関の形態（参考資料 1 参照）は、他国にはあまり見られない特徴を有している。欧米においては、一般に研究を推進する機関（大学や研究所など）と、研究者に対してサービスを提供する機関、すなわち大型望遠鏡の建設・運用や大規模データの維持・管理を担う機関との間で、役割分担が比較的明確になされている。例えば、マックス・プランク研究所は前者に、ヨーロッパ南天天文台（ESO）は後者に位置付けられるといえる。もっとも、後者の機関にも研究者は所属しているが、自らの研究テーマの追求が必ずしも最優先とされるわけではない。このような在り方は、職務分担を明確にするという点で、欧米型のいわば「分かりやすい」制度設計と捉えることができる。

これに対し、日本の大学共同利用機関は、これら 2 つの役割を併せ持っている。この点が、大学共同利用機関の性格を分かりにくくしている一因でもある。では、大学共同利用機関と大学の役割はどのように異なるのか。もちろん、大学には研究に加えて教育、とりわけ学部教育という重要な役割がある。しかしながら、いずれも最先端の研究を推進する機関である点においては共通している。このことは、国立大学法人法において、大学共同利用機関法人が国立大学法人と同様の組織および業務を有するものとして位置付けられていることから明らかである。

② 大学共同利用機関等と大学—その果たすべき役割と課題

天文学・宇宙物理学のように、研究施設（望遠鏡）が大型化し、1 大学がその建設と運用を実施することに困難が生じるような場合、大学共同利用機関等と大学の果たす役割に関して 2 つの問題が生じる。1 つは、【大学共同利用機関等と大学との関係】であり、もう 1 つは、【大学共同利用機関等の内部における研究者の役割分担】である。

【大学共同利用機関等と大学との関係】

大学共同利用機関等が研究施設の建設の中核的役割を果たす場合に、大学との共同開発研究や、研究者・技術者の人事交流などを、どのように維持・活性化させていくかが問題点である。以下では、研究施設の建設と運用を専ら大学共同利用機関等側が担う場合とそうではない場合に分けて課題を述べることにする。

まず、国立天文台のように望遠鏡の建設と運用を専ら大学共同利用機関が担う場合の大学との関係について考察する。その場合、大学との共同開発研究については、望遠鏡の焦点に設置する観測装置や、望遠鏡本体とは分離可能な光学系など、大型研究施設から切り離し得る部分に関しては、その開発・製作を大学共同利用機関等以外（例えば大学の研究室）が担うことは一般的に行われている。これは今後においても共同利用の重要な形態の一つであろう。このような協力は天文学の先進国において広く行われており、これを通じて研究者の人事交流も促進されている。

次に、JAXA 宇宙科学研究所を例に大学との関係について考察する。国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構(JAXA)は、大学との共同等による宇宙科学に関する学術研究をその目的の1つとし、宇宙科学研究所においては、「大学共同利用システム」として、大学の研究者等との共同作業による宇宙科学プログラムを選考、実施し、中核的な研究拠点となる。宇宙科学プログラムには、科学衛星および宇宙機搭載科学機器、観測ロケット、大気球その他飛翔体および各種試験装置を大学等の研究者の利用に供することが含まれる。このような定義から、宇宙科学プログラムの実施、飛翔体の開発研究、運用（観測）、データ処理および配布、解析には、大学との共同が不可欠である。天文学においては、大気圏を脱出する目的が大気吸収だけでなく擾乱を避け、高精度化することへと移りつつある。このような観測技術の高度化、また衛星の大型化、あるいは国際ミッションへの参画などによる複雑化の中で、大学との共同でなしうる宇宙科学プログラムの提案がなければ、宇宙科学研究所のみではプログラムを実行することはできない。中核機関である宇宙科学研究所は、JAXA の一部として JAXA 全体の機能である開発体制や地上局ネットワークを用いつつプロジェクトを進行させる役割を担うとしても、どのように宇宙科学研究所と大学が対等なパートナーとしてミッション提案から観測までの責任分担を果たしていくかが課題である。また研究者としては、プロジェクトの中で、宇宙研の研究者が担う役割、大学の研究者が担う役割があるが、研究者を育成するのは大学であり、人材育成、交流が途切れては宇宙科学は自走しない。個々の計画の実施だけではなく、プログラム全体の立案や長期戦略においても、大学研究者の責任ある協力が不可欠である。特に大型ミッ

ションでは、個々の研究者の積極的な関与・協力が失われれば、宇宙科学において天文学・宇宙物理学の撤退を招きかねない。

2004 年の大学法人化後、このような研究協力が大学による大学共同利用機関等の下請的業務とみなされる問題が指摘されたこともあった。しかし現在においても、大学共同利用機関、共同利用・共同研究拠点、あるいは宇宙科学研究所と大学との研究協力が衰退したとは見られないことから、このような協力関係は依然として有効に機能しているのではないかと考えられる。

大学共同利用機関等と大学等との人事交流については、研究施設の大型化に伴い、大学共同利用機関等に所属する研究者が、通常の大学の天文学・宇宙物理学の範囲では扱われないような研究や業務に従事する場合、大学との人事交流が困難になると指摘されている。しかし、実際には一定の人事交流により開発的研究を行う天文学・宇宙物理学分野の研究者が国内の研究機関に広く配置され、日本の天文学の発展に寄与してきたといえる。これが不十分であるか、また過去 40 年間に於いて状況の変化が起きているかどうかは、定量的検証が行われてはいない。研究の高度化・専門化が進む中で、今後も活発な人事交流を維持するためには、大学共同利用機関や大学等に所属する研究者の人事交流に対する意識を高く保つことが重要となる。

【大学共同利用機関等の内部における研究者の役割分担】

望遠鏡本体の大規模化に伴い、装置も大型化・複雑化する傾向にある。それに伴い、大学共同利用機関等および大学の双方において、共同開発に必要な手続き（例えば各段階でのレビュー等）が複雑化していることは否めない。そのため、共同利用機関内部の研究者には、大学の研究者とは異なる施設運用業務のみならず、プロジェクト・マネジメント能力の向上が求められる。

大学共同利用機関等の内部における研究者の役割問題とは、例えば、研究者が自らの興味に基づく研究の推進と共同利用業務との間で乖離を生じさせる可能性である。大学共同利用機関等は、共同利用というサービスを提供するだけでなく、利用者との共同研究を通じて自らも先端的研究を推進する役割を担う。そのため、所属研究者には一定の研究の自由が認められている。研究者が自由に行う研究と共同利用が密接に関連し、どちらも大きな目的の実現に必要であると感じられる場合には問題は生じない。

しかしながら、重要とされる研究分野の変化や研究者自身の関心の変化により、そこ

の距離ができる場合がある。このような状況は頻繁ではないものの、一定程度存在すると考えられる。その場合、機関内でのマネジメントにより、それぞれの研究者に適切な仕事を割り当てる、また業務に対し適切な人を割り当てることが求められ、その際には業務を依頼する側と遂行する側との間における対話と合意が必要である。共同利用の趣旨と必ずしも一致しない研究を行う場合であっても、その研究の自由を尊重しつつ、別途共同利用業務への貢献の在り方を明確化し、双方を評価に適切に反映させることが求められる。ただし、その比重は職務内容や責任に応じて調整されるべきである。職務内容が細分化・専門化した大学共同利用機関等においては、今後徐々に上記のようなマネジメント体制の導入が求められるであろう。それは上記大学と共同利用機関の間での人事交流を前提としたものでなければならない。

(3) 長期計画実現に向けた課題－国際協力

天文学分野では、観測装置の高度化・大規模化に伴い、単一国では実現が困難な国際大型計画が、分野の発展を主導する中心的な枠組みとなりつつある。これらの計画は、従来の枠組みでは到達し得なかった観測領域を切り拓き、ブレークスルー創出の中核を担うものであり、今後その重要性はさらに高まると考えられる。こうした国際協力への参画は、最先端データへのアクセスを通じて科学的成果創出の機会を拡大するとともに、国際共同研究における継続的なプレゼンスの基盤となる。また、装置開発や運用への参画は、研究者・技術者・運用担当者が国際共同事業の現場で経験を蓄積し、次世代へ知見を継承する機会ともなり、科学的活動を支える研究基盤の維持・発展に寄与する。我が国においては、こうした国際協力の枠組みに継続的に関与することが、国際的プレゼンスの維持・向上の観点から極めて重要である。

一方で、その推進にはいくつかの課題がある。国際大型計画への参画にあたっては、我が国の規模や役割に応じた貢献を行い、それに見合う成果および波及効果を確保するという基本的な考え方が重要となる。ここでいう波及効果には、関連分野への学術的・技術的波及のみならず、装置開発・設備維持に関する技術的知見の継承、研究者・技術者・マネジメント人材の育成など、将来計画を支える研究基盤形成への寄与も含まれる。しかしながら、我が国が担いうる役割は、科学的優先度だけでなく、確保できる資金および人的リソースによっても制約される。資金確保としては、大きくは科学研究費助成事業（以下、「科研費」とする）と文部科学省を通じて財務省に概算要求を行う運営費交付金や施設整備費があるが、その中間規模、期間 10 年程度で予算額 50 億円程度の予算を措置す

る仕組みが存在しない。また、多様な利害関係者が関与する国際計画では、合意形成や役割調整が計画推進の重要な要素となり、貢献に見合う成果や波及効果を確保することは必ずしも容易ではない。このような制約を踏まえれば、すべての国際大型計画に実効的に関与することは現実的ではなく、科学的優先度と見込まれる成果を踏まえた戦略的選択が必要となる。その際、参画形態は、計画全体に対して主要な責任を担う形態から、特定分野に重点化した貢献を行う形態まで多様であり、また、既存の技術的・人的基盤を活用した in-kind 貢献を含め、貢献の在り方にも様々な選択肢が存在する。これらは、我が国の強みを活かしつつ、将来の研究基盤の維持・発展へと結び付ける観点から検討されるべきである。

国際大型計画への参画を実効的なものとするには、それを支える実施能力の維持が鍵となる。こうした計画は、建設から運用に至るまで長期間にわたり継続されることが多い。また、実施にあたっては、観測装置を用いて科学成果を創出する研究者層のみならず、装置開発、ソフトウェア開発、開発管理、システム統合、品質管理、データ基盤整備、運用、国際調整などを担う人材が必要となる。さらに、国際計画では、国際的な協力関係や社会・経済情勢を含む外部環境の変化など、計画推進に伴う不確実性を完全に避けることはできない。国際計画への参画は、こうした不確実性を前提としながら、一国では到達し得ない科学的成果を獲得するとともに、その過程で得られる経験や知見、技術的蓄積を将来へ継承することでもある。そのため、計画の状況に応じて役割や実施体制の調整にも関与し、国内外の関係者と連携しながら計画を着実に進めていくことが重要となる。このように、長期にわたる計画を、多様な専門性を結集しながら推進していく力は、実際の計画実施における経験の蓄積を通じて形成される側面が大きい。その推進力を担う人材と組織的基盤を維持し、知見を蓄積・継承していくことは、安定的かつ持続的な計画推進を支えるとともに、分野の将来にとって重要な意味を持つ。その一方で、計画実施への関与が若手・中堅研究者や技術系・マネジメント人材のキャリア形成に及ぼす影響にも留意する必要がある、これは分野の持続可能性に直結する課題である。

こうした実施基盤の維持・継承において、大学共同利用機関は中心的な役割を果たしている。大学共同利用機関は、建設および運用、国際調整、技術継承、コミュニティ支援を担う実施主体として、国際計画を支える基盤的人材と知見を蓄積・継承する場として重要な役割を担っている。一方で、計画を支える人材の多くは大学における教育・研究活動を通じて育成され、研究基盤も分野全体の多様な研究活動と連動しながら維持・発展される必要がある。したがって、人材および研究基盤の課題は、大学共同利用機関のみならず、

大学を含むコミュニティ全体の課題として捉えるべきである(3章(2)参照)。その上で、大学共同利用機関と大学は、それぞれの目的と機能に応じて異なる役割を担っており、国際大型計画において求められる貢献も必ずしも同一ではない。特に長期運用、システム統合、国際調整などを担う基盤的人材については、その継続的な経験の蓄積を支える上で、大学共同利用機関が果たす役割は極めて大きい。

最後に、国際大型計画は単独で成立するものではなく、中小規模計画や既存施設による科学・技術・人材面での蓄積の上に成り立つものである。したがって、将来計画の検討にあたっては、個別計画の科学的意義のみならず、分野全体としてどのような研究基盤、人材、国際的役割を将来にわたり維持・発展させていくかという観点を共有しながら議論を進める必要がある。

(4) 長期計画実現に向けた課題—人材育成

日本の宇宙物理学・天文学における人材育成は、これまで主として「一流の研究者を育てる」ことを目標に組み立てられてきた。その結果、日本の天文学は世界的にも高い評価を受けてきた一方で、博士人材のキャリアの細さや任期付きポストの多さ[10]、技術・支援・教育・アウトリーチ・プロジェクトマネジメント職の評価不足、産業界との接続の弱さなど、多くの歪みを抱えるに至っており、人材育成に関する構造的課題も顕在化している。

ここでは、日本の天文学・宇宙物理学を支える主な職種を整理し、それぞれについて、これまでの人材育成の状況と、今後の人材育成のための改善点を概観する。その結果見えてきたことは、従来の「研究者一直線」型の人材育成から脱却し、博士号取得者・天文学や宇宙物理学の教育を受けた学生が、研究・技術・運用・支援・教育・産業など多様な職種に進むことを前提にした教育や人材育成の必要性である。「多様な職種の専門職チームとして宇宙物理・天文学が成り立っている」という認識を共有し、教育内容・評価制度・キャリア支援・社会との連携を総合的に見直していく必要がある。その中心的な役割を担うのは、現役の天文学者自身であり、学会・研究機関・大学における制度設計に積極的に関与していくことが求められている。

① 研究者

日本の天文学・宇宙物理学研究者は、基本的に、大学学部で物理学・天文学・惑星科学を専攻し、大学院で天文学や宇宙物理学分野の研究施設に所属して研究を本格的に開始し、学会発表や論文を発表して博士論文をまとめ、博士号を取得するという流

れで育成されてきた。(過去には、大学に就職してからキャリアを積み、博士号を取得する場合もあったが、昨今ではこのようなケースはほとんどみられない。) こうした流れは、日本の天文学・宇宙物理学が世界トッププラスの研究水準を保つ上で一定の成果を挙げてきた。しかし、キャリアパスの観点からは多くの課題が指摘されている。

大学院重点化によって任期付きポストが増加する一方で、定年制教員・研究員のポストは限られるため、キャリアパスの不透明さと将来への不安が若手研究者の大きなストレスとなっている。研究者の雇用が不安定であるという認識が社会に広がると、将来、人材が獲得できなくなる可能性もある。近年の高校生は、進路・学部選択において「興味のある学び」だけでなく、「資格取得や将来の就職・職業安定との結びつき」を強く意識している[13]。したがって、従来通りの研究者を育てることのみを重視した教育や育成方針を守り続ければ、前述したアカデミックポストに対する将来の不透明さから、高校生・大学生が天文学・宇宙物理学を専攻しなくなり、将来の人材不足となることが懸念される。

従来の「研究者一直線」型の人材育成から脱却し、博士号取得者・天文学や宇宙物理学の教育を受けた学生が、研究・技術・運用・マネジメント・教育・産業など多様な職種に進むことを前提にカリキュラムを設計する必要がある。

② 技術系人材

天文学・宇宙物理学のブレークスルーは、常に新しい観測装置の開発と共にある。天文学・宇宙物理学の研究成果創出には、天文学者の探究心だけでなく、その観測を可能にする装置を開発し、運用・維持する「技術系人材」の存在が不可欠である。技術系人材は、望遠鏡・観測装置・衛星搭載機器・制御システム・データアーカイブ・インフラなどを担当し、研究者と二人三脚で、人類がまだ見たことのない宇宙の姿を捉えるための「眼」を創り出し、育て、守る専門家集団であり、日本の天文学・宇宙物理学の基盤と発展を支えている。

● 望遠鏡・観測装置・衛星などのエンジニア

技術系人材は、大学や大学院で天文学・宇宙物理学の装置開発などを学んだ人材や、高専や大学、大学院で電気・電子工学、機械工学、情報工学、光学、精密工学などを学んだ人材が、その後、現場でのOJT (On-the-Job Training) を通じて、極低温技術、真空技術、高精度光学・機構設計など、天文学・宇宙物理学固有の要求に対応できるように育成されることが多かった。また、運用段階の研究設備に対しては、望遠鏡や衛

星運用、観測機器運用、観測者支援、サーバ運用、データパイプライン管理などを担うスタッフがおり、その人材育成は基本的に OJT 中心である。このような人材は、プロジェクトを通じ、システムエンジニアリングやプロジェクトマネジメントを実地で学んできた。

技術系職員の役割と育成システムは、時代と共に大きく変化してきた。国立大学・大学共同利用機関が法人化される以前、技官は国家公務員として採用され、定年までの長期雇用が保証されていた。そのため、配属された観測所で先輩職員から直接指導を受ける OJT を通じて、一人前の技術者へと成長していくのが一般的だった。数十年単位の長期的な視点で技術を継承し、腰を据えて新しい技術開発に取り組むことが可能な環境だったと言える。2004 年の国立大学・大学共同利用機関の法人化は、技術系職員のあり方に大きな影響を与えた。正規職員の採用減と任期付き職員の増加により、これまでの OJT モデルは揺らいでいる。運営費交付金の削減圧力の中で、正規職員の採用は抑制される傾向が続いた。その一方で、大学共同利用機関などでは、プロジェクトの予算で雇用される任期付きの職員や、外部企業への委託が増加した。これにより、特に若手・中堅層が薄くなるという課題も生じている。数年の任期で入れ替わる職員に、時間のかかる高度な技術を十分に伝えきれないという「技術継承の危機」も指摘されている。この課題に対し、各大学や研究機関では、体系的な研究プログラムの導入やキャリアパスの明確化、全国の技術職員の連携強化などの新たな取り組みが始まっているものの、依然として不安定な雇用形態が若手技術者の確保・育成の障壁となっている点は、日本の天文学・宇宙物理学が抱える大きな課題である。さらに、人口減少に伴い、日本のエンジニアリング人材は不足することが予測されている[14]なかで、工学系学生にとって「天文の技術職」が可視化されておらず、キャリアとして選ばれにくいという課題もある。

● データサイエンティスト・ソフトウェア開発者

従来、日本での天文学・宇宙物理学のデータ処理・ソフトウェア開発は、多くの場合、大学院生・研究者がプログラム言語を独学し、「研究者が自らコードを書く」文化の中で進められてきた。また、ビッグデータ・機械学習の導入にともない、「アストロインフォマティクス」的な分野が拡大している。しかし、急速な進歩のため、「天文データサイエンティスト」「アストロインフォマティシャン」に相当する職種が制度上明確でない。また、コード・システム開発に多くの時間を費やすと、論文数が減り、(論

文数を基準にした) 伝統的評価基準で不利になる。一方、産業界ではデータサイエンティストやソフトウェア開発者のニーズは高い。結果として、民間企業で職を得た場合との待遇差が大きく、優秀な人材を確保しにくい問題がある。

● 研究開発マネジメント (URA など)

URA (リサーチ・アドミニストレーター) は、科研費などの外部資金獲得支援、国際プロジェクト調整、産学連携などを行い、天文学研究を間接的に支える職種である。こうした研究開発マネジメント人材は不足し[15]、また、各人の持つ能力が社会の急速な変化に対応できていないなどの問題が生じている。これらの研究開発マネジメント人材は、科学技術振興機構の養成プログラムなどを通じ、それらの職能とキャリアパスが整備されてきた。昨今は、天文・物理系博士取得者が URA として採用される事例も増えている。

URA をはじめとする研究開発マネジメント人材に求められる役割・業務が高度化・多様化する一方で、任期付きポストの多さから長期的な支援体制を構築しにくいという課題がある。また、専門性の評価が不足していることも課題である。その 1 つに「URA は研究者への道が絶たれた人の受け皿」という誤解がある。法制度や研究セキュリティ／インテグリティへの理解、交渉能力、英語コミュニケーション、プロジェクト管理などのスキルが研究業績と比べて正当に評価されていないためである。

● アウトリーチ・教育担当

アウトリーチ・教育は、単なる「説明役」ではなく、教育工学・科学コミュニケーション、メディア対応・リスクコミュニケーションの専門性を要する高度な専門職である (なお、ここでの「教育」は高校までの教育、学校外で行う教育、教養としての教育を指す)。さらに、活動を行う上で、マネジメント能力も不可欠である。自然科学分野全般で、アウトリーチは科学への信頼・関心・知識や科学者に対するイメージに影響しうることが研究で示唆されている[16]。アウトリーチ活動は、将来の研究者・技術者の「すそ野」を広げたり[17]、社会的理解や支持を通じて長期的に研究環境と支える基盤を形成したりする役割がある。しかし、研究組織内では、「専門の研究や教育」と「付随的な広報」程度に分断して捉えられることが多く、日本の研究機関や大学内での位置付けは低くなりがちである。専門職として人的リソースが正式に割り当てられない場合もあり、正式に専門職としての雇用がある場合も任期付きのポストであったりすることが多く、キャリアパスとしても不安定である。この状況下では当然なが

ら、体系的な教育や人材育成の機会は限られており、実務を通じた OJT でスキルを獲得しているのが実情といえる。研究機関や大学において教育・アウトリーチを業績として認め、人事・評価で明示的に扱う文化が未成熟であることが課題である。研究成果を一般市民にわかりやすく、平易な言葉や表現で伝えることは、科学研究を社会とつなぐ重要な営みであり、公的資金に支えられる研究の成果を国民に還元するうえでも不可欠である。

4 各研究者コミュニティの将来計画

以下は、5つの分野別コミュニティが2025年末までに検討した将来計画の経緯と結果、および、その時点で将来計画として優先すべき計画の詳細を記述したものである。

(1) 電波天文学分野の計画

① コミュニティでの議論の経緯

宇宙電波懇談会（以下、宇電懇とする）は、天文学・宇宙物理学の長期計画の推薦に際して、コミュニティの意見を集約しかつ綿密な議論の下で推薦書を作成する方針とした。長期計画への掲載を希望する意思表示を提出した電波天文分野の大型・中型将来計画は、以下の5計画である。

- Square Kilometre Array Phase 1 (SKA1)<19>
- 南極 10mテラヘルツ望遠鏡 (ATT10)<1>
- LiteBIRD — 熱いビッグバン以前の宇宙を探索する宇宙マイクロ波背景放射偏光観測衛星[26]<13>
- 大型サブミリ波望遠鏡 LST/AtLAST<14>
- 次世代大型電波干渉計 ngVLA<16>

第25期日本学術会議未来の学術振興構想[5]におけるこれらの計画の推薦のために、2021年3月18日に行われた宇電懇総会における合意に基づき、以下の(i)-(iv)の手順を踏むことを決定した。また、第26期の更新においては、(v)-(vii)の経緯を経た。最終的な推薦は、宇電懇運営委員会の責任の下での結果を総合的に判断して行うこととした。

(i) 電波天文分野将来計画検討シンポジウム

2021年7月31日に標記シンポジウムをオンラインで開催した。参加人数は約100名であった。上記5計画の代表者に講演して頂き、各計画内容について電波天文コミュニティの理解と共有を図った。

(ii) 宇電懇会員による将来計画に関する意向調査

天文学・宇宙物理学の長期計画の推薦に対して意向表明が提出された将来計画の推薦順位付けについて、宇電懇会員の意向を直接問う目的でオンライン投票を実施した。投票は2021年8月9日から31日の期間に、3件の大型将来計画（SKA1、LST、ngVLA）のうち各会員が今後最も必要と考える計画を選択する形式で行われた。

(iii) 電波天文分野将来計画検討ワーキング・グループ（第1期）における集中的議論

2021年6月18日より、宇電懇運営委員会の諮問機関として、「電波天文分野将来計画検討ワーキング・グループ(WG)」を設置した。当WGは15名の委員で構成され、構成員は会員の投票から選ばれた候補者の中から、様々なバランスを考慮して運営委員会が選定した。当WGでは、5つの将来計画に対して各々数名から成る評価班を割り当て、運営委員会から示された評価基準及び分科会から示された評価基準に従って綿密な評価を行った。その後、各評価班が作成した詳細な評価結果に基づき、WG全体で慎重かつ厳しく議論を重ね、WGとしての答申を作成した。

(iv) 将来計画検討ワーキング・グループ（第1期）の答申に基づいた宇電懇運営委員会の議論

上記(i)-(iii)の結果を踏まえて、運営委員会で最終的な議論を行った結果、「大型計画として、長波長電波干渉計としての SKA1<19>と ngVLA<16>の2計画を同率1位で推薦し、LST<14>を3位で推薦する」という結論を得た。同率1位で推薦する2計画は互いに相補的で、いずれも非常に強いサイエンスケースを有するものと判断された。また、LiteBIRD<13>を継続中の計画として引き続き強く推薦、ATT10<1>を中型A計画として推薦することとした。併せて、宇電懇としてはアルマ望遠鏡計画へ日本が継続して参画することは最優先事項と捉えており、それを引き続き強く望むことも表明することとした。

(v) 2023年以降の計画の動向

文部科学省「学術研究の大型プロジェクトの推進に関する基本構想」（ロードマップ2023）への募集に際し、宇電懇からの推薦依頼のあった3計画 LiteBIRD<13>、SKA1<19>、ATT10<1>に対して、宇電懇から推薦を行った。このうち、LiteBIRD<13>がロードマップ2023に掲載された。

2023年度より ALMA の継続発展を企図した文部科学省・大規模学術フロンティア促進事業「アルマ2」が開始された（詳細は後述）。2024年、LiteBIRD<13>は、JAXA 宇宙科学研究所を実施機関とし、東京大学 Kavli IPMU や岡山大学を中心として計画のリフォーメーションを行うなど、重要な実施体制の見直しと進展があった。

他方、国際的動向もあった。SKA1<19>の建設が開始され、ますます日本の参加が待たれる状況となった。2024年には3アンテナによる最初のフリンジが得られるなど、重要なマイルストーンを達成した。また、2024年3月に、ミリ波から遠赤外線波長の次世代天文学計画を展望する国際天文学連合(IAU)主催の Kavli-IAU Workshop on Global Coordination が開催され、日本のアルマ2に相当する ALMA 2030 の推進および2040年代の ALMA 拡張計画の検討、ngVLA<16>の推進、LST/AtLAST<14>を含む地上大口径単一開口望遠鏡の推進、遠赤外線衛星ミッションの推進の4件が推薦された。これらの国際的動向は、我が国の電波天文学と整合するものである。

(vi) 電波天文分野将来計画検討ワーキング・グループ（第2期）における集中的議論

地上計画がメインとなる電波天文学分野では、大型の地上望遠鏡を推進する国立天文台が主導ないし関連する大型計画が多い。国立天文台では2025年度中にサイエンスロードマップを策定し、2026年度末までに第5期中期計画の実施計画を立案する予定である。

これに呼応する形で、2025年4月に第2期電波天文分野将来計画検討ワーキング・グループ(WG)を改選・組織した。第2期WGは、意向投票に基づいて運営委員会により選出された12名の委員、隣接分野からの6名の外部委員、及び関係機関からの7名のオブザーバからなる。本WGの主たる目的は、国立天文台サイエンスロード

マップ・実施計画ならびに「天文学・宇宙物理学の長期計画」へとインプットする「日本の電波天文学ロードマップ」の策定である。本ロードマップでは、将来計画と実施中の現観測所をあわせた合計 12 計画を対象に、実現可能な予算・施設・人的資源や技術的成熟度の推移を時系列に配し、2035 年までの期間ごと・実施機関毎の優先度を描く。WG では、科学検討班、資源統合班、技術計画班に別れ多角的に検討を行っている。これをロードマップ策定班が文書にまとめ、2026 年 2 月にコミュニティに公開し意見を受けながら、同年 6 月に最終文書を公開する予定である。2025 年 12 月現在、WG では各計画から各種資源・技術的成熟度の年次プロファイルを集めて統合する作業を進めている。

以上の通り、WG では、定量的な資源の積み上げと技術的成熟度の推移に基づく優先順位と実現可能な計画の立案を実施することとした。最終的に優先順位を決めるものの、性急な長期計画への答申は不可能と判断した。したがって、(iv)で述べた前期の長期計画の優先順位を尊重しつつも見直すこととし、「コミュニティの存亡に関わる極めて重要な長期計画」として「アルマ 2」を挙げ、「次に重要な長期計画」としてその他の計画を一律に列挙することとした。

(vii) 宇宙電波懇談会シンポジウムにおける議論

コミュニティレベルのシンポジウムを開催し、2025 年 1 月に現観測所を含む各計画間の相互関係、同年 12 月に日本の電波天文学ロードマップに関する集中した議論を行った。後者の機会に前述の WG 答申案を提示し、コミュニティからの意見の集約を行ったうえ宇電懇運営委員会で取りまとめ、「第 26 期長期計画」の答申とした。

② 優先すべき計画

上述の通り、宇電懇は長期計画の優先順位を整理している段階にある。以上の経緯から、「アルマ 2」を「コミュニティの存亡に関わる極めて重要な長期計画」として位置付け、最優先計画として推進する。SKA1<19>、ngVLA<16>は前期の長期計画の中で「最優先する長期計画」と位置付けられており、第 26 期に関しても両者とも優先度が高いことに変更はない。また、LiteBIRD<13>は対応実施機関 JAXA において戦略的中型計画に選定されて計画を推進しており、こちらも優先度が高いことに変更はない。しかし、現在 WG で検討中のため、検討中のすべての将来計画を暫定的に「次に重要な計画」と位置付け、次節「長期計画の紹介」に記載した。これらの計画の表示順は、未来の学術振興構想への申請順とし、優先度順となっていない。

【アルマ 2】

ALMA は南米チリのアタカマ高地（標高 5000m）に設置された 12m×54 台、7m×12 台の計 66 台のアンテナからなる電波干渉計であり、最大約 16km の基線によって約 5 ミリ秒角の分解能を達成している。周波数約 35–950 GHz のミリ波・サブミリ波で低温ガスや塵を捉え、惑星系誕生現場の多重リング構造の発見や、宇宙誕生後わずか 3

億年の銀河での酸素の検出など、惑星系形成や銀河進化をはじめとする幅広い分野を牽引してきた。

「アルマ2」計画は、国際共同事業として運用中のALMAを2030年代へ向けて大幅に強化するものである。科学目標としては、(1) 地球軌道スケールでの惑星系形成過程の理解、(2) 惑星系誕生過程での生命素材物質の理解、(3) 宇宙における元素合成の開始地点の特定、の3大目標が掲げられている。これらを実現するため、感度約2倍、解像度2倍以上、同時観測帯域2倍以上という観測機能の強化を図る。その内容は国際合意に基づき策定された将来開発ロードマップに整合しており、日本は広帯域・高感度受信機やデータ伝送系などを主導し、相関器・デジタル系の更新と併せて観測効率も飛躍的に高める。これらの機能強化は、科学運用を継続しながら、アルマ2計画期間全体を通して段階的に実施される。

大規模学術フロンティア促進事業としての計画実施期間は2032年度までであり、この期間中にも成果は期待されるものの、アルマ2計画による機能強化の効果が十分に発揮され、科学的・技術的成果が本格的に結実するのはその後の時期になると見込まれる。したがって、宇電懇はこの期間を超えたアルマ望遠鏡の継続と発展を強く推薦する。

③ 当該分野の計画全体像と相互関係

長期計画の紹介

【SKA1】

SKA1<19>は既存の望遠鏡を圧倒する高感度と解像度を達成する国際共同利用の望遠鏡計画である。豪州に観測周波数50-350 MHzを網羅する開口アンテナ(LOW)13万基と、南アフリカに0.35-15 GHzを網羅するパラボラ鏡(MID)197台を最大150 kmの範囲に展開し、英国にある本部から一体的に遠隔運用される。低周波数の観測を開拓する点に特徴がある。

SKA1は高感度・広視野に加えて観測モードの複数同時実行能力を有し、かつてない広域探査能力を実現する。この圧倒的な性能で、宇宙で最初の星やブラックホール、磁場が生まれる時代のほぼ唯一の徹底探査、パルサーの精密観測による重力理論の検証、宇宙論の超精密化や、突発天体現象の徹底究明を目指す。低周波数で宇宙再電離期(EoR)の観測を行う能力では他を圧倒するため、標語的には「星が生まれる前の宇宙を見る」望遠鏡であると言える。

【ngVLA】

次世代大型電波干渉計ngVLA<16>は、米国国立電波天文台が計画を主導し、初期運用を経て2040年代に本格稼働する大型共同利用施設である。北米大陸を中心とする約9,000 kmの範囲に口径18mと6mのアンテナを合計263台設置し、約20 cm(約1 GHz)から3 mm(100 GHz)の波長帯において、他を圧倒する感度と角度分解能を実現する。

ngVLA は宇宙物理学の広範な領域にわたる研究対象を想定している。中でも惑星系形成の観測と、それを通じて我々人類のような生命が存在する条件が宇宙史の中でいかに整えられてきたのかという疑問に対し、一貫した視座を提供することを重視する。特に、生命関連物質が星間物質を起点にどの段階で用意されるのかの探求においては、分子科学分野や地球惑星科学分野との連携が期待される。

例えば、炭素を5個以上含む環状分子やアミノ酸のように鏡像異性体を有する大型の有機分子は、分子の特性上 100GHz 以下の低い周波数帯での高感度観測が最も効率的である。生命を育むに至った化学的歴史を探るには、原始地球のような惑星が誕生する場でのそれらの分子の検出や生成過程の解明が重要であるが、これには岩石惑星の材料として集まっている塵を透過して見通す事が可能なセンチ波帯での高感度高分解能観測が必要不可欠である。このため、ngVLA は「地球のでき方がわかる」望遠鏡、そして「生命関連物質の化学進化史を探ることができる」望遠鏡とも言える。

【LST/AtLAST】

ミリ波・サブミリ波帯において広い視野（0.5 度角以上）を持つ、大口径（口径 50 m 級）高精度単一望遠鏡 LST/AtLAST<14>を建設する日欧の計画である。これによりアルマ望遠鏡・JWST・TMT をはじめとする大型天文観測施設が稼働する時代に、サブミリ波帯において、それらと相補的で新しいディスカバリー・スペースを切り拓く多次元（空間・宇宙論的奥行き・周波数・時間軸・偏波）掃天観測を推進する。

大口径（高感度）・広視野・広帯域のコンセプトの下、宇宙再電離期の銀河から、銀河団・大規模構造、ブラックホール形成、星・惑星系形成、太陽系内惑星大気まで、多様な階層における研究を格段に進展させるとともに、サブミリ波帯時間領域天文学を本格的に開拓することを目指している。「宇宙の構造形成史を観る」望遠鏡と言える。

【LiteBIRD】

インフレーション宇宙理論が予言する原始重力波を世界に先駆けて観測し、代表的インフレーション宇宙理論を検証することを目的とする計画である。原始重力波は宇宙マイクロ波背景放射の偏光度分布に渦状のパターン（原始 B モード）を刻印する。この原始 B モード発見のために、34-448GHz という広帯域の望遠鏡、極低温冷却系、多色高密度超伝導検出器を搭載した LiteBIRD 衛星<13>を開発し、全天サーベイ観測を行う。

インフレーション宇宙仮説は、ビッグバン以前の宇宙を記述する最有力仮説であり、この検証は、現代宇宙論の最大の課題である。インフレーション仮説が予言する原始重力波の痕跡を捉えることが、仮説の最も直接的な検証であり、発見に成功すれば科学史上最大の成果の1つとなる。同時に、LiteBIRD<13>が作成する全天ミリ波偏光マップは、天文・宇宙物理学、素粒子物理学に様々な新しい知見をもたらす。「宇宙開闢の瞬間を観る」衛星である。

【ATT10】

地球上で大気透過率が圧倒的に優れた南極内陸部新ドームふじ基地に、超広視野 10 m 級テラヘルツ望遠鏡を建設する計画である。

テラヘルツ帯には、銀河の赤方偏移、ダスト温度、星形成率などを推定するために重要なダスト熱放射が含まれ、その短波長側まで観測することでスペクトルエネルギー分布のピークを押さえることができる。また、星間物質の性質を探る上で重要な輝線が多数存在するため、宇宙史における銀河・巨大ブラックホールの形成・進化を探る上で極めて重要な波長帯である。本計画では、銀河の誕生・進化の解明と宇宙論パラメータの矛盾に迫る。観測周波数・観測手法・宇宙の構造形成史を目標とする点で LST/AtLAST<14>と共通点がある一方、「地球上最良の観測地点」に設置することで未開拓の領域であるテラヘルツ天文学を推進することを目標とする望遠鏡である。

相互関係

アルマ 2 は、2030 年代に感度・空間分解能・周波数分解能の点で世界トップレベルを維持し発展させるミリ波サブミリ波観測装置である。ngVLA<16>はアルマのミリ波帯（バンド 1-3）を圧倒的な感度・空間分解能で拡大する。また、ngVLA<16>と SKA1-MID<19>は、現在国内外に展開するセンチ波・ミリ波帯の超長基線干渉計（VLBI）の発展と位置付けられる。他方、アルマ望遠鏡が担うサブミリ波観測装置の機能を視野・周波数方向に拡張するのが LST/AtLAST<14>と ATT10<1>である。現在国立天文台が運用する野辺山 45m ミリ波望遠鏡・ASTE サブミリ波望遠鏡の後継計画として位置付けられる。SKA1-LOW<19>は、以上の計画がいずれもカバーしない長波長電波を開拓する。ミリ波サブミリ波偏光観測を行う LiteBIRD<13>は、地上 CMB 実験計画とともに、アルマや LST/AtLAST<14>、ATT10<1>との技術的交流の担い手となっている。

④ 当該分野以外の計画との関係

現代の天文学・宇宙物理学では、多波長観測および理論と観測の連携による研究の推進が当然のこととされている。また、その研究は、地球惑星科学はもちろんのこと、物理学・化学・工学、さらには生物学にも波及する極めて高いポテンシャルを有するものである。ここで5つのテーマについて、他の分野コミュニティとの関係を紹介する。

●宇宙論と構造形成史

宇宙開闢の瞬間を電波の観測で観るのが LiteBIRD<13>であり、これは素粒子物理学分野との関係が深く、高エネルギー物理学分野で推進される地上宇宙マイクロ波背景放射実験 GroundBIRD やサイモンズ観測所と相補的である。ビッグバンから宇宙再電離を経て現在に至る銀河団・銀河・活動銀河核の進化などの宇宙構造形成史の研究

は、宇宙物理学の活発なフロンティアであり、電波分野では SKA1<19>、ngVLA<16>、アルマ 2、LST/AtLAST<14>、ATT10<1>による銀河サーベイや輝線強度マッピング、LiteBIRD<13>による CMB 偏光観測がこれに取り組む。他分野では光・赤外線分野において TMT<21>、すばる 2、ルービン望遠鏡、ローマン宇宙望遠鏡、GREX-PLUS<5>など、また X 線分野では NewAthena がこの領域を主な対象としている。また、宇宙構造形成史に寄与しうるニュートリノも、電波観測を含む多波長観測と T2K 等の素粒子実験により、その質量や特性が明らかにできる可能性がある。以上のように、分野を横断する多波長観測や素粒子実験との相乗効果による、より精密な科学成果の創出が期待できる。

●生命の起源

私たち生命を育むに至った太陽系の化学史を探るには、元素合成史の理解だけでなく、分子進化史を理解し、その中に太陽系の化学環境を位置付けることが必要である。はやぶさ 2 に代表される太陽系始原物質探査など、考古学的に太陽系の過去を探る研究、すなわち地球惑星科学的アプローチが重要であるのは言うまでもなく、星や惑星が誕生する過程に沿ってガスや塵・塵に凍り付いた氷などの組成を探る星間化学的アプローチが必須となる。波長によって観える物質や透過度が異なるため、氷の観測や熱い領域での基本的分子・原子の観測には赤外線望遠鏡の JWST や TMT<21>、星間雲から星や惑星系が誕生する過程での分子進化を探るにはアルマ 2 望遠鏡のようなミリ波サブミリ波の高分解能高感度望遠鏡、岩石惑星誕生領域での大型分子の観測にはセンチ波帯の高分解能高感度望遠鏡 ngVLA<16>が必要となる。他方、極低温低密度下での化学反応プロセスの研究や精密な分光学など、最先端の原子分子物理学研究や分子科学研究といった天文学以外の分野との協働も極めて重要である。これは、フラーレンの発見などに代表されるように、新たな学問分野の開拓にも繋がる可能性を有するとともに、宇宙生物学研究の基盤にもなるであろう。

●太陽系の価値

私たちの宇宙の中での存在価値を知るには、生命の起源の探求と同時に、星・惑星系の誕生過程と多様性の全貌を理解する構造形成史の研究が必要不可欠である。これには、大きなスケールでの物質循環のダイナミクスや星形成の多様性の理解が重要で、銀河、星間雲、惑星と、極めて高いダイナミックスケールかつ電波から赤外線、可視光、紫外線まで様々な波長帯での観測研究が重要となる。アルマ 2、ngVLA<16>、TMT<21>などは前述の通り惑星系の誕生や進化を探るのに必須であるが、大口径ミリ波サブミリ波望遠鏡計画である LST/AtLAST<14>なども寄与するであろう。太陽系外惑星の多様性の解明、ハビタビリティの研究、バイオマーカー探査など、既に誕生した系外惑星の観測研究も相補的かつ重要である。それには、TMT<21>はもちろんのこと、HWO<7>や LAPHYTA<12>など赤外から紫外にわたる広い波長帯での観測研究が大きな役割を果たすと期待される。

●マルチメッセンジャー天文学

電磁波に加え、重力波や粒子線の検出も新たな手法として加わる「マルチメッセンジャー天文学」が本格化しつつある。例えば、重力波イベントや γ 線バーストが研究対象の代表例であり、これには高感度・高空間分解能を有する SKA1<19>と ngVLA<16>が大きく寄与する。また、電波と光赤外線を架橋する波長域にあるアルマ 2、LST/AtLAST<14>が、サブミリ波時間領域天文学を開拓する。他分野では、高エネルギー宇宙物理学、宇宙線物理学分野のほぼすべての計画、ならびに光赤外線天文学分野の広視野観測装置、例えば、すばる 2、ルービン望遠鏡、ローマン望遠鏡がこれに関与する。

●工学・技術開発

優れた観測システムを構築するための技術開発は、宇宙物理学の分野にとどまらず、社会への応用を目指す分野にも深い関連がある。例えば、高感度観測装置を構成する超伝導検出器や量子デバイスの研究は、量子コンピュータに応用する可能性が示されている。また観測装置が生み出す大量のデータを操作・伝送・処理する情報技術の開発や、天文画像データの処理技術が数理科学分野に寄与する例などもある。ミリ波・サブミリ波は、次世代通信技術に対応する帯域であり、電波天文学が駆動する先鋭的な技術開発は、技術そのものにとどまらず人的な資産として産業分野への波及性が期待できる。

(2) 光学・赤外線天文学分野の計画

① コミュニティでの議論の経緯

光学赤外線天文連絡会（光赤天連；GOPIRA）は、2040 年代までを見据えた科学指針と装置開発の方向性を示すため、2021 年に将来計画検討専門委員会を設置して、「光赤外線天文学ロードマップ 2025」の策定に着手した。本ロードマップは、GOPIRA 会員から寄せられた全研究計画を網羅的に整理し、限られた資源を効果的に活用するための戦略指針としてまとめられたものである。2023 年度から専門委員会が本格的に活動を開始し、科学的意義、成熟度、実現可能性、国際的独自性、人材育成への貢献などの評価基準を設定した。同年 12 月には 10 億円以上の大型計画、同未満の中小規模計画、装置を伴わないサイエンス計画の 3 区分で提案募集を行い、合計 20 件（大型 8 件、中小 5 件、サイエンス 7 件）の応募があった。

公平性確保のため、光赤外線に加え X 線、電波、重力波、惑星科学などの関連分野の専門家を含む 26 名の委員によってロードマップ作成委員会が構成され、大型計画については書面審査・ヒアリング・総合討議の三段階で評価が行われた。2024 年 9 月の委員会では、TMT<21>、GREX-PLUS<5>、HWO<7>を最優先候補とする方針が示され、光赤天連シンポジウムおよびタウンミーティングを通じてコミュニティから広く意見を募った。これらを踏まえ、2025 年の専門委員会では国際情勢・リスク・実現性を総合的に検討した結果、現時点の最優先計画として TMT<21>を基盤計画に据え、すばる補完として ULTIMATE-Subaru を着実に推進し、宇宙計画として JASMINE を基幹計画とする方針を決定した。2030 年代前半には GREX-PLUS<5>を最優先計画として強力に推進し、2040 年代には HWO<7>参加を長期的最優先計画とすることが示された。さらに PRIMA<18>、HiZ-GUNDAM<6>、LAPYUTA<12>など光赤外線を含む波長を横断する計画との協調を通じ、技術と人材の連続性を確保しつつ次世代計画へ継承する重要性も強調された。中小規模計画やサイエンス提案は、将来の科学基盤を支える構想として継続的に支援していくこととされた。

【8 件の大型計画】

- ・ 銀河進化・惑星系形成観測ミッション GREX-PLUS<5>（400 億円）
 - ・ NASA による系外惑星の詳細な観測をめざす Habitable Worlds Observatory (HWO)<7>への参加（200～400 億円）
 - ・ 初期宇宙探査用ガンマ線バースト観測衛星計画 HiZ-GUNDAM<6>（180 億円）
 - ・ 赤外線位置天文・精密測光観測衛星 JASMINE<10>（ISAS/JAXA 公募型小型計画の予算額）
 - ・ 紫外線宇宙望遠鏡計画 LAPYUTA<12>（177 億円）
 - ・ NASA による遠赤外線冷却望遠鏡 PRIMA<18>への参加（10 億円）
 - ・ 30m 光学赤外線地上望遠鏡計画 TMT<21>（420 億円+運用費 30 億円/年）
 - ・ すばる望遠鏡の次世代赤外線観測装置 ULTIMATE-Subaru（51 億円）
- （以上アルファベット順）

② 優先すべき計画【特に重点的に進める計画：TMT】

GOPIRA はロードマップ 2025 の策定にあたり、20 件の提案の中から大型計画を重点的に評価し、その中でも TMT (Thirty Meter Telescope) <21>を「現時点の最優先計画」と位置付けた。最優先に選ばれた理由は、第 1 に TMT<21>が日本の光赤外線天文学の基盤計画として決定的に重要であるためである。TMT<21>は口径 30m の国際協力による超大型光学赤外線望遠鏡で、赤外線で 0.01 秒角の超高解像度と約 30 等級の高感度を実現し、系外惑星、銀河進化、宇宙論など幅広い分野で革新的成果が期待される。第 2 に、TMT<21>はすばる望遠鏡との連携により世界最先端の観測能力を発揮でき、日本の研究基盤にとって不可欠である。第 3 に、技術・人材基盤の維持発展にも直結し、国内の光赤外線装置開発力を次世代へ継承できる点を重視した。さらに国際協力体制が既に整っており、実現可能性が他の大型計画より高いと評価した。

TMT<21>は 492 枚の分割鏡を用いた 30m 望遠鏡で、従来を凌駕する解像度と感度を誇る次世代基幹装置である。TMT を中心に、すばる望遠鏡の次期装置 ULTIMATE-Subaru、宇宙計画 JASMINE<10>といった地上・宇宙の基幹計画との連続性を確保し、2030 年代の GREX-PLUS<5>、2040 年代の HWO<7>へと技術・人材をつなぐ長期戦略とする。以上の理由から、TMT<21>は当面の最優先計画として最大限の支援を行うべきと判断した。

③ 当該分野の計画全体像と相互関係

提出された大型計画・中小規模計画・サイエンス提案は、地上・宇宙を含む多層的な観測体系を形成し、互いに補完的な関係を持つように構想されている。中心となるのは、現時点で最優先とした TMT<21>であり、30m 級の超大型地上望遠鏡として、系外惑星・銀河進化・宇宙論など広範な科学分野の基盤を担う。TMT<21>は既存のすばる望遠鏡と連携し、すばるが広視野観測で天体を発見し、TMT<21>がその詳細分光を行うという役割分担が成立する。この地上観測基盤を補強するのが ULTIMATE-Subaru であり、2030 年代のすばる 3 時代に高解像度観測を支える中核装置として TMT<21>を補完する。一方、宇宙計画においては JASMINE<10>を現在の基幹計画として位置付けた。JASMINE<10>は位置天文学と精密測光で地上観測を支える基礎データを提供し、TMT<21>の科学成果を拡張する役割を果たす。2030 年代には GREX-PLUS<5>を最優先計画として推進し、銀河進化・惑星形成の広帯域観測を実現し、TMT<21>の高分解能観測と相補的な視点から宇宙を捉える。さらに 2040 年代には HWO<7>参加を目標とし、GREX-PLUS<5>の後継となる最優先計画として位置付けた。

これら大型計画の間には明確な「技術と人材の連続性」が設計されており、TMT<21>で培われる大型望遠鏡技術や装置開発能力を GREX-PLUS<5>や HWO<7>へと段階的に継承する。また PRIMA<18>、HiZ-GUNDAM<6>、LAPYUTA<12>などの光赤外線を含む波長横断の衛星計画は、広い波長域での宇宙観測インフラを形成し、光赤外線計画との相補性を高める。中小規模計画やサイエンス提案を、これら大型プロジェクトの科学目標を

深化させる基礎研究群として位置付け、日本全体の光赤外線天文学の持続的発展を支える。

【銀河進化・惑星系形成観測ミッション GREX-PLUS】

銀河と惑星の起源の解明は天文学の究極目標である。その学術的価値に加え、国民の関心も極めて高い。我々は、標準構造形成理論の検証とハビタブル惑星形成過程の解明を目的とし、明るい「初代銀河」をビッグバンから3億年未満の宇宙で探査し、惑星形成現場の水蒸気と氷の境界線「スノーライン」を探査する。そのために、ジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡に比べて200倍広視野の近中間赤外線帯(2~8ミクロン)撮像機能と、10倍高い波長分解能の中間赤外線帯(10~18ミクロン)高分散分光機能を有した、口径1.0mの宇宙望遠鏡 GREX-PLUS<5>を開発する。赤外線検出器の冷却には、世界最高性能を誇る国産の宇宙用機械式冷凍機を活用する。打ち上げは2030年代中盤、観測運用は5年以上を目標とする。世界の既存および将来計画に無いユニークな観測機能により、銀河系ビルディングブロックの探査、初期宇宙の超新星探査、塵に覆われた活動銀河核の探査、星間有機分子生成過程の分光学、太陽系内氷小天体の探査、太陽系惑星大気の大気構造調査、太陽系外惑星大気組成の観測など、多種多様な銀河進化研究と惑星科学研究の扉が開かれる。また、取得したデータは、2030-2040年代あるいはそれ以上の長きにわたり、世界中の幅広い天文学コミュニティに活用されるレガシーとなる。宇宙望遠鏡開発、データセンター構築、科学研究を通じて、若手研究者・技術者の育成とジェンダーバランスやダイバーシティの改善にも取り組む。

【NASAによる系外惑星の詳細な観測をめざす Habitable Worlds Observatory (HWO)への参加】

本計画は、NASAの将来の旗艦計画である超大型宇宙望遠鏡 Habitable Worlds Observatory (HWO)<7>に、日本が装置開発、科学検討の貢献を持って参加し、その主要科学目標、1) 太陽型星周りの系外惑星の大気において、生命居住環境及び生命の痕跡の探査、2) 広範囲な一般宇宙物理学研究、を遂行する。HWO<7>は、口径6mの紫外線から近赤外線までをカバーする超大型宇宙望遠鏡である。これまでにない高空間分解能・高感度を生かして約25個の地球型惑星の大気を直接分光し成分を調べる。これにより、系外惑星で、初めて生命居住環境及び生命の痕跡を発見し、その頻度を見積もる。また、宇宙最初期の暗く小さな構造体まで検出可能で、さらに、紫外線分光能力により銀河内の物質循環を探査可能であり、宇宙創生以来の銀河の構造形成史を解き明かす。また、高空間分解能により太陽系天体を探査機で観測した様な画像が得られ、氷衛星での生命居住可能性の理解を深められる。本計画は、この究極のメガミッション HWO に日本独自の装置及び科学検討で貢献することで参加し、そのサイエンスの最大化を図るとともに、世界レベルの研究、技術開発を担う人材育成を行う。

【初期宇宙探査用ガンマ線バースト観測衛星計画 HiZ-GUNDAM】

宇宙最初の天体形成から現在の姿に至るまでの宇宙進化を理解することは、天文学における究極の目標のひとつと言える。特に初期宇宙における宇宙再電離や重元素合成の歴史的変遷を解明することは最重要テーマである。初期宇宙で最も明るい光源である GRB を背景光として利用することで、宇宙最初期の星形成や周辺環境の物理状態を観測的に理解することが、本計画の1つ目の目的である。また、重力波やニュートリノなどの新たな観測手段と連携することで、宇宙を包括的に理解する機運が高まっている。本計画の2つ目の目的は、マルチメッセンジャー天文学を強力に推進することである。マルチメッセンジャー天体からの電磁波放射を捉え、現象の多様性や一般性を理解することで、ブラックホール極限時空の誕生とその進化を解明することを目指す。これらの科学目標を達成するためには、X線による突発現象の発見から、光・近赤外線観測による高赤方偏移天体や重力波源・ニュートリノ源の高精度な位置同定を迅速に行う必要がある。本計画では史上最高の感度で GRB を発見するための広視野 X 線撮像検出器と、5色同時測光観測が可能な口径 30cm の近赤外線望遠鏡の2つのミッション機器を搭載する。GRB 発生から1時間以内に候補天体の特性を選別し、その情報を含めたアラートに基づいて、GRB 残光の明るいうちに(約1.5時間以内)大型望遠鏡で分光観測を実施する。

【赤外線位置天文・精密測光観測衛星 JASMINE】

JASMINE の Science goals は「我々が住む天の川銀河の形成と進化の探究とともに、生命居住可能領域に存在する地球に似た系外惑星の探究を行う」ことである。その実現のために Science objectives として、S01:【銀河系中心核構造の探究】恒星の距離と運動を測定することにより、銀河系形成の鍵を握る銀河系中心核構造を探究することと、S02:【地球型系外惑星の探査】将来の生命探査に有望な恒星に対し、生命居住可能領域に存在し、大気観測を行うことのできる可能性がある地球型惑星の候補を探査することを掲げることとした。その手段として、広視野・高安定な近赤外線宇宙望遠鏡を開発し、それによる撮像観測にて、銀河系中心核領域の位置天文観測と、中期 M 型星周りの系外惑星探査を行う。そしてアウトプットとして、「銀河系中心核領域の方向において観測した恒星の天球面上の位置変動の時系列データから導出される恒星の年周視差、固有運動といった物理情報の位置天文データカタログ」と「中期 M 型星の測光観測による時系列測光データ」を作成し公開する。その後、関連コミュニティと連携して解析研究を促進することで、Science goals & objectives の実現を図る。

【紫外線宇宙望遠鏡計画 LAPYUTA】

宇宙での生命生存可能環境と構造と物質の起源の理解を目指し、4課題の達成を目的とする。課題1は、木星の氷衛星の地下海環境と地球型惑星の大気進化に焦点を当てる。氷衛星の水噴出と大気の連続観測を初めて行い、地下海環境の理解につなげる。火星と金星では大気から宇宙へ輸送される水や温室効果ガスの全球観測から、大

気が散逸する条件を明らかにし、大気進化の理解につなげる。課題2では、系外惑星の外圏大気の広がりをつえ、太陽系の知見を拡張して惑星大気の特徴づけを行う。系外惑星大気に影響を与える恒星活動の解明を目指す。課題3は宇宙の構造形成史の中で残された問題の1つである、銀河の形成過程の理解である。銀河の構造にLy α ハローが普遍的に含まれているかどうかを調べ、その物理的起源が理論で予言されている星形成を引き起こす低温のガス降着か、それとも衛星銀河や銀河周辺のHIガスカを明らかにする。課題4では、物質進化における未解明課題である重元素合成の解明を目指す。中性子星合体による重元素合成の全体像を把握し、重元素の起源を理解する。超新星爆発からの最初のシグナルを観測し、大質量星進化の最終段階を理解することにつなげる。これらを実現する手段として、地球周回軌道の紫外線宇宙望遠鏡をJAXA宇宙科学研究所の公募型小型計画に提案し、2023年に6号機候補に選定されている。

【NASAによる遠赤外線冷却望遠鏡PRIMAへの参加】

PRIMA<18>は口径1.8mの冷却赤外線宇宙望遠鏡であり、2032年の打ち上げの実現により10年以上ぶりにスペースからの遠赤外線観測が可能となる。従来の赤外線望遠鏡よりも圧倒的に高い感度を活かし、惑星形成の初期状態の解明、銀河における多階層的進化プロセス、ダストと重元素の生成の解明を主な科学目標とする。PRIMA<18>は偏光観測も可能な撮像観測装置と分光観測装置を搭載し、それぞれ24-261 μ m(偏光は80-261 μ mのみ)と24-235 μ mの波長域を連続的にカバーしている。いずれの装置でも大視野サーベイを得意とし、無バイアスに多数の天体やスペクトル線を広い領域や波長帯で検出することで、統計的かつ多角的に天体の物理化学状態を調査できる。特に、遠方宇宙にある典型的な銀河を初めて遠赤外線分光観測し、赤方偏移2-3の宇宙最盛期から現在までの星形成、巨大ブラックホール、星間物質の性質と進化の解明を目指す。また、遠赤外線領域に多数含まれる水やHDのスペクトルを用いて星・惑星形成過程を明らかにする。PRIMAへの参画は、あかり衛星やSPICA等を通じてこれまで国内で培った赤外線天文学に関わる知見の蓄積を活かし、次世代へ受け継ぎながらも発展できる最大の機会である。日本のPIサイエンスへの参加は技術貢献を通じて行われ、JAXA美笹深宇宙探査用地上局によるデータ受信支援、熱シールドの提供、冷却光学系を含むペイロード試験・評価への貢献による貢献が現在検討されている。

【すばる望遠鏡の次世代赤外線観測装置ULTIMATE-Subaru】

ULTIMATE-Subaruプロジェクトは、すばる望遠鏡に地上大型望遠鏡として最大視野(直径20分角)かつ高解像度(Kバンド帯の標準的な大気条件でFWHM $\sim$ 0.2秒角)の補償光学システム(GLAO)と近赤外線撮像装置(WFI)を搭載し、すばるの近赤外線での広視野探査能力を大幅に向上する計画である。2022年度からスタートした「すばる2」計画では、2020年代後半以降のすばるの明夜を担う基幹装置として、文科省大規模学術フロンティア促進事業「大型光学赤外線望遠鏡による国際共同研究の推進」の支援を受

けている。すばる望遠鏡は、その最大の特長である可視光広視野カメラにより、稀な明るい遠方天体や、突発天体、巨大な銀河団・大規模構造の研究において世界をリードしてきた。今後、より初期の宇宙で銀河・銀河団の形成最初期を捉えるには、近赤外線での広視野・高感度な観測が必須である。ULTIMATE では多彩な狭帯域・中間帯域フィルター群を搭載し、宇宙望遠鏡とは相補的な近赤外広域撮像サーベイにより初期宇宙を見渡して、宇宙大規模構造と銀河の形成史を解明する。また遠方銀河分野に限らず、近赤外線の広視野・高解像度観測を必要とするあらゆる研究分野において強力なツールとなるものである。

④ 当該分野以外の計画との関係

ロードマップ 2025 では最優先に掲げる TMT<21>、GREX-PLUS<5>、HWO<7>のコア波長域である可視光・近赤外線以外の波長をカバーする HiZ-GUNDAM<6> (X 線+近赤外)、LAPYUTA<12> (紫外線)、PRIMA<18> (遠赤外線) を重要な関連計画として位置付けている。

HiZ-GUNDAM<6>は X 線 (0.5-10keV) による GRB 検出と 1-2 μ m の近赤外測定により、初期宇宙の高赤方偏移天体を迅速に発見し、TMT やすばる望遠鏡にターゲットを供給する役割を担う。これは光赤外線側からは決して得られない「宇宙初期への入口」を提供し、多波長での宇宙再電離史の解明に直結する。

LAPYUTA<12>は紫外線域を観測し、若い星形成領域・高温プラズマ・銀河ハローの物理状態を捉える。紫外線は光赤外線では検出困難な高励起ガスに敏感であり、TMT<21>や GREX-PLUS<5>が追う銀河進化・星形成研究を補完する。

PRIMA<18>は 24-261 μ m の遠赤外線をカバーし、H₂O・HD・PAH などの重要分子線を多数検出する。これは GREX-PLUS<5> (10-18 μ m) より長波長側を担当し、両者を合わせることで原始惑星系円盤における水とダストの赤外線領域で完全スペクトルを得られる。また、PRIMA<18>は銀河の重元素・ダスト進化を明らかにし、TMT の高分散分光と統合することで銀河進化の総合モデルを構築できる。

以上のように、HiZ-GUNDAM<6>・LAPYUTA<12>・PRIMA<18>は光赤外線を含む波長を横断した観測を実施することで、GOPIRA の中核計画 (TMT<21>、ULTIMATE-Subaru、JASMINE<10>、GREX-PLUS<5>) が追求する科学目標を強力に補完する。GOPIRA はこれらを光赤外線天文学の観測的研究成果を最大化するための必須パートナーと位置付け、多波長連携を通じて日本独自の総合的観測体制を形成する。

(3) 宇宙線分野の計画

① コミュニティでの議論の経緯

宇宙線研究者会議(CRC)では、長期計画の策定に向けて宇宙線研究に関わる将来計画について、CRC 実行委員会からの諮問を受けた CRC 将来計画検討小委員会が中心となり、定期的なタウンミーティング等で議論および検討を行ってきた。2025 年には、3 月 10 日、11 日にタウンミーティングを開催するとともに、6 月から 9 月にかけて計 7 回のオンラインセミナーシリーズを実施し、分野の俯瞰及び理論的な検討を進めてきた。これらの活動および 2025 年に行われた未来の学術振興構想の改訂提案を踏まえ、2025 年度内完成を目指して CRC ロードマップの改訂を進めている。さらに、2025 年の未来の学術振興構想の改訂に関連した天文学・宇宙物理学分野における将来計画の検討のために、2025 年 12 月 13 日にタウンミーティングをオンラインで開催した。一連の議論、2025 年 12 月 13 日のタウンミーティングおよび拡大 CRC 実行委員会の議論を踏まえ、以下の通り推薦を行う。

② 最優先する長期計画

CRC では、新規計画としてカムランド 2 および IceCube-Gen2<8>の 2 件、ならびに現行計画として KAGRA<11>、CTA<3>、Hyper-K の 3 件を、最優先すべき研究計画として推薦する。新規計画のうち、カムランド 2 は国際的な競争相手もアップグレードを予定しており、可及的速やかな計画実現が不可欠である。同様に IceCube-Gen2<8>も米国での予算獲得のプロセスが進行中であり、日本でもそれに合わせて予算を獲得する必要がある。以上を踏まえ、CRC ではカムランド 2 と IceCube-Gen2<8>を同率 1 位で推薦する。カムランド 2 は宇宙線分野と素粒子実験分野の横断的な計画であることから、天文学・宇宙物理学分科会のみならず、より広い範囲を対象とした部会での検討も期待する。

なお、現行計画の 3 件については既に計画が進行しており、今回の推薦順位の検討対象とはしなかった。しかしながら、現行計画のビジョンに基づいた今後の拡張や性能向上は宇宙線分野の進展に不可欠であり、引き続き最優先すべき基幹計画として推薦する。また、B-DECIGO<2>はコンパクト連星や中間質量ブラックホール連星からの重力波の観測を、XLZD<22>は暗黒物質の正体解明を、Mega ALPACA<15>は銀河系内の宇宙線加速天体とその加速限界を、GCOS<4>は最高エネルギー宇宙線の起源天体の解明を目的とする計画であり、これらを宇宙線分野における最重要課題の解明を目指す基幹計画として推薦する。

③ 当該分野の他の長期計画の紹介と相互関係

【CRC ロードマップ】 CRC では、長期計画の策定に向けて宇宙線研究に関わる将来計画のロードマップ改訂作業を進めている。CRC が取り扱う分野を物理的な観点からカテゴリーに大別し、2020 年代から 2040 年代までの物理的なマイルストーンをまとめている。また、個々の計画についても、その進展に応じたタイムラインを整理しつつ

ある。以下に、大別した分野ごとの計画概要を示す。

【宇宙線】 宇宙線直接測定では、国際宇宙ステーションでの CALET 実験が安定的にデータ取得を継続しているほかに、GAPS による反粒子高精度直接測定が計画されている。超高エネルギー宇宙線では Auger/TA での観測によって到来方向分布が一様ではないことを示す証拠が集まり始めている。地上実験では Auger/TA を中心とした国際共同実験 GCOS<4>が、宇宙からの観測では POEMMA が構想されており、起源天体同定を目指す。

【ガンマ線】 稼働を開始した CTA<3>は、20GeV から 100TeV にわたる高感度観測によって銀河系内外の宇宙線加速や暗黒物質探査で世界をリードし、TibetAS γ が開拓した sub-PeV 観測を ALPACA が南半球で実現する。新たなエネルギーフロンティアである MeV・PeV 領域でそれぞれ GRAMS・SMILE-3・AMEGO-X と Mega ALPACA<15>が提案されている。MeV 領域の観測は天体における原子核種組成の解明に新たな窓を開くものであり、気球観測による新技術の実証を進めつつ、将来的な人工衛星化を目指す。一方、PeV 領域では既存技術の大面積化により、銀河系内における粒子加速限界の解明を目指す。

【ニュートリノ・ダークマター】 ニュートリノ天文学を主導してきた IceCube 実験は後継実験 IceCube-Gen2<8>でマルチメッセンジャー天文学の重要な一角を担う。スーパーカミオカンデ(SK)にガドリニウムを添加した SK-Gd 実験は本格稼働段階に入り、超新星背景ニュートリノの初観測を目指している。2020 年代後半にはハイパーカミオカンデが稼働し、ニュートリノ実験、陽子崩壊実験を先導する。カムランドはカムランド 2 実験へと発展してニュートリノ観測・ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊の世界最高感度での探索を目指す。暗黒物質探索実験としては、XENONnT 実験による探索、その後二重ベータ崩壊、ニュートリノ観測をともなった観測を XLZD<22>で進める。さらに方向感度を有する NEWAGE/CYGNUS によって暗黒物質の正体解明を目指す。

【重力波】 最優先計画である KAGRA<11> (10-1000 Hz 帯) および B-DECIGO<2> (0.1-10 Hz 帯) に加え、超大質量ブラックホール連星合体などからの重力波を狙う宇宙望遠鏡 LISA (mHz 帯) が提案されている。LISA は ESA の Cosmic Vision Program に選定され、現在 Phase-B 期の開発を進めつつ、2035 年頃の打ち上げを目指している。日本チームは LISA との技術的な協力関係を通じて、B-DECIGO<2>での重力波観測を目指す。この他、米国、欧州それぞれで第 3 世代超大型地上望遠鏡計画も提案されており、日本からの寄与が期待されている。

④ 他の分野コミュニティの推薦計画との関係

ここで提案されている計画は、狭義の宇宙線分野にとどまるものではなく、ほぼすべての計画が分野横断的・学際的なものになっていると言える。加速器を用いた素粒子実験として CERN 研究所で行われる FASER 実験では、宇宙線の生成について重要な情報となるニュートリノを使ったハドロン相互作用測定を行う。非加速器による素粒子実験を兼ねているものとして、カムランド 2、ハイパーカミオカンデ、XLZD<22>が挙げられ、ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊、陽子崩壊、ニュートリノ振動、暗黒物

質、アクシオン探査など幅広い研究テーマと関わっている。ガンマ線観測を担う CTA<3> や Mega ALPACA<15>、超高エネルギー宇宙線を観測する POEMMA は、全天から暗黒物質崩壊起源のシグナルを探索することが期待され、さらにローレンツ不変性の破れに対する知見も得られる。本格的なマルチメッセンジャー天文学の時代に突入した今、ガンマ線 (CTA<3>、Mega ALPACA<15>)、ニュートリノ (ハイパーカミオカンデ、カムランド 2、IceCube-Gen2<8>、XLZD<22>)、重力波 (KAGRA<11>、B-DECIGO<2>) による観測は、電波・可視光・X 線観測と連携し、今後の天文学を強力に牽引することが期待される。GCOS<4>や POEMMA は最高エネルギー宇宙線の到来頻度や組成の異方性を検出し、電磁波源カタログとの相関解析によりその線源の特定を狙う。こうした多角的な視点を持った研究は、高エネルギー天体现象に限らず、宇宙の星形成史、太陽物理などの研究にも大きなインパクトを与えるポテンシャルを有している。

(4) 高エネルギー天文学分野の計画

① コミュニティでの議論の経緯

高エネルギー宇宙物理連絡会（以下、高宇連とする）では将来計画検討委員会を 2013 年から常設とし、2-3 年間隔で「日本が関与する飛翔体を用いた高エネルギー天体物理学のロードマップ検討まとめ」を発行し、高宇連が関与するミッションについてロードマップを制定している。ミッションごとに目的や科学目標が違うので、それらを「コミュニティの総力を挙げて、参加・実現すべき計画」と、「高宇連と他の分野が連携し、サイエンスを絞り込んで目的を特化した計画」にカテゴリー分けしてきた。マスタープラン 2023 のときより、第 25 期分科会から各コミュニティに対して、関連大型ミッションを優先順位付けて推薦することが求められた。これを受けて高宇連では「高宇連マスタープラン 2023 タスクフォース（以下、TF という）」を 2021 年 4 月に立ち上げ、コミュニティの意見を取りまとめ、高エネルギー天文分野の最優先する長期計画として、同率 1 位 Athena と FORCE、3 位で HiZ-GUNDAM<6>を推薦する。PhoENiX<17>は大型研究計画として推薦した。

今回、「未来の学術振興構想（2023 年版）」[5]の改訂に向けて、分科会独自に天文学・宇宙物理学を俯瞰した観点で分野全体の発展に資する将来計画をまとめるにあたり、高宇連としてのアップデートを議論した。2023 年以降、高宇連関係では大きな変化が起き、ロードマップは過渡期にある。

「コミュニティの総力を挙げて、参加・実現すべき計画」では、まず XRISM 衛星が 2023 年に打ち上げられ、優れた科学成果が多数得られている。低エネルギー側の性能が当初予定に達しないものの衛星は順調に観測を続けており、公募観測も A02 が進行中で、2025 年 12 月に A03 が発出されるなど順調に観測を継続している。一方で将来計画については大規模な再編の中にある。宇宙科学研究所での議論の中で、広帯域 X 線サーベイを特徴とする FORCE ワーキンググループ(WG)が 2023 年に解散し、発展形の JEDI/Chronos が検討された。さらに大幅な再検討が必要となり WG が 2025 年 3 月に解散し、現在リサーチグループ(RG)として次世代のミッション検討を進めている。XRISM の系譜に繋がる X 線精密分光サイエンスでも、ESA を中心とする国際ミッション Athena がコスト超過に伴い大きな変更がなされ、2023 年 11 月に NewAthena として 2037 年打ち上げを目指して再出発している。この中で日本の大規模なハードウェア貢献は一旦除外されたことから今回の大型計画としては提出していない。これらの 2 つのサイエンスの重要性は変わらず、高宇連内では米国 MIDEX への参加も含めた再立ち上げの議論がなされている。ただし米国 2026 年度予算の混乱をうけて 2025 年 12 月段階ではまだ米国側スケジュールすら未確定なため、具体的な計画案を提示できない。今後急ピッチに検討を進めることとなる。

「高宇連と他の分野が連携し、サイエンスを絞り込んで目的を特化した計画」では、

HiZ-GUNDAM 計画<6>と PhoENiX 計画<17>が健在であり（詳しくは後述）、前者の方が計画がやや進んでいる状況にある。

② 優先すべき計画

学術振興構想の改訂版に向けては、「コミュニティの総力を挙げて、参加・実現すべき計画」からは検討中であることから、「高宇連と他の分野が連携し、サイエンスを絞り込んで目的を特化した計画」として、高エネルギー天文分野の最優先する長期計画として、第1位 HiZ-GUNDAM<6>、第2位 PhoENiX<17>を推薦する。

【HiZ-GUNDAM】

ガンマ線バースト（GRB）に代表される突発天体现象を観測することで、初期宇宙と極限時空の探査を革新的に開拓することを目的とした JAXA の公募型小型衛星計画である。現在、ダウンセクションに向けた活動が進められている。光学・赤外線天文学分野との連携プロジェクトである。

【PhoENiX】

磁気リコネクションに伴う粒子加速の理解を科学目的とした、JAXA の公募型小型衛星計画である。磁気リコネクションが引き起こす太陽フレアを主たる観測対象とし、粒子加速場所の特定、加速の時間発展の調査、加速の特徴の把握を目指す。太陽物理学分野との連携プロジェクトである。

HiZ-GUNDAM<6>と PhoENiX <17>は、それぞれ高宇連と他の分野が連携し、サイエンスを絞り込んで目的を特化した計画で、同じ土俵で比較することは困難である。両者の順位については、HiZ-GUNDAM<6>の方が公募型小型衛星の選定段階として先行していること、高宇連の関与がより大きいことから、上位で推すこととした。

③ 当該分野の計画全体像と相互関係

今回、学術振興構想へ向けて推薦する2計画は、いずれも「目的特化型」のものであるが、高宇連として「コミュニティの総力を挙げて、参加・実現すべき計画」の検討もしている。日本は「X線スペクトルから得るサイエンス」をその主軸としてきた。これを受けて現在、(1) XRISM が体現している精密 X 線分光のサイエンスと、(2)「ひとみ」から XRISM に至る経緯で実現しなかった広帯域 X 線観測のサイエンスという、2つの柱で検討を進めている。

(1)の精密 X 線分光については、XRISM のサイエンスの最大化を進めるとともに、将来計画として海外協力も含めて議論を進めている。ESA 主導の NewAthena の検討に継続して参加するのと合わせて、NASA の次期 MIDEX 公募へ提案を予定している EXCEED の検討に参画しつつ、国内でのミッション検討も進めている。

(2)の広帯域 X 線観測については、近未来では NASA の SMEX 計画である MeV 全天観測衛星 COSI が 2027 年打ち上げ予定で、日本からも複数のメンバーが開発に参画してい

る。また、硬 X 線望遠鏡を軸とするミッションである MIDEX 提案予定の HEROIX や、ESA M8 候補の PHEMTO（現在 Phase 2 進出）にも参画し、国内でのミッション検討も進めている。

「目的特化型」の 2 つのミッションも、この流れに大きく関係する。HiZ-GUNDAM<6> は GRB 観測の点で COSI とともに次世代の広視野の広帯域観測を担うものである。突発天体サイエンスには X 線での追観測も重要である。HiZ-GUNDAM<6>を含むマルチメッセンジャー天文台のアラートを受けた XRISM や将来衛星の連携の検討も進めている。PhoENiX<17>もまた磁気リコネクションの物理や、恒星フレアのサイエンスと密接に関わり、精密分光および広帯域観測の双方と深く関わるミッションである。

④ 当該分野以外の計画との関係

XRISM 衛星の観測成果は、ブラックホールからの大規模な高速風、超新星爆発の異方性の確認とその速度の決定、マイナーな重元素の観測、銀河団プラズマの乱流の小ささや AGN との相互作用の定量化など、天文学全体に関わる成果を出している。これは JWST、すばる、GREX-PLUS<5>などの可視・赤外、ALMA や LST<14>などの THz 天文台、SKA<19>やそのプリカーサ、ngVLA<16>などの GHz 電波に加え、国内可視光望遠鏡と組み合わせた長期変動追跡観測でしか得られないサイエンスも多く、他波長とシナジーが高い。広帯域観測でもダストやガスに覆われた天体やその物理解釈では、上記の可視・赤外、THz 電波や GHz 電波観測と協働が必須であり、磁場増幅や粒子加速と宇宙線生成に至るサイエンスでは GHz 電波や Fermi GeV 衛星、CTA<3>や ALPACA、LHAASO などの TeV 観測、IceCube-Gen2<8> などの高エネルギーニュートリノ観測との連携が欠かせない。ハビタブル惑星研究でも恒星フレアによる大気消失が鍵の 1 つであり、X 線観測の貢献が欠かせない。また、SK との連携による重力崩壊型超新星爆発の早期追跡観測もその物理解明の鍵を握り、VeraRubin など可視光で発見される超新星爆発の中のあるグループは X 線残光に多くのサイエンスがあり、X 線追観測のサイエンスは XRISM から始めて次世代衛星へと繋いでゆく。

HiZ-GUNDAM<6>は突発天体を発見するミッションであり、他波長へのトリガーを供給し、LIGO2 や KAGRA<11>などの重力波天文台や SK/HK などあらゆる時間領域天文学及びマルチメッセンジャー天文学へ貢献できる。また、PhoENiX<17>は、恒星フレアのサイエンスに加え、磁気流体内の粒子加速の理解を通じて、宇宙天気予報を含む広い分野に貢献する。

シナジーはサイエンスだけではなく技術の面でも重要である。XRISM で培った衛星の冷却技術は、LiteBIRD<13>や GREX-PLUS<5>へと引き継がれるキー技術であり、衛星搭載の伸展式光学ベンチも世界的に実証した数少ない例である。硬 X 線観測を狙った多層半導体検出器は軌道上の高エネルギー宇宙線観測でも使われ、国産の CdTe 半導体イ

メージャは地上のミューオン科学や原子核物理の計測で重要な役割を果たしつつある。ガスイメージャの技術も偏光観測から MeV 観測、地上の放射線計測でも用いられ、ガンマ線計測のためのシンチレータ技術は、中性子科学と繋がり、月面の水探査にも応用されようとしている。このように高宇連のミッション開発に端を発する多様な衛星搭載検出器技術は、高エネルギー光子・粒子計測の計測能力が高く、広い応用範囲を持つことが特徴である。

⑤ その他将来計画の推進に関して特筆すべき点

「コミュニティの総力を挙げて、参加・実現すべき計画」の検討において、Athena の再検討、宇宙研での FORCE/JEDI 計画の再検討、そして NASA の宇宙科学計画のスケジュール遅れなどがあり、高宇連の分野はいま大きな変革の時代にある。現時点で具体的な提案が少ない状況となっているが、精力的な検討は続けており、3年後にはより具体的な将来ミッションのビジョンを検討できる予定である。

(5) 太陽物理学分野の計画

① コミュニティでの議論の経緯

これまで日本の太陽物理学コミュニティでは、太陽研連シンポジウムなどを通じて我が国が重点的に狙うサイエンス課題、及びそのための将来観測計画を慎重に議論してきた。その結果、以下のような結論を得た。

日本の太陽物理学コミュニティが今後 10 年間、すなわち 2020 年代後半から 2030 年代前半に重点的に狙うサイエンス課題は、(1) 彩層・コロナと太陽風の形成機構の究明(彩層・コロナダイナミックス)、(2) 太陽活動現象の発現機構の究明とその変動を予測するための知見の獲得(宇宙天気・宇宙気候基礎物理)である。これは、世界の動向と、課題の喫緊性、技術的成熟度などを踏まえて、コミュニティ内での議論を繰り返してコンセンサスを得た目標である。このようなサイエンス課題の解決のために取る戦略としては、(i) 最優先事項として SOLAR-C ミッション<20>を実現、(ii) このミッションを支えるために、太陽・太陽圏研究領域における国内外機関との共同研究、特に 4 m 級大型地上太陽望遠鏡(ダニエル K. イノウエ望遠鏡; DKIST など)を用いた共同観測を推進、(iii) 観測を支え、かつ新課題を切り開く理論シミュレーション研究を推進し、天体高エネルギー物理学・地球惑星科学など関連分野との交流をしつつ、恒星物理学との連携により他星系の宇宙天気・宇宙気候の理解に貢献する、を取る。

SOLAR-C ミッション<20>実現後の 2030 年代後半から 2040 年代に実現すべき次世代プロジェクトに関する科学計画立案・要素技術開発・実証観測実験も行われており、太陽研連シンポジウム等にて次世代の大型計画について議論が開始されている。

② 優先すべき計画

【SOLAR-C】

宇宙にいかに高温プラズマが作られ、太陽がいかにして地球や惑星に影響を及ぼしているのかという命題を探究するため、SOLAR-C 計画<20>は、太陽表面から太陽コロナ・惑星間空間までのエネルギーと質量の輸送を理解し、宇宙プラズマ中で普遍的に起きている基礎物理過程を検証する。太陽の磁気活動は、基本となる微細な構造間で受け渡される磁気エネルギーを源泉とし、彩層やコロナという高温の大気を形成し、太陽面の大規模爆発現象から惑星間空間を乱す擾乱を生み出すと考えられている。これらの成因を理解するため、基本となる磁気構造を広範な温度領域で追跡し、それらの運動や相互作用を通して、磁気エネルギーの輸送過程や散逸過程を定量化することを目的としている。観測装置として極端紫外線域の高分散撮像分光器を用い、太陽を長時間観測できる太陽同期極軌道から、太陽大気の彩層から太陽コロナに到る温度領域を隙間なく観測する。太陽大気全体にわたり、プラズマのダイナミックな現象に追従するため、観測装置は以前に飛翔したものに較べておよそ 1 桁以上の性能(空間・時間分解能、波長範囲)向上を見込む。

本計画の使命は、太陽物理学の最も基本的な問題、磁場とプラズマの相互作用が、どのようにして太陽活動を引き起こすかという問いに、最終的な答えを出すことにある。

相互作用の最も重要な帰結として、太陽外層大気の加熱と、太陽フレア及びコロナ質量放出(CME)といった爆発的エネルギー解放が挙げられる。したがって、本計画の科学目的は (i) 太陽大気・太陽風を形成する基礎物理過程、(ii) 太陽大気の不安定化と太陽フレア・プラズマ噴出を引き起こすエネルギー解放過程を解明することにある。これには、彩層からコロナにわたる太陽大気的全温度層を同時に切れ目なく観測し、かつ太陽大気の基本構造とその変化を高空間・時間分解能で追跡し、同時に太陽大気で起きている基礎物理過程の分光情報を獲得する必要がある。そのため、以上三つのことを同時に実施する極端紫外線撮像分光望遠鏡 (EUVST) を JAXA 公募型小型衛星 SOLAR-C<20>に搭載する。

EUVST は、(A) 17-128nm の波長域を、(B) 空間分解能 0.4 秒角、時間分解能 0.5 秒(最短) でデータ取得し、(C) 2km/s の視線速度変化を検出することができる高性能分光観測を行う。17-128nm の波長域は、彩層から遷移層・コロナ、そしてフレアで生成される超高温プラズマまで広い温度帯(1 万度から 2000 万度)を隙間なく分光観測できる輝線が存在する波長域である。コロナ観測における空間分解能 0.4 秒角は、今まで実現された分光観測に比べ約 7 倍(分解される面積では約 50 倍)高く、太陽観測衛星「ひので」が太陽表面(光球・彩層)の観測で実現した空間分解能とほぼ同じである。この空間分解能により、表面上空に広がる外層大気に存在する基本的な磁気構造を初めて識別できる。高い時間分解能は、従来の観測に比べ EUVST が 10-30 倍高い有効面積を持つことで実現される。以上、従来の観測では実現できていない高い性能で、様々な輝線のスペクトルを高分散分光計測して、太陽プラズマの視線速度や温度・密度などの物理診断を行う。

本 SOLAR-C 計画<20>は、2024 年 3 月に JAXA においてプロジェクトチームが立ち上げられ、2028 年度の衛星打ち上げに向けて開発が進んでいる。衛星開発が進む一方、打ち上げ後の観測計画やデータ解析など科学運用を具体的に議論していく必要があり、コミュニティとしてこれらの活動を支援していく。

③ 当該分野の計画全体像と相互関係

太陽観測衛星「ひので」は、太陽大気が無数の小さな磁気構造の集合体であり、それらが極めてダイナミックに変化していることを明らかにした。しかし、その中にはまだ解像されないより小スケールの構造が存在することもわかった。ESA が NASA と共同で運用している Solar Orbiter が水星の軌道半径の内側から、これまで観測できなかった微細なジェット現象がコロナで頻発していることを示し、小スケールの構造が高温で活動的な太陽外層大気の発現に重要である可能性をさらに示した。しかし、太陽外層大気形成の本質的な部分はまだ謎に満ちている。この解明に不可欠な観測は、光球からコロナの構造を空間・時間分解した精密な物理計測である。SOLAR-C 衛星<20>は、遷移層～コロナの広い温度域にて高解像度分光撮像観測を行うことで、プラズマ温度・密度・速度・組成など物理量の微細構造を明らかにすることで謎に挑む一方、NASA では 4 つの EUV 輝線の多スリット観測を行うことで、観測可能な温度域は狭いが広視野

かつ高時間ケーデンスの分光撮像観測データを得る Multi-slit Solar Explorer (MUSE) 衛星計画が進んでいる。MUSE は企画段階から SOLAR-C<20>との共同観測が考えられており、これらの衛星と光球・彩層の微細構造を分解できる DKIST が共同観測することで、太陽外層大気形成について大きな成果が得られる。この共同観測では、惑星間空間に繋がる太陽風の起源の理解も期待されており、太陽半径の約 9 倍の距離まで接近している Parker Solar Orbiter や Solar Orbiter による太陽風のその場観測や、日本の次世代太陽風観測装置で探る太陽風の大規模構造のデータとも合わせることで、内部太陽圏と太陽のつながりも理解できる。

前述の共同観測は、SOLAR-C 計画<20>のもう 1 つの科学目標である、太陽大気の不安定化と太陽フレア・プラズマ噴出を引き起こすエネルギー解放過程の解明にも大きな寄与が期待できる。一方、太陽フレア・プラズマ噴出による地球近傍への影響の理解、言い換えれば宇宙天気の見点では、太陽全面をカバーする広視野連続観測や高エネルギー粒子を観測できる電波・X 線観測が必須である。米国では、広視野連続太陽観測を実現する ngGONG 計画と太陽電波干渉計観測の Frequency Agile Solar Radiotelescope (FASR) 計画が、いずれも Solar & Space Science の Decadal Survey (2024-2033) にて最優先計画に選出された。また X 線観測では PhoENiX 計画<17>が検討されており、その実証観測実験の実施が想定され、エネルギー解放過程における粒子加速の理解も深化する。日本の太陽物理コミュニティとしては、これらの観測計画の開発や観測に関わることで有機的な連携を行い、科学的な成果だけでなく宇宙天気研究を通じた社会貢献も SOLAR-C 計画<20>により行う。

④ 当該分野以外の計画との関係

SOLAR-C 計画<20>には太陽物理学の科学的優先度を反映した 2 つの側面がある。1 つ目は、太陽で起きている多くの物理現象を、宇宙で起きている物理現象に敷衍することができることである。太陽大気を構成する微細磁場構造を起因とする多様な太陽活動現象は、宇宙に普遍的に見られる磁気プラズマのダイナミックスのいわば雛形である。本計画では、天体プラズマで起きている物理現象を理解するために重要である基礎物理過程の洞察や知見が得られ、天体物理学の幅広い分野へ応用することができる。2 つ目は、太陽の磁場構造やそこで起きる大規模な活動が、太陽系空間や地球磁気圏を介して地球周辺の宇宙空間環境(宇宙天気)を支配している点である。先進的な人工衛星や測位技術(GPS)など宇宙に基盤をおく先進的な技術への依存度が増え続けている現在、この宇宙空間環境の変動が直接、我々の日常生活にも結び付いている。本計画は、地球環境、社会環境に直接影響を及ぼし得る、太陽からの大規模噴出や太陽風の起源と動力学に関する知見を大きく発展させるものである。太陽面における大規模な爆発現象やそれに伴う噴出物などが地球に到達した場合、地球周辺の宇宙環境を乱すことになるため、これらの突発現象の発生を物理的により確度をもって予測できるようになると、社会インフラへ与える影響についても軽減することができ、次世代太陽風観測計画を包含した地球惑星科学分野の推薦計画である太陽地球系結合過程の研究

基盤形成計画との連携が期待される。さらに、宇宙プラズマの基礎物理及び太陽の地球環境への影響の理解は、35 億年前に地球に生命が誕生した際の太陽地球環境の理解に発展させることができる。本計画はどのようにして地球に生命が誕生したかの理解にも繋がる。また、本衛星計画における開発によって獲得される解像度の高い宇宙望遠鏡の技術や、衛星を指向方向に高精度に安定化する技術などについては、科学衛星のみならず、我が国の地球観測衛星の解像度向上、官需実用衛星等の高度化にも貢献することが見込まれる。

<参考文献>

URL はすべて 2026 年 8 月 11 日閲覧

- [1] <https://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/13/15-49.pdf>
- [2] 日本学術会議記録 SCJ 第 21 期-220319-21510500-020
<https://www.scj.go.jp/ja/member/iinkai/kiroku/3-0319.pdf>
- [3] 日本学術会議記録 SCJ 第 22 期-260912-22610500-050
<https://www.scj.go.jp/ja/member/iinkai/kiroku/3-140912.pdf>
- [4] <https://www.scj.go.jp/ja/member/iinkai/kiroku/3-20230801.pdf>
- [5] 提言「未来の学術振興構想（2023年版）」
<https://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-25-t353-3.pdf>
- [6] Astronomy and Astrophysics Decadal Survey: 全米科学アカデミーが中心
となって、ほぼ 10 年ごとに取りまとめる天文学・宇宙物理学分野の大型長
期計画の推薦書
- [7] 暦要項、歴計算室 WEB ページ (<https://eco.mtk.nao.ac.jp/koyomi/yoko/>)
- [8] 毛利、2021、天文月報、114、563
https://www.asj.or.jp/jp/activities/geppou/item/114-9_563.pdf
- [9] 馬場、浅井、石川、佐藤、信川、野村、古澤、町田、2021、天文月報、114、
688
https://www.asj.or.jp/jp/activities/geppou/item/114-11_688.pdf
- [10] 奥村、生田、2021、天文月報、114、289
https://www.asj.or.jp/jp/activities/geppou/item/114-4_289.pdf
- [11] 学術研究の大型プロジェクトの推進に関する基本構想 ロードマップの策定 ロード
マップ2020ー
https://www.mext.go.jp/content/20200930-mxt_gakkikan1388523_1.pdf
大型研究計画に関する評価について（報告）「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」について
https://www.mext.go.jp/content/20220728-mxt_gakkikan-000025951_1.pdf
- [12] <https://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-25-t353-3-178.pdf>
- [13] マイナビ進学総合研究所、2025 年度進学トレンド総括
https://souken.shingaku.mynavi.jp/wp-content/uploads/2025/06/2025_trend_1.2.pdf
- [14] 経済産業省「2040 年の職業構造推計」
https://www.mext.go.jp/content/20260324-mext-kanseisk01-000048526_17.pdf
- [15] 文部科学省「研究開発マネジメント人材の育成に関する現状・課題・今後
の具体的な取組（案）」
https://www.mext.go.jp/content/20250616-mxt_kiban03-000043090-10.pdf
- [16] Rodrigues, L. (2025), The role of science communication in building trust in

- scientific expertise, *Science Communication and Trust* (pp. 45-68), Springer
- [17] Archer, L., DeWitt, J., Osborne, J., Dillon, J., Willis, B., & Wong, B. (2013). Not girly, not sexy, not glamorous: Primary school girls' and parents' constructions of science careers. *Gender and Education*, 25(1), 5-26

<用語集>

以下の用語については本文中最初に記載された際に[※]を付記した。

Auger (Pierre Auger Project): アルゼンチンの草原地帯に国際協力で建設された超高エネルギー宇宙線観測装置群

Bモード偏光: 原始重力波が宇宙マイクロ波背景放射の偏光度分布に刻印する渦状のパターン (原始 B モード)

CLASP: 真空紫外線の偏光分光観測により、彩層磁場測定を行う国際太陽観測ロケット実験

DES (Dark Energy Survey): セロトロロ天文台の 4 m 望遠鏡を用いた可視光広域撮像サーベイ

DESI (Dark Energy Spectroscopic Instrument): キットピーク天文台の 4 m 望遠鏡を用いた可視光広域分光サーベイ

DECIGO 計画: 宇宙空間に配置したレーザー干渉計で重力波を観測し、宇宙誕生や暗黒エネルギーの謎に迫る計画

DIB (Diffuse Interstellar Bands): 広く天体のスペクトルに見られる星間物質による吸収バンド。紫外線、可視光、赤外線の波長帯で約 500 のバンドが確認されている

ESA (European Space Agency): 欧州宇宙機関

ESFRI (European Strategy Forum on Research Infrastructures): 欧州各国の研究担当高官によって組織されるフォーラム。10 年から 20 年のスケールで欧州の国際研究基盤 (新規および大規模なアップグレード) のロードマップを策定し、これらの施設の実現を促進している

GONG (Global Oscillation Network Group): 世界各地の同種の望遠鏡 6 台からなるネットワークで、連続的に太陽振動の観測を行う

G 型星 (G-type Star): 表面温度が 5300–6000 K 程度で、太陽とほぼ同じ質量を持つ恒星

Hi-C ロケット実験: 極端紫外線での超高空間分解能 (0.1 秒角) 撮像観測を行う、米国の太陽観測ロケット実験

Hyper-K (ハイパーカミオカンデ): 岐阜県飛騨市神岡町に建設中の世界最大級のニュートリノ観測施設。宇宙や物質の謎の解明を目指す

IceCube 実験: 南極の氷の中に設置された高エネルギー宇宙ニュートリノ望遠鏡。2006 年から一部の運転を開始し、2010 年に完成。1 km³ の検出体積を持つ。2013 年に太陽系外からの初めての高エネルギーニュートリノ事象の検出を報告した

IRAM 30m 望遠鏡 (Institut de Radioastronomie Millimétrique): IRAM (フランス、ドイツ、スペイン国際ミリ波電波天文学研究所) が運用する口径 30m のミリ波望遠鏡。スペインのピコベレタにある

IRIS (Interface Region Imaging Spectrograph) ミッション: NASA が 2013 年に打ち上げた太陽観測衛星。太陽光球とコロナの間にある彩層および遷移層を紫外線で観測する

IRIS (Infrared Imaging Spectrograph): TMT に搭載予定の近赤外線撮像分光器

Λ CDM モデル (Lambda Cold Dark Matter Model): ダークエネルギーと冷たいダークマターを含む加速膨張する宇宙モデル。現時点で、さまざまな観測事実と最も整合性が良い

LIGO (Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory): 米国のレーザー干渉型重力波検出器。ルイジアナ州のリビングストンとワシントン州のハンフォードの 2 箇所 (距離約 3000 km) に設置されている

MODHIS (Multi-Objective Diffraction-limited High-Resolution Infrared Spectrograph): TMT に搭載予定の近赤外線高分散分光器

M 型星 (M-type Star): 表面温度が 2600–3800 K 程度の低温で、質量が太陽の 0.1–0.6 倍程度の恒星

NOEMA (NOrthern Extended Millimeter Array): ミリ波電波天文学研究所 (IRAM) が運用している開口合成型のミリ波干渉計

Pan-STARRS (Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System): ハワイのハレアカラ天文台に口径 1.8 m の望遠鏡を 4 台設置し、全天をサーベイ観測して移動天体や突発天体を検出する計画

Parker Solar Probe: NASA が 2018 年に打ち上げた太陽観測衛星。外部コロナの直接観測を行う予定

PeVatron: 陽子や原子核を PeV (10^{15} eV) を超えるエネルギーまで加速する天体の呼称。粒子エネルギーの単位「PeV」と加速器の名称の接尾辞「-tron」からつくられた造語

POLARBEAR 実験: 南米アタカマで実施中の宇宙マイクロ波背景放射 B モード偏光観測実験

r-process (r 過程): 速い (rapid) 中性子捕獲とそれに続くベータ崩壊により、鉄属より重い中性子過剰元素を形成する過程

S8: 宇宙の密度ゆらぎの大きさ (σ_8) と、宇宙の全エネルギーに占める物質エネルギーの割合 (Ω_m) から求められるパラメータ。宇宙モデルを制限する主要なパラメータの 1 つ

SCIP: SUNRISE-3 国際気球太陽観測実験にて、日本が提供した近赤外線偏光分光装置

SDO 衛星 (Solar Dynamics Observatory): NASA が 2010 年に打ち上げた太陽観測衛星

Simons Observatory: POLARBEAR の後継となる宇宙マイクロ波背景放射 B モード偏光観測実験

SOHO 衛星 (Solar and Heliospheric Observatory): ESA が 1995 年に打ち上げた太陽観測衛星

Solar Orbiter: ESA が 2020 年に打ち上げた太陽観測衛星。太陽の極地方を観測する

TA (Telescope Array): アメリカ合衆国ユタ州にある超高エネルギー宇宙線検出装置群

Virgo: 欧州 6 カ国共同によるレーザー干渉型重力波検出器。イタリアのピサにある

VLA (Very Large Array): アメリカ国立電波天文台 (NRAO) が運用している大型開口合成電波干渉計

WIMP (Weakly Interacting Massive Particle): 暗黒物質の有力候補とされる、質量を持ち、通常の物質との相互作用が弱い未知の素粒子

XRISM 衛星 (X-Ray Imaging and Spectroscopy Mission): 2023 年に JAXA が打ち上げた X 線天文衛星。「ひとみ」の代替機

Yebes 40m望遠鏡:スペイン国立地理研究所が運用している口径 40mの電波望遠鏡。スペインのイエベスにある

アインシュタイン望遠鏡 (ET):欧州で計画されている第三世代のレーザー干渉計重力波検出器で、地下に設置したり低温鏡を採用したりするなど KAGRA で初めて採用した新技術を採用した計画となっている

アリエル衛星 (Ariel):欧州宇宙機関 (ESA) が 2031 年に打ち上げを予定している系外惑星観測専用の赤外線宇宙望遠鏡。約 1000 個の系外惑星大気を赤外線分光法により網羅的に調査し、惑星の多様性とその形成史・進化史の解明を目指している。日本も主要パートナー国として光学素子開発や科学研究を通して計画推進に参画している

アルマ 2 (ALMA2):日米欧共同で南米チリのアタカマ高地に設置したアルマ望遠鏡の機能を格段に向上させ、比類なき電波観測性能を国際学術コミュニティに供し、惑星の誕生の現場そして生命素材を含む宇宙での物質の進化の解明に迫る計画。

いて座 A* (Sgr A*):いて座方向の電波源 (Sgr A) 中に存在するコンパクトで比熱的な電波源。天の川銀河系の中心核に存在する超大質量ブラックホール周囲の降着円盤と考えられている

イベント・ホライズン・テレスコープ (EHT):多数のミリ波・サブミリ波望遠鏡による地球規模の超長基線電波干渉計 (VLBI) を構成して、ブラックホールのごく近傍、事象の地平線 (イベントホライズン) 近くまでの画像を高い空間分解能で撮像し、ブラックホールの物理の解明を目指す国際研究プロジェクト

宇宙重力波望遠鏡 LISA:3機の宇宙機を用いた宇宙空間のレーザー干渉計で、ブラックホール合体などの重力波を観測する計画

ガイア衛星 (Gaia Satellite):2013 年に ESA が打ち上げた位置天文学測定専用の衛星。ヒッパルコス衛星の後継機

核融合反応とニュートリノ問題:1970 年頃から行われた太陽ニュートリノ実験では、観測されたニュートリノの強度が標準的な太陽モデルによる予測と比べて有意に小さく、この現象は「太陽ニュートリノ問題」と呼ばれた。当初は、モデルで用いられている核融合反応に問題がある可能性も指摘されていたが、その後の太陽ニュートリノ実験により、その原因がニュートリノ振動であることが明らかになった

キロノバ (Kilonova):新星の約 1000 倍の明るさに達する爆発現象。2017 年に、NGC4993 で二重中性子星連星が合体してキロノバが発生したことが、重力波と全ての波長の電磁波で観測された

高速電波バースト (Fast Radio Burst; FRB):電波域 (110MHz から 8 GHz) で観測され、継続時間が数ミリ秒ないしそれ以下のパルス状電磁波。フラックスは約 10mJy から 100Jy 程度

コスミック・エクスプローラー (CE):米国で計画されている第三世代のレーザー干渉計重力波検出器で、地上に設置し超長基線を取ることによって感度向上を果たそうとしている計画である

ジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡 (James Webb Space Telescope; JWST):NASA 等による大

型宇宙赤外線望遠鏡。ハッブル宇宙望遠鏡の後継機。2021 年打ち上げ

スーパーカミオカンデ: 岐阜県飛騨市神岡町の地下 1,000m で稼働中の、5 万トンの純水を用いたニュートリノ観測施設。主にニュートリノ振動の研究、超新星ニュートリノの観測、および陽子崩壊の探索を行っている

すばる高精度赤外線分光器 (Infrared Doppler: IRD): すばる望遠鏡に搭載されている太陽系外惑星観測用の分光器

すばる望遠鏡主焦点多天体分光器 (Prime Focus Spectrograph; PFS): すばる望遠鏡の主焦点に搭載される多天体分光器

すばる望遠鏡主焦点広視野カメラ (Hyper Suprime Cam; HSC): すばる望遠鏡の主焦点に搭載される超広視野カメラ

すばる望遠鏡 ULTIMATE: すばる望遠鏡で計画されている次世代補償光学系システム。地表層ゆらぎを補正することで、既存の補償光学に比べて 100 倍以上の視野にわたって星像を改善する

スペクトルエネルギー分布 (SED; Spectral Energy Distribution): スペクトルとほぼ同じ意味であるが、広い波長（あるいは周波数やエネルギー）範囲に及ぶ電磁波の強度分布をグラフで表現する場合に使われる

セイファート銀河 (Seyfert Galaxy): 1943 年にセイファート (C. Seyfert) によって発見された活動銀河核（超大質量ブラックホール）を持つ銀河。明るい核と、通常の銀河とは異なるスペクトルを持つ。渦巻銀河であることが多い

ダニエル K. イノウエ望遠鏡 (DKIST): 米国国立太陽観測所 (NSO) がハワイ州のハレアカラ天文台に建設した口径 4 m の太陽望遠鏡。2021 年完成

ティーガーデン星 (Teegarden's star): 3.8 pc の距離に存在する赤色矮星。光度は太陽の約 0.07%

テス衛星 (Transiting Exoplanet Survey Satellite: TESS): トランジット法による太陽系外惑星探索衛星。2018 年に NASA が打ち上げ

トラピスト 1 (TRAPPIST-1): 12.4 pc の距離に位置する赤色矮星。周囲に 7 個の地球型惑星が存在していることが知られている

東アジア VLBI 観測網 (EAVN): 日本の VLBI 観測網である VERA/JVN、韓国の KVN、中国の CVN が連携して観測を行う国際的な VLBI 観測網。近いうちにタイの NARIT の望遠鏡も参加予定である

ひので衛星: 2006 年に JAXA が打ち上げた太陽観測衛星

フェルミ衛星 (Fermi Gamma-ray Space Telescope): 2008 年に NASA が打ち上げたガンマ線観測衛星

ブレーザー (Blazar; Blazing Quasi-Stellar Object): 活動銀河核（超大質量ブラックホール）から放出される超高速ジェットを、ほぼ正面から観測したもの。広い波長帯で非常に明るく、激しい時間変動を示す

プロキシマ・ケンタウリ (Proxima Centauri): ケンタウルス座 α 星の三重連星系のうち最も暗い恒星。恒星としては、太陽系から最も距離が近い（約 1.3 pc）

ベラ・C・ルービン天文台 (Vera C. Rubin Observatory; VRO; LSST):南米チリで 2025 年に観測を開始した米国の広視野望遠鏡

ホーキングのブラックホール面積定理:ブラックホールの事象の地平線(表面)の総面積は、どのような物理的過程を経ても決して減少しない、という一般相対論に基づいた定理

マグネター (Magnetar):通常 of 若い中性子星の 100-1000 倍程度の磁場強度を持ち、回転エネルギーの損失率で説明できないほど明るい X 線やガンマ線を放射する中性子星。磁場をエネルギー源として光っているものと考えられる

ユークリッド衛星 (Euclid Satellite):2023 年に ESA が打ち上げた可視光・近赤外線観測衛星計画。口径 1.2m

ローマン宇宙望遠鏡 (Nancy Grace Roman Space Telescope):2026 年に NASA が打ち上げた広視野赤外線望遠鏡衛星。口径 2.4 m

＜参考資料１＞

全国共同利用を目的とする大学附置研究所（現在でいう「共同利用・共同研究拠点」）は、1953年に設立された東京大学宇宙線観測所（1976年に宇宙線研究所に改組）および京都大学基礎物理学研究所に始まる。これらは、大学と同質の学術研究を担う機関として位置付けられ、大学に準じた自律性・自治が認められていた。

そこでは「共同利用」の理念として、主に以下の点が掲げられていた。

- ・ 特定の大学に設置されていても、全国の国公立大学の教員等に対して、研究能力以外の条件による差別なく開放されるべきであること。
- ・ 研究者コミュニティによる自律的な運営を基盤とし、その枠組みを個別大学の自治から全国規模の研究者による自治へと拡張すること。そのために、管理運営や共同研究の計画策定に所外研究者が参画する仕組み（運営協議会等）を設けること。
- ・ 「共同利用」を基盤とした共同研究を推進し、異なる大学に所属する研究者が集い知識を交流することで、新たな学問の創出・発展を図ること。

特定の大学に所属しない研究機関である「大学共同利用機関」は、1971年に設立された高エネルギー物理学研究所を始まりとする。これは、同研究所が予算規模および人員の面で国立大学の附置研究所の枠を超えるまでに大規模化し、大学から独立した新たな形態の学術研究機関が必要とされたことによる。

「大学共同利用機関」は当時の文部省所管の機関であり、1989年以前は「国立大学共同利用機関」と称されていた。これに対し、それ以前から存在した文部省所轄研究所（緯度観測所、統計数理研究所、国立遺伝学研究所など）は、主として政策目的に基づく研究を担う機関であり、規模も比較的限定的であった。また、大学のように研究者個人の自発的意思に基づいて研究を推進し、広く研究者コミュニティに対して「共同利用」の場を提供することを主目的とするものではなかった。なお、宇宙線観測所や基礎物理学研究所、ならびに大学共同利用機関としての高エネルギー物理学研究所の設立においては、日本学術会議が重要な役割を果たした。大学共同利用機関制度の設立経緯については、例えば以下の資料に詳しい。

<https://www.he.u-tokyo.ac.jp/content/files/94d04a17eb76d3d713adcbd8049e7bde.pdf>

左から 2 列目の「2023-No」は未来の学術振興構想（2023 年版）[5]での番号を表す。

88

[illegible]

