

記 録

文書番号	S C J 第 21 期-220319-21510500-020
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・宇宙物理学の展望と長期計画
作成日	平成 22 年（2010 年）3 月 19 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、記録として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 委員

海部宣男（委員長）、佐藤勝彦（副委員長）、杉山直（幹事）、永原裕子、池内了、井上一、池内了、岡村定矩、小山勝二、芝井広、柴田一成、鈴木洋一郎、須藤靖、福島登志夫、牧島一夫、観山正見

○ 同上 長期計画検討小委員会 委員

佐藤勝彦（委員長）、海部宣男（分科会委員長）、杉山直（幹事）、井上一、池内了、岡村定矩、小山勝二、長谷川哲夫、芝井広、柴田一成、須藤靖、永原裕子、福島登志夫、牧島一夫、観山正見、小林秀行、高橋忠幸、常田佐久、森正樹、中村正人

○執筆協力者（五十音順）

家正則、井田茂、犬塚修一郎、上田佳宏、大石雅寿、梶田隆章、川崎雅裕、川邊良平、川村静児、柴田大、清水敏文、末松芳法、戸谷友則、中川貴雄、原弘久、本間一郎、望月優子、山田亨、吉田直紀

○協力者（五十音順）

伊藤信成、市川隆、犬塚修一郎、梅村雅之、太田耕司、北山 哲、定金晃三、沢 武文、徂徠和夫、千葉証司、土橋一仁、富田晃彦、仲野 誠、花見仁史、藤沢健太、松村雅文、百瀬宗武、矢治健太郎、山下卓也

要 旨

1. 作成の背景

日本学術会議の旧天文学研究連絡委員会は1994年、『21世紀の天文学』と題する長期計画報告書を取りまとめ、わが国が取り組むべき大型計画について提言した。その後15年を経て、物理学委員会の天文学・宇宙物理学分科会は、我が国の天文学・宇宙物理学分野の今後10年から20年の展望を学術的な観点から見通すとともに、さまざまなレベルで提案・準備されている計画を広くとりまとめた。そのため分科会に天文学長期計画小委員会を組織し、2回の学術会議シンポジウム、個別計画のヒアリング、日本天文学会年会の長期計画特別セッションなどの討議を経てコミュニティの意見を広く集約し、二年にわたって長期的展望の取りまとめと長期計画の策定を進めてきた。ここにその成果を報告する。

2. 学術的展望

本報告第2章では、現在取り組むべき主要な研究課題を挙げ、天文学・宇宙物理学の展望を示した。宇宙論分野では、宇宙の諸成分、特にダークエネルギーとダークマターの解明、第一世代天体の形成以来の宇宙の構造進化の総合的理解。銀河分野では、最遠方銀河の探索、銀河形成・銀河進化の物理過程の解明。活動銀河核・ブラックホール分野では、ブラックホールと周辺環境の共進化の解明、ブラックホールへのガス降着の物理過程の理解、ブラックホール周辺時空の検証。星・元素合成分野では、連星系や大質量星の進化と終末段階の理解、元素循環の解明、星の質量分布の解明、星間分子や星間塵の形成と進化の理解。太陽系外惑星分野では、地球型惑星の発見、異なる環境における惑星系の探求、さらにはバイオマーカー探査。太陽分野では、フレアやコロナ現象の解明、地球環境の源としての太陽研究。新たな宇宙を見る手法として、粒子線、ニュートリノ、ダークマター、重力波などの探求が注目される。理論研究分野では、コンピュータシミュレーションの重要性が急速に増すであろう。

3. 分野別及び個別の諸計画

第3章では、各分野で検討・準備されている諸計画を広く取りまとめた。21世紀を迎え、電磁波ではほぼ全波長域で観測が進められている。大気吸収を受ける成分は、高地や宇宙空間（スペースと表す）での観測が進んでいる。地上での大型観測装置計画は国立天文台が、スペースについてはJAXA/宇宙科学研究本部が中心となって、国内外の連携を図り、推進している。電磁波以外の粒子線や重力波による観測計画、太陽系については無人探査機による直接探査が、目覚ましい発展を見せている。

個別の具体計画は、かなり検討が進められ、かつ単独の科研費だけでは実行できないような大型計画に絞って、電波、光・赤外線、X線・ガンマ線、宇宙線・ニュートリノ、ダークマター、重力波、太陽、太陽系、理論シミュレーションの分野ごとに記載した。スパー

ミッションは、宇宙科学研究本部理学委員会でワーキンググループが設置されているという基準で選定を行った。また、名称、目的、計画概要、代表者および提案・推進主体、予算規模、進捗状況について計画一覧表を作成した。なお記載基準には合致しないがシンポジウム等で提案された計画については、巻末のシンポジウムプログラムを参照されたい。

4. 国家レベルで推進すべき特に重要な大型計画

諸計画の中で特にコミュニティの支持を強く受け、また計画の科学的意義と規模の大きさから国家レベルで早急に取り組むべき重要課題として、慎重な審議を経て次の3計画を選定し、第4章においてそれぞれについて詳しく取りまとめた。

- 1 低温大型重力波望遠鏡計画LCGT
- 2 30m光赤外線望遠鏡計画TMT
- 3 次世代赤外線天文衛星計画SPICA

LCGTは、重力波が引き起こす空間の微小なひずみを測定する新技術の高精度重力波望遠鏡である。神岡鉱山の中に長さ3kmの直交する2本のトンネルを掘り、レーザー光を通す。トンネルの終点に熱振動を押さえる冷却鏡を置き反射レーザー光を干渉させて、2本の腕の長さの微小な変化から、重力波の世界初検出と継続観測を目指す。連星を構成する中性子星やブラックホールの運動を時間を追って観測することが可能となり、強い重力場における現象の解明と一般相対性理論の詳細な検証が進む。

TMTは、口径30mの望遠鏡をハワイ・マウナケア山頂に設置する、米国などとの国際共同計画である。すばる望遠鏡の4倍のシャープな解像力は銀河中心の超巨大ブラックホールや宇宙論的遠方天体の観測、太陽系外の地球型惑星の探査・観測を可能とし、また高い感度は、宇宙最初期の星や銀河の直接観測も可能とする。すばる望遠鏡やアルマが推し進める宇宙初期の謎や太陽系外惑星の理解が、さらに飛躍的に進むと期待される。そのため大気の影響を取り除く補償光学の技術開発を大幅に発展させる

SPICAは、日本が主導する宇宙空間での大型国際共同計画である。絶対温度6Kに冷却した口径3.5mの大型望遠鏡を宇宙に打ち上げ、赤外線これまでになく高解像度と高感度の観測を行う。赤外線は塵による減光を受けにくいため銀河の中心部を透過し、銀河の誕生の現場を直接見ることができる。また太陽系外の惑星の大気成分を測定し、地球外の生命の可能性についても貴重な情報が得られる。さらに惑星などの材料となる固体成分を詳しく観測することが可能で、宇宙における物質の循環の総合的理解に迫る。

5. 天文学・宇宙物理学の長期的発展のために

大規模な長期計画は主に国立天文台とJAXA/宇宙科学研究本部が中心となって進めるが、天文学・宇宙物理学が長期的に発展していくためには、両研究機関を支える大学をはじめ、考慮すべき重要な視点がある。第5章では、それら重要な基盤・環境について述べる。

大学の果たす役割は極めて重要である。共同利用研究所を支え協力して大型計画に参画

し、並行して独自の研究を推進するのみならず、優秀な若手人材を養成し、また天文学と社会をつないでゆく役割も担う。継続的予算確保の困難、個別大学における少数グループの問題、大学院生数の減少など、多くの問題を抱える現状を打開し、コミュニティーが全体として発展していくために、情報格差の解消、大型計画への参加機会の増加、人事交流の活性化など、大学間・および共同利用研究所との連携を強める必要がある。また、研究の現場で、大学院生の果たしている役割は多大なものがある。国としての早急な経済支援の強化が望まれる。それとともに、天文学・宇宙物理学の専門教育を受けた人材が活躍する場所を教育・行政・産業などアカデミア以外に広げる努力をすることは、分野の長期的な発展にとって重要である。

宇宙研究が発展し広がるにつれ、周辺分野、特に素粒子物理学や原子核物理学、地球・惑星科学分野、生物分野、さらにはプラズマ・流体分野などとの連携が、ますます重要となってきた。これらの連携を通じて、新たな学際的な研究分野を創成し、魅力ある21世紀の学問を展開していくことが、学生の関心を高め、また一般社会の関心と要請にも答えることとなる。

一般に日常生活とは無縁と考えられてきた天文学・宇宙物理学研究だが、GPSや地球の気候変動などを挙げるまでもなく、実際には産業や身近な課題とも大きなつながりを持っている。今後、大形計画における最先端技術開発などを通じて、産学連携を一層積極的に進めていく必要がある。

宇宙は、子どもや大人の関心を強く惹きつけるテーマである。研究の成果をさまざまなルートで発信し社会に還元し広めてゆく活動は天文学分野では大いに進んでいるが、今後ますます重要である。未来の人類文明に資するためにも、天文学・宇宙物理学分野においても科学コミュニケーションと市民の科学リテラシーを一層強化していく必要がある。

天文学・宇宙物理学の展望と長期計画

目次

第1章 はじめに：天文学・宇宙物理学の展望	8
1.1 この報告がめざすもの	8
1.2 21世紀の天文学・宇宙物理学	10
1.3 日本の天文学・宇宙物理学の歴史的概観と現状	12
1.4 天文学・宇宙物理学の展望と長期計画の推進における留意点	14
第2章 21世紀の天文学・宇宙物理学の展望	18
2.1 宇宙論	18
2.2 銀河	21
2.3 活動銀河核とブラックホール	23
2.4 星・高密度星・元素合成	25
2.5 星形成	27
2.6 太陽系外惑星	29
2.7 太陽	31
2.8 新たな天文学の窓1：粒子線・ニュートリノ・ダークマター	33
2.9 新たな天文学の窓2：重力波	35
2.10 コンピュータシミュレーション	37
第3章 現代の宇宙観測と未来を目指す長期計画	39
3.1 宇宙観測の発展と現状	39
3.2 日本における長期計画の基盤と方向性	42
3.3 電波観測装置の長期計画	59
3.4 光・赤外線観測装置の長期計画	67
3.5 X線・ガンマ線観測計画	75
3.6 宇宙線・ニュートリノ観測計画	84
3.7 ダークマター探索計画	91
3.8 重力波観測計画	95
3.9 太陽観測計画	100
3.10 太陽系探索計画	104
3.11 理論シミュレーション計画	112
第4章 国家レベルで推進すべき特に重要な大型計画	116
4.1 天文学・宇宙物理学分野で早急に実現すべき特に重要な大型計画の検討	116

4.2 大型低温重力波望遠鏡計画	118
(LCGT: Large scale Cryogenic Gravitational wave Telescope)	118
4.3 30m 大型光学赤外線望遠鏡計画 (TMT: Thirty Meter Telescope)	122
4.4 次世代赤外線天文衛星計画	126
(SPICA: Space Infrared Telescope for Cosmology and Astrophysics)	126
第 5 章 天文学・宇宙物理学の長期的発展のために	130
5.1 大学における天文学・宇宙物理学.....	130
5.2 人材育成の現状と展望.....	136
5.3 宇宙研究の広がりとは分野との連携	139
5.4 宇宙研究と社会	145
付 録：執筆者、執筆協力者名簿、略語集、学術会議シンポジウムプログラム「天文学・宇宙物理学の展望」第一回、第二回プログラム	

第 1 章 はじめに：天文学・宇宙物理学の展望

1.1 この報告がめざすもの

1.1.1 はじめに：日本学術会議と天文学・宇宙物理学分科会

本報告は、我が国の天文学・宇宙物理学分野の 10～20 年を見通す展望と長期計画を、日本学術会議物理学委員会の「天文学・宇宙物理学分科会」が分野コミュニティを代表してとりまとめたものである。日本学術会議の記録として広く社会に公開し、ご意見やご批判を仰ぎたい。

日本学術会議は 1949 年、日本の学術を代表する科学者による特別な公的機関として設置され、科学研究の推進と科学の社会への貢献に大きな責任を負ってきた。第 19 期（2002 年－2005 年）に大幅な改組が実行され、2005 年 10 月に内閣府を所轄として第 20 期日本学術会議が発足したが、使命と役割はそのまま引き継がれている。物理学委員会に新たに設置された天文学・宇宙物理学分科会〔添付資料 1〕は、広い分野との連携が急速に深まっている状況を踏まえて、第 19 期までの天文学研究連絡委員会、および物理学研究連絡委員会の宇宙物理学関連分野を統一し、さらに惑星科学との連携も視野に入れて発足した。国際委員会のもとに新規に設置された IAU 分科会と緊密に連携しつつ、幅広い活動の展開を期している。この天文学・宇宙物理学の展望と長期計画のとりまとめは、その中心的課題として取り上げられ、2 年にわたって検討が進められてきたものである。

1.1.2 検討の背景

1994 年、当時の日本学術会議天文学研究連絡委員会は、天文学長期計画委員会を設置して将来計画や大学での基盤的研究推進等について 2 年にわたって検討し、その結果を『21 世紀に向けた天文学長期計画』として取りまとめた〔参考 1〕。そこでは、20 世紀を「宇宙の時空の中で人間が自らの位置を認識した時代」と位置づけ、人が本格的に宇宙に乗り出す 21 世紀には、宇宙における人間とは何かをさらに深く理解してゆくことが重要であるとして、概略以下の提言を行った。

- ① 地上観測装置では、大型ミリ波サブミリ波干渉計計画を筆頭に、大型重力波望遠鏡計画等を推進。
- ② スペース（第 1 章末の注を参照）からの観測装置では、赤外線天文衛星を筆頭に、次期 X 線天文衛星、次期太陽観測衛星、宇宙空間 VLBI（超長基線電波干渉法）を推進。
- ③ 天文学研究の基盤強化では、大学共同利用機関と大学双方における総合的な発展、特に大学における観測施設や技術開発の充実を進める。

この報告から 10 数年を経た現在、そこに盛られた提言は、地上では建設中のアルマ（アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計、ALMA）、TAMA300（干渉計型重力波アンテナ）の

先進的成果を経て予算申請中の LCGT（大型低温重力波望遠鏡）計画、宇宙空間では現在活躍中の赤外線観測衛星「あかり」と太陽観測衛星「ひので」、また成功裏に観測を終えたスペース VLBI 衛星「はるか」など、そのほとんどが実現して、高い研究成果を挙げている。これら新しい進展は、それ以前から活躍してきたミリ波天文学、X線天文学、理論天体物理学、この間に完成したすばる望遠鏡などの成果とともに、日本をこの分野における国際的リーダーの一員として明確に位置づけたと言えよう。また、まだ十分ではないながらも電波や可視光・赤外線の観測装置・技術開発体制が多くの大学で整備強化され、大学における基盤的な研究の充実も、目立って進んだ。

1.1.3 本報告がめざすもの

前回の長期計画報告書以来のそうした大きな発展を踏まえて新たな長期的方向性を展望することは、日本の天文学・宇宙物理学分野においても、また日本学術会議の責務に照らしても、緊急かつ重要な課題である。本分科会は発足後ただちに長期計画小委員会を設置し、2006 年から本格的に長期計画の検討を開始した。2007 年 12 月と 2008 年 5/6 月の 2 回にわたる公開シンポジウムを開催して長期的な学問の展望や各分野で検討中の長期計画を報告・議論し〔添付 1〕、2008 年 3 月には日本天文学会年会において、長期計画特別セッションを開催、また分科会では関係者からのヒアリングを重ねた〔添付 2〕。これらの検討の結果を報告書として取りまとめ、ここに日本学術会議記録として公開するものである。

前回 1994 年の報告から十数年の間の多面的な発展を反映して、現在日本の天文学・宇宙物理学は国際的にも多面的な共同と責任を担うに至っている。いっぽう日本では、国立大学の法人化や緊縮財政がもたらす負の影響が学術・基礎科学全般に拡大しつつあり、天文学・宇宙物理学分野においても、そうした影響は無視できない。科学技術立国・文化国家を目指す我が国の学術の一翼を担う天文学・宇宙物理学分野として、現実に立脚しつつ実りある将来を築く展望を本報告で提示し、若い人々が未来への希望を見出した科学に対する社会の期待に応える一助ともしたい。

1.1.4 本報告書で取りまとめた計画・分野の範囲について

本報告書にとりまとめた計画の範囲は、1994 年の報告が扱った範囲を拡張、上記 2 回の公開シンポジウムで発表された数多くの計画を基礎としている。ただし長期計画の視点から、すでに予算が付いて進行中の計画や科研費レベルでの推進が期待される規模の計画は除き、企画段階を超えて一定の準備が進んでいる規模の大きな計画を対象とした。それでも提案は多岐にわたり本文での網羅的記述は困難だったが、個別計画をまとめた第三章の分野ごとの計画リストに出来るかぎり記載した。また公開シンポジウムのプログラムを添付資料とすることで、提案された計画が可能な限り広く眼に触れ日本の天文学・宇宙物理学の現況が理解されるようにした。その上で、天文学・宇宙物理学コミュニティが一致して実現を期待するナショナルプロジェクト的大型計画については、第四章にまとめて詳しく記載し、コミュ

ニティーの意向が社会に明確に伝わるよう配慮した。

本報告に包含する分野の範囲については、天文学・宇宙物理学分科会の報告という性格からも、同分科会を支えるコミュニティからの提案が主体である。いっぽう天文学・宇宙物理学では観測や理論の進展に伴い、素粒子物理学、地球惑星科学などと従来の分野を越える交流や共同が進んでいる。この現状を踏まえ、公開シンポジウムでの計画提案公募に際しては、上記関連分野コミュニティの電子メーリングリストなどを通じ、広く呼びかけを行った。その結果は公開シンポジウム、また本報告にも一定程度反映されている。もちろんこれら隣接・関連分野の長期計画の検討はそれらのコミュニティが主体となるべきものであり、本報告には部分的に含まれるに止まっていること、また分野の境界が必ずしも明確でないことは、現状ではやむをえない。今後日本学術会議が 2010 年 4 月の公表を期している『日本の展望』を中心とする活動と諸分野コミュニティの議論をさらに強化し、分野の統合や新分野創設も含めながら科学の長期展望を構築して行くことを期待したい。

1.2 21 世紀の天文学・宇宙物理学

1.2.1 人間にとっての宇宙

私たち人間にとって、宇宙とは何だろうか、人間はなぜ宇宙をどこまでも理解したいと思ひ、なぜ重力に逆らって宇宙に向かおうとするのだろうか。

おそらく 16 万年のアフリカで「考える葦」・「知りたがりの動物」として出発し、今日の文明を築いた人間は、自分自身が生まれ住み暮らすこの世界の仕組みを知ること、大きな喜びと達成感、安心を見出してきた。それは原初的な科学が成立したはるかな昔から人間が続けてきた営みであり、また人間が地球の生物圏において生存圏を大きく広げ、またとない存在となる上での原動力でもあった。「知る営み」、それが科学である。この観点からは、天体・宇宙は、組織的な科学活動の最初の対象であったとも言える。

1.2.2 20 世紀の天文学・宇宙物理学の到達点

人間は 20 世紀の科学全般、とりわけ天文学・物理学の発展を通して、地球および地球上の生物系と人間自身を生み出した根源が宇宙の長い歴史の中にあることを理解した。この理解は、可視光・電波・赤外線・紫外線・X線・ガンマ線と目覚ましく発展した天文観測と、物理学を中心とした理論との共同で生み出されたものである。膨張する宇宙と無数の銀河、その一つ一つの銀河の中で起こる莫大な数の恒星の誕生と死、それに伴う星間雲など宇宙物質の循環と組成変化、さらに、恒星とともに生まれる無数の惑星、その一つである地球の歴史と地球生物の起源・仕組み・進化など、各方面の研究によって年々新たな理解が積み重ねられ、宇宙から人間までの総合的認識がうち立てられてきた。こうして 20 世紀、人間は「宇宙の中の自分」を見出したのである。

20 世紀における最大の科学的発展として、宇宙に始まりがあったことを示す宇宙膨張の

発見と、遺伝の秘密を解き明かした 2 重らせんの発見が、しばしば挙げられる。宇宙と生命という 2 つの基本的存在について根源的ともいえる理解がもたらされたからである。21 世紀が宇宙と生命をさらに深く広く突き詰めてゆく世紀になることは、間違いない。

21 世紀の天文学・宇宙物理学は、何を指すことになるのか。具体的な課題については第二章でやや詳細に述べられるが、ここでは特に重要と思われる課題を若干とりあげて概観しよう。

(1) 宇宙の起源・物質の根源

宇宙膨張の起源の解明と素粒子の根本的構造の研究は、急速に接近している。素粒子の対称性の破れと宇宙の物質密度、質量の謎を解く上で発見が期待されるヒッグス粒子、ダークマター（暗黒物質）の正体とも目される超対称性粒子、20 世紀の観測がもたらした新しい謎・ダークエネルギー（暗黒エネルギー）、ひも理論と重力の本質、そして私たちの世界を構成する空間・時間・物質の誕生と宇宙の歴史にどう迫れるか。宇宙と物質の起源に挑む天文学と物理学は、理論体系としての数学を重要な要素として取り込みつつ、ついに共通の場に到達しつつある。21 世紀、両者がますます深く広い共同作業を展開することは間違いない。

(2) 宇宙の生命と地球の生命

21 世紀の生命研究は、宇宙の場で全く新しい展開を迎える可能性がある。太陽系の探査が進み、火星やエウロパ、タイタン等の惑星や衛星で、地球とは違った生命やその痕跡発見への期待が高まっている。いっぽう、恒星の周りに普遍的に存在することが明らかとなった太陽系外惑星の観測は、わが太陽系を大きく見直す契機になった。観測は早晚地球規模の小型岩石惑星を発見し、21 世紀前半には次世代の観測装置により、そのような惑星上での生命の存在証拠の探査も進むと期待される。地球上でのみ知られていた生命に対し、どのような発見があり、どのような理解が進むのか。天文学・地球惑星科学・生命科学分野はつながって、地球生物と人間、やがては文明についても、新たな自己理解を生み出すのではないかと期待される。

(3) 宇宙の諸現象の解明と新たな謎

20 世紀後半以降、観測・理論・実験を支える技術は急速に進んだ。いま達成されている観測装置やコンピュータの能力は非常に大きく、かつ進歩の速度も緩んではない。それを考えれば、21 世紀に期待される宇宙の諸現象---太陽活動、太陽系諸天体、恒星の一生、星間物質の進化、太陽系外惑星、銀河とその歴史、宇宙の高エネルギー現象、ブラックホールと時空の構造、銀河形成、ダークマターとダークエネルギー、・・・等々の理解の前進は、私たちの予想を超えて目覚ましいものとなるだろう。いま新しい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ている。自分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み、21 世紀の研究はそうした方向性を明確に意

識するものになっていかざるを得ない。また理解の大きな前進からは、常に新たな展開・新たな謎が生まれる可能性がある。とりわけ、重力波や粒子線天文学など、新しい観測手段にかかる期待には大きなものがある。

(4) 宇宙への進出

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た多彩な天文観測衛星（宇宙望遠鏡、宇宙天文台などとも呼ばれる）、また惑星や衛星の驚くべき世界の姿をもたらした無人惑星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た。宇宙の探査はいま、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。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進出に力を尽くすのは、21 世紀の自然な流れであろう。

(5) 宇宙と人間・文明

私たち人間は、自然・宇宙を理解することでいま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ゆくだろう。

いま、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。たしかに科学・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はじめている現在、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。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ゆくことが出来るだろう。

1.3 日本の天文学・宇宙物理学の歴史的概観と現状

第二章以降の本格的な議論に先立ち、ここでは日本の天文学・宇宙物理学研究の歴史的概観と現状を、ごく総括的にまとめておくことにする。歴史的な詳細は、日本天文学会編『日本の天文学の百年』〔参考資料 3〕等を参照されたい。

1.3.1 理論中心から第一線の観測へ：第一の発展期（1960-80 年代）

日本の天文学・宇宙物理学は、戦前においては木村栄の Z 項の発見があったが、独自の観

測装置では見るべきものがなく、戦後から 1960 年代も京都大学、東京大学などにおける理論研究を中心に発展した。観測装置では乗鞍のコロナグラフ (1950 年完成)、岡山の 188cm 光学望遠鏡 (1960 年完成)、木曽の 105cm シュミット望遠鏡 (1974 年完成)、また 1950 年代から名古屋大学空電研究所、東京天文台などで始まった太陽電波観測が、日本における先端的天文観測の嚆矢である。しかし世界をリードする観測が日本でも始まったのは、1980 年代からである。地上では 1982 年に野辺山に完成しミリ波天文学をリードした東京天文台の 45m ミリ波望遠鏡とミリ波干渉計、スペースでは宇宙科学研究所の「はくちょう」(1979 年)に始まる先進的小型 X 線天文衛星シリーズが、それぞれ一線の観測を切り開き、第一の発展期を作った。理論では小惑星の族を発見した戦前の平山清次から萩原雄祐を経て古在由秀らへ続く力学研究、京都大学の林忠四郎グループによる恒星形成と太陽系起源論の統合的構築、また東京大学グループの恒星大気の研究などが第一線でリードした。

1.3.2 第二の発展期 (1990 年代-)

第二の発展期は、1991 年に建設を開始し 2000 年に完成した国立天文台の口径 8.2m すばる望遠鏡、あすか (1993 年)など本格的 X 線天文衛星、太陽観測衛星ようこう(1991 年)、世界初のスペース VLBI 衛星はるか (1997 年～)、世界初の実用的な重力波望遠鏡を実現した TAMA300 (1997 年～) など、1990 年代を通して実現し活動を始めた第一線の望遠鏡群によってもたらされた。

またこの時期、東京大学や京都大学、東北大学によるすばる望遠鏡観測装置の開発、名古屋大学の 4m ミリ波望遠鏡なんてん (チリ)、東京大学の赤外線望遠鏡マグナム (ハワイ)、名古屋大学の 1.6m 赤外線望遠鏡 IRSF (南アフリカ)、東京大学の CO[2-1]線全天サーベイ望遠鏡 (チリ) や富士山頂サブミリ波望遠鏡などが実現した。また、国立天文台の VERA の運用にあわせて鹿児島大学、北海道大学、岐阜大学、山口大学などにおける VLBI ネットワークが構築され、観測と技術開発が進んだ。このように、この時期に大学による装置開発、中小望遠鏡の適地への建設などにより優れた観測成果が目立つようになったことは、特筆に値する。

理論では、新たなグループが各大学や国立天文台に形成されるとともに、東京大学・理学研究所・国立天文台などが協力して、重力多体問題専用計算機 GRAPE が開発された。GRAPE は日本発の優れた専用計算機として世界に広まり、理論研究の優れた武器として、スーパーコンピュータの普及とあいまってシミュレーション天文学を発展させた。

1.3.3 現在の状況

21 世紀を迎えた現在は、第二期の発展を受け継いで、より大規模で新たな活動が生まれつつある。可視赤外線観測では、すばる望遠鏡が優れた成果を足場に第二期観測装置を本格的な国際共同で整備している。次世代超大型望遠鏡 ELT (口径 20～30m) や次期スペース望遠鏡 JWST が実現する 10-15 年後までのリード役が期待される。新技術を用いた京都大

学・名古屋大学・国立天文台の 3.8m 光学赤外線望遠鏡の建設(国内)や東大の 6.5m 赤外線望遠鏡計画(チリ)が進められている。電波分野では野辺山のミリ波天文学の発展であるミリ波サブミリ波大型干渉計計画が日・米・欧三極共同建設のアルマとして実現し、2012 年完成を目指してチリでの建設が進んでいる。日本はこの巨大干渉計の一翼を担い、アジア諸国と新たな連携を進める。アルマのパイロット計画である 10m サブミリ波望遠鏡 ASTE が活動をはじめ、米国との共同で先進的観測を進めている。VERA と日本 VLBI ネットは、韓国の KVN などと協力して東アジアへネットワークを広げようとしている。重力波望遠鏡は実験機 TAMA300 と冷却実験機 CLIO の成果を踏まえ、重力波の検出と本格観測を目指す LCGT の開発がほぼ完了して、建設を待つばかりである。

スペースでは、赤外線観測衛星「あかり」や太陽望遠鏡衛星「ひので」、X 線観測衛星「すざく」が優れた観測成果を生み出しており、第二のスペース VLBI 衛星 ASTRO-G(VSOP-2) は 2012 年の打ち上げを目指して製作が進むなど、ロケット事故を契機とした停滞を脱し、再び活気を呈している。惑星探査では、小惑星探査機「はやぶさ」の成功に続き、本格的な月探査科学衛星「かぐや」が国際的に注目を集める数々の成果を挙げ、日本の太陽系探査が軌道に乗った。

理論では 2004 年以來の GRAPE や並列コンピュータが銀河形成や惑星系形成の研究において威力を発揮し、平行して新段階の GRAPE-DR プロジェクトが進んでいる。

こうして 21 世紀初頭における日本の天文学・宇宙物理学研究は理論・観測・装置で大きな発展を遂げ、多くの研究分野で世界の第一線に躍り出て、世界的にも注目を集めている。それは高い目標を掲げ、信念と熱意をもって装置開発に取り組み、観測・研究を進めてきた研究者たちのたゆまぬ努力の成果である。その結果、いくつかの大学を含めて天文学・宇宙物理学の技術開発力が蓄積強化され、若手研究者が多数育って、全体としては極めて活気ある状況にある。

2009 年現在、日本の IAU メンバーは約 600 名(全メンバー約 1 万人)で、米・仏に次ぐ第三番目となり、なお増加しつつある。ただし日本天文学会の正会員数は急増の時期を過ぎ、ほぼ横ばいの約 1600 名である。

1.4 天文学・宇宙物理学の展望と長期計画の推進における留意点

科学の長期計画・大型計画の立案で重要な視点は、第一に学問の発展の見通し、第二にその見通しも含めて優れたアイデアに基づく先進的で意欲的な計画である。それらについては第 2 章、第 3 章でそれぞれ具体的にとりあげるが、ここでは現在の日本が天文学・宇宙物理学の展望・長期計画を展開していく上で重要な要素として直面している、特徴的な二つの問題について述べる。

1.4.1 大型化・複雑化する計画と流動する科学・研究の環境

まず、計画の大型化に関連する問題である。地上の大型共同利用施設の場合、予算総額は

野辺山宇宙電波観測所 110 億円、すばる望遠鏡 380 億円、アルマの日米欧総額 1000 億円（日本負担分 250 億円）、次世代超大型望遠鏡 ELT や次世代長波長電波望遠鏡 SKA も、総額 1000 億円程度と予想される。このように装置の大型化傾向は明確であり、関わる人員も増大している。法人化に伴う予算圧縮や雇用緩和により、技術開発や製作、メンテナンス等の外注から内製への大幅な移行が進んだのは、アルマであらわれた新しい現象である。また観測適地を求めての海外への進出が増え、国際交渉やマネジメントの専門家の導入など、大型プロジェクトの推進組織も、家内工業的であったこれまでから欧米型へと急速に変わりつつある。このことは若手研究者を取りまくポストの状況（職位、任期など）にも少なからぬ影響を及ぼしており、長期的視点で検討すべき課題が加わったことに留意しなければならない。

野辺山からすばる、アルマに至る天文学・宇宙物理学分野での大型装置建設の経験は、世界をリードするデータや計算を生み出す共同利用型の大型装置が、我が国の研究水準と活性度を第一線に保つために不可欠であることを、明確に示している。一方で、大型化・複雑化した装置の構想から製作・稼動に至るまでの時間（10 年から 20 年）が、研究者、特に若手人材の育成や、学問の流れ自体にも大きな影響を及ぼしている。その影響を軽減し広い研究基盤の活性を保つためにも、科研費レベルを中心とするさまざまな規模の中小計画や大学における多様な装置計画・研究計画が並行的に進められることが、極めて重要である。すでに 1.3 節で述べたようにそうした状況は徐々に実現されてきたとはいえ、構造改革・法人化の影響は、多くの大学で研究基盤の弱体化となってあらわれている。未来を切り開く大型計画を進めることは不可欠だが、大学共同利用機関など中核研究機関と大学とのさらに密な共同、大学相互間の多様な連携、大計画と中小計画の意識的な協力など、一段の工夫が求められる。また長く続く財政緊縮・重点化の影響は、大型計画においても計画の停滞、大幅な遅延や構想立案自体の困難などとして現われている。

このようにいま、1990 年代とは異なる状況の中で、21 世紀の日本における大型計画の推進や長期計画の方向性を探ることは極めて重要であり、コミュニティの知恵がますます必要とされている。

1.4.2 国際的役割の増大と複雑化

日本の天文学・宇宙物理学の発展に伴い、日本が果たす国際的役割も大きく広がり変化した。日米欧三極の一つとして建設と今後の共同運営を進めるアルマをはじめ、すばる望遠鏡の第二期装置計画や ASTE 望遠鏡での観測装置国際共同が本格化し、「なんてん」、IRSF、マグナム、宇宙線グループのカンガルー望遠鏡（オーストラリア）、MOA（ニュージーランド）など大学グループが海外に設置した望遠鏡も数多い。宇宙空間（スペース）からの観測を進める宇宙科学では早くから米欧宇宙機関との共同が進んで、いまや日本単独の大型計画はあり得ない状況に至っている。地上の大型計画でも、30m 大型光学赤外線望遠鏡計画 TMT、長波長での画期的電波観測システムをめざす SKA など、アルマと同レベルあるいは

それ以上の国際共同体勢による実現が模索されている。

当然、これら国際共同で日本が果たす役割・主導性は、非常に高まっている。それは、日本の計画推進体制・事務組織に対し、柔軟な予算運用、国際的対応のエキスパートなど国際計画を支える支援システムが要求されていることをも意味している。日本では事務職の専門性や長期的経験を支援する体制が不十分である。予算会計システムや研究者の人材不足もあり、困難と非効率が生まれている状況が多い。

今後、国際的共同は不可避免的に進む。それは日本にとっても計画の大型化に伴う経費負担や人員負担など諸問題の軽減、研究レベルと活力の向上につながるものであり、研究戦略としてしっかり位置づけなければならない。例えば英国は早くから非常に積極的に全方位的な国際共同を展開し、それによって国内の研究レベルと活力も維持してきた。もちろん国際共同がもたらす計画推進上の負担や足枷も多い。それでも日本は、中小の身軽な独自プロジェクトの推進と合わせ、大型国際共同における多様な国際対応に慣れ、積極的に体制を整備して、孤立状況に陥ることのないよう戦略的対応を進めなければならない。

国際的視点で今後重要なのは、アジアである。従来日本は（今のアジア諸国も）アジア諸国間の互いの協力より、手っ取り早く成果が得られる欧米先進諸国と協力してきた。だが、グローバル化の時代といえども、科学研究における一定の一国主義という基盤、そして近隣の国同士が連携する地域主義は依然重要であるばかりか、将来大きな力を発揮することは間違いない（ヨーロッパの成功例を参照）。天文学・宇宙物理学分野では、これまでアジアで孤立し米欧に対して孤軍奮闘してきた日本だが、状況は変わった。中国、韓国、台湾などはすでに立派なパートナーであり、将来の発展も期待される。過去一部に限られてきたアジアとの協力だが、いまアルマをはじめ、あかり、すばる、スピカ、理論等でも共同が進んでいる。2005年に日本（NAOJ）、中国（NAOC）、韓国（KASI）、台湾（ASIAA）の4中核天文台が共同することを目的とするEACOA（東アジア中核天文台連合）が形成されたが、その着実な発展を期待したい。日本は単にリーダーシップを求めるのではなく、過去欧米諸国に多くを学んだ見返りをアジア諸国に返し、また出来る限り対等の関係で共同を積極的に推進すべきである。それは長い目で見たとき、日本にも科学にも大きなリターンとなって帰るだろう。さらにいうなら、基礎科学は十分に友好の使者となり得る。近隣の友好はすなわち、互いの発展である。

注)「スペース」の用語について

日本語では、宇宙と言う言葉が2つの違う概念に対して使われており、しばしば誤解を招くもととなっている。一つは、英語の **universe** (ユニバース) に対応する言葉で、われわれがおかれている時間・空間とそこに含まれる物質とエネルギー全体を指す広い概念のものである。もう一つは、英語の **space** (スペース) に対する言葉で、「地球の大気圏の外（地上数10キロメートル以上）の空間のうち、探査等の人類の活動が及んでいる範囲」に対して使われることが多い。スペースに対応する「宇宙」には、「宇宙空間」と言う言葉を

使って、もう一つの広義の「宇宙」と切り分けることができるが、「宇宙空間」も2つの少し違う意味合いで使われている。一つは「その場」観測の対象としての地球磁気圏から惑星間空間・太陽系空間に及ぶ空間をさして使われる場合、もう一つは、まさに「宇宙空間」を利用した、あるいは、対象とした、さまざまな研究・技術開発等の活動の場の意味で使われる場合である。本報告においては、この「さまざまな研究活動の場としての宇宙空間」に対して「スペース」と言う言葉を用い、混乱を避けるように心がけた。

ちなみに、「宇宙科学」と言う言葉もしばしば用いられるが、この場合の「宇宙」は「スペース」に対応する意味で使われている。すなわち、宇宙科学とは、「スペースを利用した、あるいは、対象としたさまざまな科学研究」の総称である。本報告の対象である、ユニバースの意味での「宇宙」を研究対象とした天文学・宇宙物理学研究においては、スペースを利用して行う部分が、「宇宙科学」と重なる。

添付資料

1. 天文学・宇宙物理学の長期展望（日本学術会議公開シンポジウム）プログラム
 - (ア) 第一回 学術会議公開シンポジウム「天文学・宇宙物理学長期計画」（2007年12月28日、日本学術会議講堂）
 - (イ) 第二回 学術会議公開シンポジウム「天文学・宇宙物理学の展望－長期計画の策定へ向けて－」（2008年5月31日・6月1日、東京大学小柴ホール）
2. 天文学・宇宙物理学分科会における長期計画審議記録

参考資料

1. 『21世紀に向けた天文学長期計画』1994 日本学術会議天文学研究連絡委員会・同長期計画小委員会 編
2. 日本天文学会百年始編纂委員会編『日本の天文学の百年』（恒星社厚生閣）

第2章 21世紀の天文学・宇宙物理学の展望

天文学は歴史上もっとも古い学問のひとつである。かつては、宇宙の起源や構造に関する神学や哲学のような思弁的側面と、気象学や航海術といった実学的な側面を併せ持っていた。その後、19世紀から20世紀における物理学の爆発的な進展を背景として、宇宙物理学という分野が誕生し現在に至っている。今や天文学と宇宙物理学の違いは曖昧であるし、あえて区別して使い分ける必要もない（本章の以下の節では天文学と宇宙物理学という2つの言葉が用いられているが、ほとんどは分野ごとの慣用にしがったものに過ぎず、本質的な違いはない）。それらの研究の目的をあえて一言で集約するならば、「天体諸階層の起源と進化」であり、地質学や生物学などと同様に時間軸に沿った研究が日常的に行われているという点に、それ以外の科学諸分野とは大きく異なる際立った特徴をもつ。

いまや天文学・宇宙物理学の研究対象は、地球、惑星、太陽、恒星、星団、銀河系（天の川銀河）、銀河、銀河団、そして宇宙そのものをも含む天体諸階層すべてに及ぶ。用いられる「観測」手段も、電波、赤外線、可視光、紫外線、X線、ガンマ線といった電磁波はもちろん、宇宙線、ニュートリノ、重力波、さらにある意味ではコンピュータや理論までも含む広範なものである。必然的に、個々の研究分野ごとに、方法論はむろん価値観までもが多岐多様にわたり、結果的に天文学は学際的性質を強く持つ。天文学が常に進化しつつ、世の中の根源的な謎を追究する学問であり続けている原動力はまさにここにある。

本章に続く3章と4章では具体的な将来プロジェクトについて詳細に論じられる。本章は、それらとは相補的に、天文学・宇宙物理学が今後目指すべき科学的目標とその意義について俯瞰的に展望することが目的である。そのために、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、星形成、太陽系外惑星、太陽、粒子線・ニュートリノ・ダークマター、および重力波を取りあげる。また、これらとはやや異なる視点ではあるが、今後の天文学・宇宙物理学の発展に対してコンピュータシミュレーションが果たすことが期待される役割を最後に論じておく。これらの具体的な例から、天文学の21世紀には広大な地平がひろがっていることを実感していただけるであろう。

2.1 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々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、量子論、相対論、DNAの発見などと並び、20世紀科学が成し遂げた偉大な成果の一つである。自然科学としての宇宙論研究は、アインシュタインによる一般相対論の構築(1916年)から始まったと言っても良いだろう。その後、ハッブ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)を通じて、理論と観測の双方からの進展を受け現在の標準宇宙論に至る。天文学と素粒子物理学の進展を取り込み、宇宙の創生・

誕生から現在に至る進化を統一的に記述するシナリオを完成させることが広い意味での宇宙論の究極の目標である。「宇宙論」という言葉は厳密に定義されている訳ではなく、時によって多少異なった使い方をされる。個々の天体ではなくそれらを包含する容器としての宇宙自身の起源と進化の研究を「宇宙論」と呼び、より広範な天文学・宇宙物理学とは区別するのが普通である。本節でさす「宇宙論」もその意味で用いるが、本章の他の節の記述からも分かるとおり、宇宙論は天文学・宇宙物理学の他の分野、さらには素粒子物理学に代表される基礎物理学および数学とも密接に関連した学際的な研究分野であることもまた強調しておきたい。

1980 年代初めにはすでに、通常元素によっては説明できない正体不明のダークマターが大量に宇宙を満たしていることが観測的に確立した。このダークマターの存在は、素粒子の標準理論では説明できないものを示唆する確かな実験・観測的根拠とみなされており、そのインパクトの大きさは明らかである。さらに 1990 年代末には宇宙膨張が加速していることが発見され、ダークマター以上に大量に存在するダークエネルギーこそが宇宙の主成分であると考えられるようになった。このダークエネルギーの正体も全く不明である。Ia 型超新星サーベイ、遠方銀河の 3 次元分布、CMB 温度ゆらぎの 2 次元地図などを組み合わせれば、宇宙全エネルギー密度の 73 パーセントがダークエネルギー、23 パーセントがダークマター、残りの約 4 パーセントが通常元素、という結果が得られる。宇宙のほとんどが正体不明の何ものかによって占められているという驚くべき事実は、天文学にとどまらず 21 世紀科学に根源的な謎を突きつけている。

このような現状を鑑み、今後の宇宙論がめざすべき方向性として、あえて、

- (i) ダークエネルギーおよびダークマターを始めとする宇宙の諸成分の性質の特定
- (ii) 第一世代天体の誕生から現在の銀河宇宙に至る構造進化の解明
- (iii) 天文学的な現象論にとどまらない物理的な宇宙進化の総合的理論モデルの構築

の 3 つに分類して述べてみたい。これらは以下の節でも異なる視点から繰り返し述べられているように、通常の狭い意味での宇宙論に限るものではなく、より広く 21 世紀科学が解明すべき根源的課題として位置づけられるべきものである。

2.1.1 宇宙の組成の解明：ダークマターとダークエネルギー

宇宙の組成の解明に大きな役割を果たした観測データとしては、超新星の等級・赤方偏移関係、銀河の 3 次元分布、CMB 温度ゆらぎの地図の 3 つが代表的である。天文学観測によってダークマターの存在は確立したが、その正体は未知であり、地上で直接検出し素粒子階層のなかに適切に位置づけることが出来なければ研究の完成とは言えない。実際、ダークマターの直接・間接検出に向けた技術的進展も目覚ましい。2.8 節で述べられているように、神岡ニュートリノ実験に代表される非加速器地下素粒子実験の伝統をもつ日本には、ダークマター直接検出実験において世界をリードして推進する土壌が熟成している。一方、ダークエネルギーの解明は、未だそのような実験的検出の段階にはほど遠く、今後

数多くの天文学的精密観測を積み上げる以外には道がない。現在までに得られている銀河の 3 次元分布地図をさらに過去の宇宙にまで拡大することで、ダークエネルギーの値が時間変化するのかもしれないのか、特にアインシュタインが別の文脈で 90 年以上前に導入していた宇宙定数がダークエネルギーの正体であるのかないのかを検証することがまず本質的な第一歩である。主焦点に広視野カメラを搭載するユニークな特徴をもつすばる望遠鏡は、ダークエネルギーの解明を目的とする広域遠方銀河サーベイに最適であり、世界的にも大きな期待が寄せられている。また、WMAP 衛星をはじめとする CMB 観測は、宇宙論の飛躍的な進歩をもたらした。国内外で進行中の次世代 CMB 観測プロジェクトは、宇宙の組成のより精密な測定にとどまらず、新たな宇宙論の地平を切り開く可能性をも秘めている。

2.1.2 天体の起源と進化：第一世代天体から銀河宇宙へ

「容器」としての宇宙を特徴付ける複数の宇宙論パラメータの確定と並んで重要なのは、その「中味」、すなわち、膨張宇宙という文脈における物質の進化史の解明構築である。2.2 節から 2.5 節でも述べられているように、星の誕生と死、さらにそれに伴う元素合成と循環、銀河・銀河団の形成、などほとんどの天文学の観測・理論研究は、この宇宙論的な文脈に位置づけられる。特に、宇宙の果てを探る過程で必然的に突き当たる第一世代天体の起源は、それ自身の重要性はもちろん、その後の多様な銀河宇宙へと至る進化を解明する上でも本質的な課題である。

2.1.3 基礎物理学に基づく宇宙進化の統一的シナリオの構築

当然ではあるが、宇宙論研究の目的は、「宇宙を理解すること」である。「理解する」という言葉の意味は難しいが、例えば宇宙の組成を明らかにすることは理解への第一歩と言える。実際、現時点で到達した精密宇宙論が導いた「宇宙組成の値」は常識的な予想を完全に覆す驚くべきものであった。当然、次の段階は、この値の意味するところを探ることである。そのためには、天文観測をより精密化して誤差をさらに小さくするのみではなく、「(素粒子) 物理学だけから導かれる必然的な帰結として」、言い換えれば後付けではない基礎理論によってそれらを説明するモデルの構築が必要である。そのような理論がどの程度の時間スケールで完成するのか、そもそもすべてを説明するような理論が存在するのか、いずれも予想は困難である。しかしながら、宇宙論観測の飛躍的な進歩を考慮すれば、そのような理論なくしては目的を失ったままいたずらに観測の精密化をすすめるというそしりは免れ得まい。天文学と素粒子物理学をはじめとする基礎物理学および数学との双方向の交流と融合が本質である。

言うまでもないことではあるが、これらの研究においては、従来予想もされていなかったような謎を発見し新たな科学を開拓することを目指すという視点を忘れてはならないことを、最後に強調しておきたい。天文学自身が常に進化し、科学者のみならず一般の人々をも魅了し続けている理由はまさにここにあるのだから。

2.2 銀河

銀河は宇宙における物質分布の基本的なユニット（単位）である。さらにまた、個々の銀河においては、恒星・ダスト・ガスなど様々な成分が相互に関係しながら存在する。この意味において、銀河天文学、銀河物理学が目指す方向は、これまでもそうであったように、21 世紀初頭にあっても本質的には「多様」である。しかし、一方で、世界、そして我が国におけるこれまでの銀河研究の発展を踏まえて考えると、今後 10 年の銀河研究には、明確な二つの大きな方向性がある。ひとつは、「究極の銀河観測フロンティア」、すなわち、宇宙の第 1 世代と考えられる銀河の探査。もうひとつは、ようやく俯瞰的にとらえられるようになった銀河宇宙の歴史・進化を、より物理的に理解することで、銀河系（天の川銀河）をはじめとする現在の銀河の姿と統一的に結びつけること。つまり、「俯瞰から理解へ」と進む方向である。

ガリレオ・ガリレイによる土星の輪、木星の衛星などの観測を「太陽系の発見」、ウィリアム・ハーシェルによる天の川の観測を「我が銀河の発見」、そして、エドウィン・ハッブルが用いたウィルソン山 2.5m 望遠鏡や、パロマー山の 5m 望遠鏡などによる銀河、クエーサーなどの観測を、時空の広がりとしての「我が宇宙の発見」とするならば、1990 年代からの「すばる望遠鏡」など 8-10m 級の地上大望遠鏡、そして「ハッブル宇宙望遠鏡」など宇宙天文台がもたらしたものは、まさに「宇宙史の発見」と言うことができる。これらの観測装置によって、人類は、はじめて 137 億年の宇宙史における、銀河の誕生と進化を「俯瞰」的に観測することに成功しつつあるからである。これらの観測結果を、非常に高い精度で求められるようになった宇宙論パラメータ、また、宇宙の構造形成の理論的モデルや大規模数値シミュレーションと組み合わせることによって、今や、我々は、「宇宙史」の大半を再現できるようになりつつある。上述の二つの方向性は、前者は宇宙史の時間的極限をさらに遡るものであり、後者は、宇宙史の意味を物理学的に解釈し理解することに対応する。

2.2.1 宇宙最遠方天体の観測：第 1 世代の天体形成を追う究極のフロンティア

宇宙最遠方、すなわち知られている最古の銀河を観測しようという目標は、我々が認識する世界のフロンティアを拡大する、という意味で、常に天文学の大目標であった。一方、現在の観測は、おそらく宇宙初期の第 1 世代に近い天体形成がもたらしたものと考えられる「宇宙の再電離」の時期までほぼ到達している。ビッグバンで始まった宇宙は、誕生後 38 万年の時期にいったん陽子が電子を捕らえて水素原子となることで、中性化した。その後、最初の星・銀河が誕生すると、そこからの紫外線により、再び水素が電離したと考えられている。宇宙の再電離と呼ぶ。宇宙誕生後数億年の時期のことである。宇宙最遠方銀河の観測は、単に「最遠方」というレコードを目指すものではなく、宇宙再電離につながる第 1 世代天体に近い銀河形成、すなわち、現在に至る天体形成の最初期の銀河の観測を

目指すことと同義と言ってよい。これは、この宇宙における我々の歴史と起源、すなわち、宇宙の銀河形成の全史を観測的に解明したいという天文学の一大課題において、いわば大河の最初の一滴を知ろうとする、たいへん野心的な挑戦である。現在、日本は、赤方偏移 $z=6.95$ （129 億年前）の銀河の発見に代表されるように、すばる望遠鏡を中心とした遠方宇宙の観測、さらに初代天体形成モデルについての理論的研究で世界をリードしている。

今後 10 年の展望として、さらにこれまでの成果を発展させる展開を強く期待したい。具体的には、まず、すばる望遠鏡で到達した最遠方（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）をより拡張して行い、輝線銀河の個数密度や空間分布の変化などから宇宙再電離がどの時代にどのように完了したのかを完全に解明することが期待される。宇宙初期の天体形成が進むとともに、宇宙の再電離が進行し、その結果、中性水素による水素再結合輝線の散乱吸収効果も減衰して、観測される輝線銀河の個数密度、空間分布に大きな変化が生じると考えられている。すばる望遠鏡に搭載される新技術を用いた観測装置などによってこれまでにない広視野で非常に暗い天体まで観測する深宇宙探査を行い、これらの現象を高い統計的精度で検証することで、宇宙再電離現象の進行過程を明確に可視化してとらえ、理解できるだろう。さらに、30m 級超大型地上望遠鏡や次世代の宇宙望遠鏡、そしてアルマ望遠鏡を用いて、より遠方、より高赤方偏移、より宇宙初期の時代を探査することで、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が明らかにされる。このような第 1 世代銀河の状態を詳細に観測し、理論的研究や詳細な計算機シミュレーションと併せて宇宙最初の天体形成過程をあますところなく解明することが、このフロンティア追求の大きな目標である。

2.2.2 俯瞰から理解へ

むろん、漫然と宇宙史を俯瞰し続けるだけでは、その理解につながらない。とりわけ、銀河の形成期における恒星、ガスの動力学、活動銀河核の誕生と非常に活発な初期の星形成に伴って生じる超新星爆発によるエネルギーの散逸、銀河内・銀河間ガスへの重元素の生成とその循環など、銀河形成・銀河進化の現場における様々な物理過程は、遠方銀河の詳細な観測によって初めて実証的に解明できる。現在のみならず、50 億年前、100 億年前といった様々な時代の銀河の、詳細な内部構造や種々の統計的性質を明らかにすれば、星形成の材料になる分子ガスやダストが形成期の銀河内でどのように分布しているのか、銀河内にどのような星種族が存在するのか、激しい星形成や活動銀河中心核現象がなぜ発生し、それがさらに周囲の物質にどのような影響を与えたのか、そして、これらの現象が、現在の円盤銀河や楕円銀河の形成にどのように結びつくのか、などの詳細な描像が構築できるであろう。

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し得たとき、まさに「俯瞰から理解へ」という段階に達したことになる。このためには、観測的には遠方銀河の様々な物理現象を

詳細観測できる観測装置、すなわち大集光力・高解像度を持つ望遠鏡や、銀河のガス・ダスト成分をより詳細に観測できる装置、銀河形成期の多量のダストに隠された銀河最深部の現象を明らかにできる装置が必要である。この点で、アルマ望遠鏡や、地上超大型望遠鏡、次世代の宇宙望遠鏡は、主導的かつ大きな役割を果たすだろう。またそれらとの定量的な比較を可能とする、銀河形成大規模数値シミュレーションにも大きな期待がかかっている。

2.3 活動銀河核とブラックホール

かつては単なる理論的な存在に過ぎないと考えられていたブラックホールであるが、もはやその実在を疑う研究者はいない。それどころか、いまやブラックホールは、一部の研究者だけが興味をもつ特異的な天体ではなく、天文学において普遍的な役割を演じていることが明らかとなっている。過去 10 年程度の研究の結果、現在の宇宙のほぼ全ての銀河は、その中心に太陽質量の 100 万倍から 1 億倍もある巨大質量ブラックホールを持ち、かつその質量は銀河の中心部の星の全質量と極めて良い精度で比例しているという、驚くべき事実が発見された。これは、ブラックホールが銀河そのものの形成に深く関わっており、両者が「共進化」してきたことを強く示唆する。さらに、これら巨大質量ブラックホールの近傍から放出される莫大なエネルギーが、母銀河だけでなく、宇宙で最大の天体である銀河団の構造にも大きな影響を与えていることも分かってきた。ブラックホールは宇宙の重要な基本構成要素であり、その起源、およ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。さらにブラックホールは、地上では実現不可能な強重力極限における一般相対論の検証を可能にする唯一の天体であり、基礎物理学の理解の根本に関わる研究対象でもある。ブラックホール研究は、観測と理論の双方において、日本が世界をリードしている分野である。将来の複数の大型望遠鏡によってもたらされる観測データと、それを支える理論との強力な連携を通して、今後も大きな発展を期待したい。

電磁波を用いたブラックホールの研究には、

- (i) 宇宙の様々な場所にあるブラックホールを探索し、それ自身と環境との共進化を解明する
 - (ii) ブラックホールにガスが落ち込みエネルギーに変換される物理過程を理解する
 - (iii) ブラックホールのごく近傍の観測を通じて一般相対論をの検証する
- の 3 つの方向性が考えられる。以下に少し詳しく解説する。

2.3.1 ブラックホールと環境の共進化

銀河中心に存在するブラックホールにガスが落ち込むと、その重力エネルギーが高い効率で電磁波放射に変換され、広い波長範囲で明るく輝く「活動銀河核」として観測される。活動銀河核は、ブラックホールがガスの質量を飲み込んで成長する現場である。ブラック

ホール探査のために効率の高い方法は、星からの光に邪魔されない波長を用いることであり、ブラックホールに落ち込むガスからの X 線放射を観測することがその代表例である。わが国の X 線天文学は、他波長の天文学と連携しつつブラックホールからの X 線放射を観測し解釈することでこの分野に大きく貢献してきた。

ブラックホールの存在にとどまらず、その起源を理解する上で決定的に重要なことは、初期宇宙（赤方偏移が 6 以上、今から 127 億年以上前）にあるブラックホールからの信号を直接観測することである。しかしながら、これら「生まれたてのブラックホール」から放射される X 線は微弱であり、現在最も感度の高い X 線望遠鏡をもってしても残念ながら観測することはできない。したがって、より大面積の X 線望遠鏡を打ち上げて、誕生直後のブラックホールを直接見ることは、X 線天文学に課せられた最重要テーマの一つである。ブラックホールが銀河と共進化してきたならば、その成長期間の大部分は激しい星生成を伴っており、塵やガスに深く埋もれているはずだ。このような埋もれたブラックホールを観測する上でもやはり、透過力の強いより高エネルギーの X 線は有効である。研究の最終目的は、宇宙初期から現在に渡るブラックホール形成史、およびその母銀河と環境との関係を解明することで、宇宙の構造形成史においてブラックホールの果たす役割を理解することにある。その意味では決して X 線天文学だけに閉じた研究ではなく、より多波長の観測データと相補的に組み合わせることの重要性は明らかであり、将来の多波長大型望遠鏡計画との密接な連携という視点は不可欠である。

2.3.2 ブラックホール降着流とジェットの物理

ブラックホールへの質量降着およびそれに伴うアウトフロー（ジェット・円盤風）の機構は、それ自体の物理の興味のみならず、2.3.1 節で述べたブラックホールと環境の共進化を理解するための基礎としても極めて重要である。ブラックホール周囲の降着円盤の構造と電磁波スペクトルは、質量降着率に強く依存することが知られている。観測と理論の両面において、広い範囲のブラックホール質量および質量降着率下での降着流の物理を統一的に理解することは、ブラックホール天文学の最終目標の一つである。今後、特に重要な課題は、ブラックホールの形成初期におこったと予想される、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、の 2 つであろう。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が、その解明の鍵を握る。

2.3.3 ミリ波・サブミリ波領域でのブラックホール撮像観測

ブラックホールは質量に応じて有限の大きさ（シュバルツシルト半径）を持ち、そのスケールを分解できるような解像度の撮像観測の実現は、ブラックホール研究における一大目標である。ブラックホールと降着円盤からなる系を観測した際に、ブラックホール周辺にシュバルツシルト半径の数倍～5 倍程度の大きさを持つ暗い「穴」（＝ブラックホールシ

ャドウ)が見えると理論的に予言されている。このようなブラックホールシャドウを直接に撮像できれば、ブラックホール存在の直接的証拠となる。また、シャドウの大きさや形状からブラックホールの質量やスピンの決定ができる。さらに、降着円盤中のホットスポットの運動を計測することで、強重力場中での一般相対性理論効果の検証が可能になるなど、天文学のみならず基礎物理学にまで多大なインパクトを与えるブレークスルーがもたらされる。このようなブラックホール近傍の撮像観測を実現するには、見かけの大きさが最も大きいブラックホールである銀河系中心核 Sgr A*(シュバルツシルト視半径 ~ 10 マイクロ秒角)、おとめ座の M87 銀河の中心核 Virgo A(~ 5 マイクロ秒角)などが有力な観測対象候補である。これらの撮像を可能にする手法は、あらゆる観測装置の中で最も高い分解能を誇る超長基線電波干渉計(VLBI)のみで、特に、分解能向上のため、および、星間プラズマによる散乱の影響を避けるため、短ミリ波からサブミリ波領域での観測が必須である。日本はすでにセンチ波での VLBI 観測およびミリ波・サブミリ波の電波観測において世界的な実績を有している。これらの技術を融合させてミリ波・サブミリ波 VLBI を実現することで、ブラックホール撮像観測において主体的に貢献することが可能である。

2.4 星・高密度星・元素合成

星の進化は宇宙物理学・天文学における最も基礎的な物理過程である。宇宙を俯瞰するとき、まず目につく構成要素は銀河であるが、それは第一義的には星の集合体である。銀河の組成の変化(化学進化)は、星間ガスからの星の誕生と進化、そしてその最終段階で星が星間空間にガスを戻すというサイクルの繰り返しによって引き起こされる。その過程で、惑星や我々の体の材料となる重元素が生成され、やがて生命を誕生させる。様々な質量で生まれた星がどう進化しどのような終末を迎えるのか、さらに、宇宙の化学進化にどのような影響を与えるのかを正確に理解する事は、宇宙の様々な階層における諸現象を統一的に理解する上で必要不可欠である。

星の進化は、太陽のような比較的低質量の単独星(連星ではない星)については比較的理解が進んでいる。しかし、連星系や太陽の 8 倍以上の大質量星の進化、そしてその終末である超新星爆発についてはまだ不確定な要素が多い。これらの現象は化学進化においても重要な役割を果たすため、より正確な理解が求められている。

2.4.1 ガンマ線バースト：起源の解明

過去 10 年間に、この分野で最も劇的な進展を見せたのは疑いなくガンマ線バーストの研究であろう。発見以来、数十年の間「謎の天体」とされていたガンマ線バーストは、1997 年に宇宙論的距離で発生する巨大な爆発現象である事が確立した。ガンマ線バーストは宇宙で最大級の明るさを有する現象であるため、宇宙初期の星形成や再電離現象などを探る上での有力な道具としての役割も注目されている。その後の相次ぐ発見の中で、ガンマ線バーストには二種類あり、継続時間の長いガンマ線バーストは、太陽の数十倍以上という

大質量星の進化の終末の現象であることがほぼ確実視されるに至っている。重力崩壊によるブラックホール形成と超新星爆発の際、鋭く絞られたほぼ光速のジェットとして質量が放出され、それを真正面から見るとガンマ線バーストとして観測されるらしい。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もとで起きるのか、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して残っている。これは重力崩壊型超新星の多様性の理解という捉え方も可能である。理論的には、ブラックホール周囲の降着円盤からのジェットの生成機構が最大の難問であり、特に大規模数値シミュレーションを用いた解明が望まれる。

一方、もう一つの種族である継続時間の短いガンマ線バーストの起源は未だ定説がない。その解明は、ガンマ線バーストに残された最大の謎でもある。星形成を行っていない楕円銀河でも発生するため、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（2.9 節）。一方、連星中性子星が起源でないならば何が起源なのか、今の時点では予測は難しい。

2.4.2 Ia 型超新星モデル：宇宙の加速膨張と鉄の起源

重力崩壊型の超新星と並び、もう一つの重要な超新星である Ia 型超新星の起源も重要な課題である。この天体は明るさがそろっているため、標準光源として遠方宇宙における距離測定の主役である。実際、2.1 節で述べた宇宙の加速膨張の発見はまさにこの Ia 型超新星の観測データによってもたらされた。しかしながら Ia 型超新星の起源もまだ確定しているとは言いがたい。白色矮星を含む連星において、伴星からの質量降着の結果として白色矮星が核燃焼を暴走させ爆発するシナリオは広く信じられているものの、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いる。さらに Ia 型超新星は宇宙における基本的な元素である鉄の主要な生成源であり、銀河の化学進化の観点からもその理解は重要である。

2.4.3 中性子星とブラックホール：形成・進化モデルの確立

重力崩壊型超新星の後に残される、中性子星やブラックホールといったコンパクト天体についても、まだわかっていないことが多い。特にブラックホールについては、太陽質量程度の「星質量ブラックホール」と、銀河中心核に見られる太陽質量の数百万倍以上の「巨大質量ブラックホール」の、異なる二つの種族が存在することが知られている。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一つである（2.3 節）。超高光度 X 線源と呼ばれる天体は、この両者をつなぐ「中間質量ブラックホール」ではないかという説もあり、今後の大きな進展も期待できる。また、中性子星とパルサーも忘れてはならない存在である。パルサーの放射機構の詳細は未だ不明な事も多く、高エネルギーガンマ線観測などを通じて極限物理状態を探る事は興味深い。また、マグネターと呼ばれる 10^{14} ガウスという超強磁

場を持つ中性子星は、軟ガンマ線リピーターやガンマ線バーストとの関連からも大変重要な天体として注目されている。さらに、観測的には難度が高く、決定的な結論が出にくいとはいえ、中性子星内部の物質状態は超高密度物質、原子核物理、超伝導や超流動などの物性物理学とも関連しており、基礎物理学の観点からもまた大きな意義をもつ研究対象である。今後のより精密な観測の進展により、新たなブレークスルーが得られる事が期待できる。

2.4.4 銀河考古学：宇宙の元素循環

ヘリウムやリチウムなどのような軽元素は、ビッグバン初期の宇宙において、いわゆる「最初の 3 分間」に合成された。一方、炭素や酸素などのいわゆる「重元素」は、星の中心部での核融合反応で作られる。鉄は単位質量あたりの束縛エネルギーが最も大きい安定な元素であるため、通常の核融合反応は鉄の合成でとまる。もちろん自然界には鉄よりもさらに重い原子核が多く存在するが、それらの起源も未解明のままである。超新星爆発で発生する衝撃波に伴う過程が起源であると考えられているものの、今後の理論・観測双方において更なる進展が待たれる。特に、銀河形成の初期に生まれたと考えられる、重元素量の非常に少ない星が最近続々と発見されつつある。これらの星の元素組成の解明は、鉄より重い元素の起源のみならず、我々の銀河系の形成初期の姿の再構築（銀河考古学）にも通じており、銀河進化の研究と相補的にさらなる発展が期待できる。

2.5 星形成

天文学の歴史は恒星の観測から始まったといっても過言ではない。また地球上の生命のエネルギー源は本質的には太陽に帰着する。したがって太陽に代表される恒星が、どのような条件下でいかにして誕生したのかを理解することには、天文学的興味だけにとどまらない普遍的な意味を持つ。いったん誕生した恒星がその質量に応じてどのような進化をたどるかという星の進化論は、20 世紀に天文学と物理学の学際領域として大きく発展し、深い理解が得られている。一方、ではその星がどのように誕生するかという基本過程は実はあまりよく理解されていない。2.6 節で述べるように、惑星形成の現場は原始星誕生の現場でもある。星の形成過程を理解することなくして、惑星の形成、さらにはそこでの生命の誕生を議論することは不可能である。さらに観測的には、太陽のような恒星の多くが実は単独ではなく、2 個がペアとなってお互いの周りを公転する連星をなしていることが示されている。この連星の周りでも惑星は誕生するのであろうか？ その惑星上に生命が存在するとすれば一日（自転 1 回）に日の出を 2 回見ることになるが、それは生命にどのような特徴を付与するのであろうか？ 疑問は尽きないが、そもそもどのような連星がどのような頻度で形成されるかという基本的な問題に関する現在の理解は極めて不十分である。次世代大型電波望遠鏡等により、星形成の現場が詳細に観測できるようになり、星形成現象への理解は世界的に急速に進むはずだ。そのような計画に直接・間接に携わっている日本

国内の研究者の活躍が期待されている。

2.5.1 星間物質：重元素の起源と物質循環のダイナミクス

もちろん、星形成を理解する目的は、生命を育む惑星が生まれる環境という文脈だけにあるわけではない。宇宙スケールで考えたときの基本的構成要素は銀河であるが、銀河を構成する通常物質の大部分は星であるから、銀河の起源は星形成の理解に帰着する。我々の体を構成する炭素や酸素などの重元素は星の中心部の核反応で作られる。その生成物は星の一生を通じて星間空間にばら撒かれる。その重元素を含む塵（ダスト）とガスを材料として次の世代の星が形成されることで、物質循環のサイクルが繰り返される。このサイクルによって銀河内物質の重元素量が増え、銀河が進化する。物質循環の時間スケールは星形成率（単位時間単位体積当たり形成される星の質量）に依存しているが、我々の銀河系における星形成率は驚くほど小さい。星形成を起こす低温高密度のガス雲は分子雲と呼ばれるが、そこから単純に自由落下の速度で星が作られると仮定すると、観測される星形成率の約千倍になってしまう。「なぜ星形成が遅いのか？」という問いに答えるためには、星形成の現場である分子雲における磁場や乱流の効果の理解が本質的である。分子雲の強磁場やガスの乱流は星形成を妨げると考えられるからである。

さらに、いつどのようにして星形成が始まるのかということを理解する必要がある。そのためには星形成の環境を決める分子雲の形成過程の理解にまで遡る必要がある。分子雲の形成過程を支配するのは、銀河内の星間空間の大部分を占める温度1万度程度の希薄な弱電離プラズマ・ガスとその中に漂う（絶対）温度百度程度の水素原子ガス雲の間の相転移現象を含むガス・ダイナミクスであり、ガスを如何にして絶対温度十度程度まで冷却するかという星間物質の物理学である。物質の電離・解離・化学反応や輻射加熱・冷却などのプラズマ物理の複合問題となっている星間物質のミクロ・マクロ物理学においては、実は星間磁場や宇宙線の存在が重要な要素となっている。したがって、銀河力学だけでなく、高エネルギー天文学を巻き込む大きな問題が横たわっているのである。これらの研究は近年急速に進展しているが、日本の理論研究者の活躍が顕著であり、今後も是非ともその優位性を確保したい。

2.5.2 星の初期質量関数の決定

星形成過程において太陽の約8倍以上の質量をもつ大質量星が多く形成されすぎれば、その高い活動性のため、銀河内のガスは銀河間空間に吹き飛ばされてなくなってしまう。この場合、次世代の星形成は困難となり、銀河は進化しなくなってしまう。逆に、太陽の10分の1程度以下の低質量星ばかりが形成されると、それらの寿命は宇宙年齢をはるかに超えてしまい、銀河の中での元素循環などの活動性が著しく低いものになってしまう。

この例からもわかるように、星形成の際に、どのような質量の星がどのような割合で形成されるかを示す「星の初期質量関数」の決定は、銀河と宇宙の進化に密接に結びついた

星形成研究の究極の難問である。その解決には時間が必要であろうが、理論と観測の双方にまたがる根源的な問題として、次の世代の研究者にもぜひとも積極的に取り組んでもらいたい課題である。

2.5.3 星間化学：多様な星間分子や星間塵の形成と進化

国立天文台野辺山の電波望遠鏡の活躍などにより、分子雲などの星間空間には多数の種類の分子が存在していることが知られてきた。また「あかり」他の宇宙赤外線望遠鏡によって星間塵の多様な性質が明らかになってきた。効率的に放射冷却しうる分子の形成・進化は星間物質の熱的ダイナミックスの理解に重要であるのみならず、その特異な化学反応そのものが興味深い。驚くことに、絶対温度十度の極低温環境でも化学反応が進行していることが、アルコール等を含む多数種発見された有機物からわかっている。それを可能とする分子雲中でのイオン分子反応は、化学者にも興味を持たれているテーマである。星間塵表面の持つ触媒作用の重要性も認識されるようになった。星間化学が天文学と化学の分野にまたがる一つの学際研究分野として発展している所以でもある。

また、「どの程度まで複雑な高分子有機物が、いつどこで生まれるのか？」という問いは、生命の起源に興味をもつ人々を引き付けるテーマである。星間塵がどのようなプロセスを経て惑星の材料となるのかもきわめて興味深い。近い将来稼働を始める予定の大型電波望遠鏡アルマでの観測により、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が飛躍的に進むはずだ。この円盤を作るガスと塵の化学進化の研究は、大気と液体の水を保持し生命を宿す惑星環境の研究のプロトタイプとなるものであり、天文学が物理学のみならず化学や鉱物学などの関連分野との垣根を越えて大きく発展する将来を予見させる。

2.6 太陽系外惑星

天文学の歴史は我々の「世界」を特別なものから平凡なものへと引き下ろす歴史だった。地球は世界の中心ではなく太陽のまわりを回る複数の惑星の一つに過ぎなかった。20世紀に入ると、その太陽は銀河系（天の川銀河）を構成する平均的な恒星であり、銀河系もまた宇宙に無数に存在する銀河のひとつであることが認識された。これらの事実を踏まえれば、我々の地球を含む太陽系、そして生命すらも特別なものではないという考えが生まれるのは当然で、他の恒星のまわりの惑星（系外惑星）探しが1940年代に始まった。しかし、系外惑星が発見されたのはそれから50年を経た1995年のことだった。

発見が遅れた一因は、実際の系外惑星系は想像をはるかに超えて多様で、太陽系の常識が通用しなかったからである。発見当初は、ホット・ジュピター（中心星に極めて近いガス惑星）やエキセントリック・プラネット（円から大きくずれた楕円の公転軌道を持つ惑星）など巨大ガス惑星の軌道の多様性に注目が集まった。しかし現在では、視線速度法(*)とトランジット法(**)の両方の観測によって推定された惑星の密度（組成）の多様性や、視線速度観測の高精度化や重力レンズ観測によって検出されはじめた地球型惑星に注目が集まり

つつある。

今後の太陽系外惑星の研究の方向性としては、以下の3つが考えられよう。

- (i) 精密分光観測による惑星大気組成の推定
- (ii) 水が液体として存在しうる（海を持ちうる）地球型惑星（ハビタブル惑星）の発見
- (iii) 白色矮星、巨星、前主系列星、近接連星など多様な環境下にある惑星系の探求と観測データに基づく統一的な惑星系形成・進化モデルの構築

以下、これらについて順次説明を加えておく。

(*) 惑星の公転により中心の恒星が揺さぶられる微少な速度変化を観測する方法。

(**) 惑星が恒星の表面を通過する時に恒星の明るさが僅かに暗くなることを観測する方法。

2.6.1 直接撮像・分光による巨大ガス惑星の大気組成推定

太陽系外惑星の観測において、その直接撮像と分光はいわば究極のゴールである。現在の観測精度は、巨大ガス惑星に関しては直接撮像・分光が実現可能なレベルにほぼ達しつつある。したがってその初成功を目指して世界中の大望遠鏡がしのぎを削っている。すばる望遠鏡による直接撮像に関する今後の成果をぜひとも期待したい。従来の視線速度法やトランジット法、重力マイクロレンズ法などが間接的であるのに対して、惑星からの信号を直接とらえるのみならず、力学的情報だけでなく、惑星大気に関する化学的情報を得る意義は大きい。

2.6.2 ハビタブルな地球型惑星の発見：系外生命研究へ

ここ数年の高分散分光器の精度向上により、視線速度観測で大型の地球型惑星（スーパーアース）が発見されてきた。いまのところ、感度的に検出が容易な中心星に近いものにバイアスされているものの、暗いM型星ではそのような中心星に近い惑星こそ、ハビタブル惑星となり得る。つまり生命が存在する可能性を秘めている。近い将来、視線速度観測の更なる高精度化や衛星からのトランジット観測により、低質量星まわりにハビタブル惑星が発見されるであろう。このような低質量星のハビタブル惑星は潮汐作用により、常に中心星に対して同じ面を向けることになる。したがって、X線や紫外線フラックスが太陽型星のハビタブル惑星より強いことが予想され、地球とは異なる環境を持つ。この意味でハビタブル惑星の多様性にも注目すべきである。

一方、重力レンズを用いた惑星検出は1～3AU程度の比較的遠い軌道にまで感度をもつため、存在度が高い低質量星の惑星が選択的に検出される。この方法の場合、太陽と同じG型星のハビタブル惑星も観測可能である。これらは確率は低いものの衛星トランジット観測でも検出可能であり、TPF (Terrestrial Planet Finder)、ダーウィンなど次世代天文観測衛星による分光観測の格好のターゲットとなろう。さらに、このような分光観測を通じて生命の痕跡（バイオマーカー）をさぐるという野心的な研究も展開されつつある。

2.6.3 多様な中心星環境での惑星系の探求： 統一的惑星系形成・進化モデルの構築へ

地球外生命の発見につながり得るハビタブル惑星の探査とは別に、中心星の質量や進化段階が異なる環境下で形成される惑星系の多様性の探求も興味深い。そのような大きく異なる環境で誕生した惑星系のデータを得ることが出来れば、惑星形成の理論モデルへのフィードバックが有効に行える。むしろ、惑星の形成や進化モデルを制約する上では、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。2009 年時点で系外惑星の発見数は 350 個を越えているが、様々なパラメータの依存性を決定するには、データ数はまだまだ不十分である。今後のデータ数の増加に伴い、我々の太陽系だけではなく、太陽系外惑星系一般に適用可能な統一的な惑星系形成・進化モデルの構築が可能となる。系外惑星の研究は、観測も理論も始まったばかりで、今後の展開は予想がつかない。特に、生命との関わりを含め、これまでの天文学の枠を超えた宇宙生物学への胎動が感じられる。

2.7 太陽

太陽は、宇宙の中で我々に最も近い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。恒星内部構造論や恒星大気論は、太陽の観測データをもとにチェックされることで発展してきたし、恒星黒点や降着円盤コロナという概念も太陽の観測をヒントとして生まれてきた。さらに、太陽は我々地球上の生命や気象現象のエネルギーの源でも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。

現代太陽物理学の基本課題は、以下のように要約できよう。

- (i) 太陽面爆発（フレアとそれにとまなうコロナ質量放出）の発生機構
- (ii) コロナ加熱機構と太陽風加速機構（コロナの基底としての彩層加熱も含む）
- (iii) 黒点の発生機構（磁場の起源と活動周期の起源）
- (iv) 核融合反応とニュートリノ問題
- (v) 差動自転（赤道加速）や子午面還流の起源

このうち、(iv)は太陽物理学と素粒子物理学との重要な接点である。また (v) の内部速度場の問題は、(iii) の黒点の起源の問題につながる。ガリレイによる「発見」以来 400 年が経過したにもかかわらず、黒点の起源は依然として太陽の究極の謎として残っている。フレアもコロナも元をたどると黒点（磁場）に行き着く。さらに後述するように黒点の長期変動が地球の気候変動や生命の起源・進化にも関係があるとすれば、黒点の起源を解明することの重要性が理解できよう。

2.7.1 天文学の基礎としての太陽研究：歴史的概観

近代天文学としての太陽研究は、17 世紀初頭のガリレイによる望遠鏡を用いた黒点観測に始まる。以来、黒点は太陽表面における現象であることがわかり、太陽自転、黒点の 11

年周期なども明らかにされた。19 世紀半ばには黒点近傍での太陽面爆発（フレア）が発見され、20 世紀初頭に黒点に磁場が発見されるに至り、現代太陽物理学が幕を開ける。20 世紀半ばには、日食のときに見えるコロナが 100 万度もの高温にあることがわかり、1970 年代にはそのコロナでさえ磁場の支配下にあることが明らかとなった。以後、観測波長が広がり、空間・時間分解能が高くなるにつれ、太陽活動の激しい動的性質がますます明らかになっていく。観測の発展にともない、より高速、より高エネルギー、より小スケール、より短時間の、新しい活動現象が次々に発見されてきたと言える。もちろんこのことは天体現象の観測一般に共通するが、太陽の場合、活動現象の原因が基本的には磁場にあることが判明している点が大きな違いである。それゆえ、太陽の活動現象の研究は、まだ観測的にベールに包まれている（磁場の観測が困難な）様々な天体の活動現象の理解に多くのヒントを与えるものと考えられるのである。

2.7.2 天体プラズマの実験室としての太陽研究：フレアとコロナ

20 世紀半ば以後の太陽研究のひとつの方向は、天体磁気プラズマ・電磁流体现象の実験室としての太陽活動現象の解明であった。フレアの発生機構は長らく謎であったが、20 世紀終わりに我が国の「ようこう」衛星の活躍によって、磁気リコネクション機構によることが確立された。ただし、これはフレア解明の糸口にすぎない。磁気リコネクションの物理はプラズマ物理の問題として未解決であるし、エネルギーの蓄積機構・トリガー機構などもまだ理解されていない。このあたりは実験室プラズマ、磁気圏プラズマの研究者との協力が必要な分野であり、今後は分野の垣根を超えた学際的共同研究が必須となろう。

フレアが突発的な現象であるのに対し、コロナは定常的現象である。そのコロナが 100 万度に加熱されている原因はわかっていない。コロナは地球に影響を与える太陽風の源（つまり地磁気嵐の源）であるし、ほとんどの恒星でコロナや恒星風が発見されているので、コロナ加熱（および太陽風）問題は恒星の理解にとって本質的に重要である。2006 年に打ち上げられた、わが国の「ひので」衛星は、このコロナ加熱機構の解明を筆頭に、フレアの発生機構（トリガー機構）、磁気リコネクションなどの電磁流体现象の基礎物理の解明を目指している。「ひので」衛星は、これまでの太陽観測が明らかにしてきた傾向を推し進め、「太陽光球・彩層は誰が想像していたよりも、ずっと激しい現象（ジェットや波動現象）に満ち満ちている」ことを発見しつつある。

2.7.3 地球環境の源としての太陽研究：宇宙天気と宇宙気候

太陽フレアは、電磁波（X 線や紫外線）、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。実際、人類の宇宙空間への進出にともない、太陽の影響による被害が無視できなくなっており、宇宙天気（space weather）予報は緊急の課題となっている。太陽フレアやコロナの研究がその基礎をなすのは言うまでもない。「宇宙天気」が比較的短時間（数時間～数日）の現象をさすのに対し、もっと長期

(数年以上)の太陽変動(たとえば黒点11年周期)の地球への影響は「宇宙気候」(space climate)と呼ばれる。地球温暖化問題が深刻な社会問題となっている現在、これらの研究の役割と重要性は今後ますます大きくなるはずだ。この問題には、地球にふりそそぐ宇宙線の影響も間接的にかかわっている可能性があり、天文学、宇宙線物理学、地球物理学など、学問の垣根を超えた研究交流が必要である。宇宙天気・宇宙気候は、現代の太陽と地球に限った話ではなく、過去の太陽系さらには太陽系外惑星系にもあてはまる普遍的なテーマである。言い換えれば、太陽は、現代天文学のフロンティアである太陽系外惑星と地球外生命の探査の基礎でもあることを強調したい。

今後の太陽研究は、フレアとコロナの解明を現代の緊急課題とした上で、太陽の究極の謎である黒点(磁場)の起源の解明に向かって進むべきであろう。黒点(磁場)生成の現場は太陽内部なので、日震学などを活用した太陽内部探査は今後ますます重要となるだろう。一方で、太陽の地球への影響に関する研究(宇宙天気学・宇宙気候学)は、より広い学問的視点からも重要であり、そのような学際的分野の育成、既存の学問の枠を超えた研究交流と協力体制作りが今後の課題である。

2.8 新たな天文学の窓1：粒子線・ニュートリノ・ダークマター

天文学は主に可視光、そして近年では電波、赤外、X線など様々な波長の「光」を用いて宇宙を観測してきた。しかし、宇宙からの情報を我々に伝えるものは光だけに限られるわけではない。例えば、宇宙線と呼ばれる高エネルギーの粒子線、弱い相互作用のみしかないニュートリノなどがある。これらは様々な天体からそれぞれ特徴的な物理過程を通じて放出され、それを用いて宇宙を見ることによって、光だけでは解明できない天体現象・物理過程が解明できる。いわば、新たな天文学の窓である。

2.8.1 宇宙線の起源：組成と加速機構

宇宙から到来する高エネルギー粒子線である宇宙線に関する研究は、ヘスによる1912年の発見以降約100年の歴史をもつ。その間、約12桁のエネルギー範囲にわたって宇宙線のエネルギー分布が観測され、その起源・組成・伝搬に関する研究が行われてきた。特に、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として残っている。超高エネルギー宇宙線には、 10^{20}eV のエネルギー付近に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GZKカットオフ(Greisen-Zatsepin-Kuz'min カットオフ)が存在するはずである。日本グループがGZKカットオフを超える宇宙線の検出を報告したことを契機として、現在その検証と起源の解明を目的とした大規模空気シャワー観測実験が行われている。低エネルギー反陽子に対しては、日本グループは継続的な気球実験により、太陽活動周期をカバーする精密な観測データを提供した。ガンマ線に関しても日本は先駆的な観測を行い、複数のガンマ線天体を発見した。その後、ヨーロッパで大規模なガンマ線望遠鏡が稼働し多くのガンマ線天体が

発見されるに至って、ガンマ線天文学へと発展した。

近い将来、超高エネルギー宇宙線では GZK カットオフが見え始め、さらに長年の課題の 1 つである宇宙線の組成の同定に向けた実験が行われると期待される。そのためには大気に突入した宇宙線がつくる空気シャワーのシミュレーションを精密化することが不可欠である。一方、ガンマ線観測においては、高エネルギーのガンマ線を観測することによりその起源（電子起源か陽子起源か）を解明するとともに、他の波長の観測と併せて統一的に高エネルギー天体现象を理解することが重要である。後述するダークマター粒子の検出においても宇宙線の観測は重要な役割を果たすはずである。

2.8.2 超高エネルギーニュートリノと宇宙背景ニュートリノ輻射

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、ニュートリノは太陽などの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、重力崩壊型の超新星爆発の際にも爆発のエネルギーのほとんどがニュートリノとして放出されるなど、天体现象とも極めて深く関わっている。ニュートリノはその相互作用の小ささから観測は困難であるが、デービスによる太陽ニュートリノの検出、カミオカンデによる超新星 1987A からのニュートリノの検出を経て、今やニュートリノ天文学として確立しつつある。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。

さらに今後は、超新星ニュートリノの観測を通じた超新星爆発機構と星形成史の解明、超高エネルギーニュートリノの発見による高エネルギー天体现象の解明が期待されている。超新星、特に重力崩壊型超新星の爆発機構の解明には、爆発に伴うニュートリノのエネルギー分布と時間変化の観測が不可欠である。また、過去に起きた超新星が放出したニュートリノの蓄積である宇宙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重要な情報となる。また超新星残骸等、宇宙線加速が行われていると考えられる現場では、中間子の崩壊や超高エネルギー宇宙線と背景光子との反応によって超高エネルギーニュートリノが生成される。その検出は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。

2.8.3 ダークマター：直接検出へ

ダークマターの存在は銀河の回転曲線等の天文学的観測から示唆され、最近の CMB データなどからその存在量までもが正確に見積もられるに至っている（2.1 節）。ダークマターは素粒子の標準模型にはない未知の素粒子からなると考えられており、その正体の解明は宇宙物理学のみならず素粒子物理学にとっても極めて重要である。ダークマター粒子の候補としては、素粒子物理学の超対称性理論がその存在を予測する粒子やアクシオン等があり、これらを直接検出しようとする実験が世界的にしのぎを削っている。日本でも超対称

性ダークマター粒子の直接検出に向けた本格的な実験が始まっている。

ダークマター粒子の検出には直接検出と間接検出がある。直接検出はダークマター粒子と検出器物質との弾性散乱を直接測定するものである。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、検出が期待できる。一方、間接検出は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・反陽電子等を観測するものである。間接検出は直接検出では探査できない種類のダークマター候補粒子までも特定でき、その空間分布までも明らかにする可能性を持っている。ガンマ線天文学、ニュートリノ天文学、粒子線天文学など、天文学の広がり、ダークマター粒子検出という素粒子物理学的にも大きなインパクトをもたらす可能性を秘めている。

2.9 新たな天文学の窓 2：重力波

重力の基礎理論であるアインシュタインの一般相対論によれば、天体が存在すると時間と空間(時空)が曲がることで必然的に重力が生じる。特に天体の密度が高ければ高いほど時空がより強く曲がるため、ブラックホールや中性子星など高密度天体の周りの重力は特に強い。さらにこれらの天体が加速度運動すると時空の曲率に変化し、その履歴としてわずかな歪みが光速で周りに伝わる。この時空のさざなみが重力波である。重力波はアインシュタインによってその存在が予言され、ハルスとテイラーによる連星中性子星の観測によって存在が間接的に証明された。しかしながら、未だ直接検出には成功していない。

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つながる大きな可能性を秘めているのである。特に、重力波は物質との相互作用が極めて弱いため、逆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 世紀の最大のフロンティアの一つといえる。

強い重力波の発生には、大きな曲率を持つ時空の高速変動が必要になる。たとえば、ブラックホール同士あるいは中性子星同士の合体は条件を満たすので、強力な重力波源となる。しかしこのような現象はさほど頻繁には起らないため、その検出には遠宇宙を観測することが不可欠だ。重力波の振幅は距離に反比例して減少するため、地球に到達する重力波の振幅は一般には微小である。しかも重力波は、物質との相互作用が微弱である。これらの理由のため、重力波の直接検出は困難を極める。しかし検出し難いことは、逆に利点でもある。電磁波は検出し易いので様々な天体の観測に用いられるが、相互作用が強過ぎる弊害もある。例えば、大質量星の重力崩壊およびそれに伴う超新星爆発を考えよう。この現象を電磁波で観測する場合、観測可能なのは高速で広がる爆発面の外側だけである。その内側の強重力場の様子を電磁波で直接探ることは不可能である。内部から来る電磁波は途中でガスと相互作用するため、発生した時点とは様相が変わってしまうからである。

つまり、物質が密に存在するような天体現象の深部は直接電磁波で観測することはできない。これに対して、重力波は物質との相互作用が極めて弱いので、高密度天体深部の直接観測に適している。さらに、電磁波を放射しない天体を見つけるのにも役立つ。例えば、ブラックホール同士の連星からは重力波は放射されるが、電磁波は放射されない。このように重力波は、電磁波では未発見の新たな種族の天体を発見し観測する有力手段を提供する。予想される代表的な重力波源はブラックホールや中性子星からなる連星の合体だが、このような現象は未だ観測されたことがなく、重力波を検出することによって初めて観測可能になる。

2.9.1 地上直接検出実験

重力波を直接検出するために、現在世界数ヶ国において、キロメートルサイズのレーザー干渉計型検出器が稼働中である。これらは約 10Hz～数 kHz の重力波を検出する検出器で、特に連星ブラックホールや連星中性子星の合体による重力波を検出するのに適している。21 世紀に入ってから順調に感度を上げ続けており、今後も感度の向上が計画されている。これらとは相補的な方法として、宇宙マイクロ波背景輻射の偏光観測（3.2 節）を通じて、宇宙初期に発生した背景重力波を検出する可能性も真剣に検討されている。その結果、2010 年代後半には重力波の直接検出が成功し、その後の本格的定常観測によって重力波天文学が始まるものと予想される。

今や、中性子星やブラックホールの発見自体は、天文学においてはさほど目新しくはない（2.3 節）。すでに中性子星は約 1800 個、星質量のブラックホールとその候補は約 40 個発見されているからである。しかしながら、それらの性質は十分に理解されているとはいえない。例えば、質量が正確に分かっている中性子星はわずか 20 個程度でしかない。ブラックホールに至っては、その多くの質量が太陽の 3～20 倍ということしか分かっておらず、精度良く決まっているものは無い。重力波が検出されると、連星の個々の質量や角運動量を定めることができる。多数の連星が観測されれば、中性子星やブラックホールの質量や角運動量の分布までも決まり、その性質や起源の解明が飛躍的に進むはずである。また重力波はブラックホール近傍からも伝播するので、その特徴からブラックホールの直接証拠を捕えることができる。さらに重力波とガンマ線を同時に観測できれば、連星中性子星やブラックホール・中性子星連星が、正体不明の天体現象であるガンマ線バースト源かどうか決定できる可能性もある（2.5 節）。

2.9.2 人工衛星による次世代検出計画

現在、人工衛星を用いた次世代の重力波検出計画が提案されており、周波数約 1mHz～100mHz 帯の重力波を捕える検出器の打ち上げが真剣に検討されている。その最も有力な重力波源が、質量が太陽の百万～千万倍の超巨大質量ブラックホール(SMBH)同士の合体である。SMBH の形成や合体は銀河形成期に起こると考えられているので、合体現象を

観測することにより、SMBH の起源および銀河形成史に関する有力な情報が得られるであろう。深宇宙を調べる新たな目としての活躍が期待される。

2.10 コンピュータシミュレーション

本章では天文学・宇宙物理学のいくつかの分野ごとにそれらがめざすべき科学的ゴールを俯瞰的に解説してきた。次章以降では、それらを実際に達成するための観測プロジェクトという視点からの議論が続く。その前に、それらをつなぐための重要な研究手法であるコンピュータシミュレーションについて、特にこの節で付け加えておく。

宇宙の諸現象を実験室スケールで再現し検証することはほとんどの場合不可能である。このために、宇宙物理学と他の物理学の間には、その方法論において本質的な差異が生ずる。もちろん、天体諸現象をその基礎的な物理過程に分割し、それらを個々に実験室レベルで検証することが可能な場合もある。しかしながら、およそ地上では達成が困難であるような高温高密度のような極限状態、まさに宇宙論的な時間スケールでゆっくりと進行する現象、あるいは複雑な多体現象の結果として初めて発現し要素分割的な方法論が有効でない現象など、地上実験になじまない天体現象のほうが圧倒的に多いことは間違いない。むしろそのことが天文学・宇宙物理学の魅力の一つであると言っても良い。

そのため宇宙物理学においては他の物理諸分野以上に、コンピュータシミュレーションの果たす役割は大きい。実際、本章で述べたすべての節において、コンピュータシミュレーションによる発見・解明は本質的な役割を果たしてきた。将来的にもその役割はますます重要になるはずである。そしてその結果は、天体現象を理論により深く理解するというだけにとどまることなく、それを具体的に検証する可能性を定量的に明らかにすると共に、そのために必要な観測装置はどのようなものであるかを示唆する事が出来る。このような視点を通じてコンピュータシミュレーションは、本書の後の章で議論される様々な観測プロジェクトを先導する役割を果たすことを忘れてはなるまい。基礎的な理論研究とより現実的な観測研究を融合させるのがコンピュータシミュレーションなのである。

近年の計算機の能力の長足の進歩によって、かつては特定の研究機関だけに存在したスーパーコンピュータによってのみ可能であったような大規模計算が、いまや個人のパーソナルコンピュータあるいは研究室レベルでの計算機クラスターでも十分可能となってきた。しかしながら常にその時点でトップレベルの計算機資源を要求する挑戦的課題もまだ多く残されている。

具体的には、第一原理的手法を取り入れた宇宙初期での星やブラックホールの形成、現実的な宇宙論的初期条件を設定した銀河形成、さらには個々の星を分解し、形態の進化を直接表現できる銀河形成シミュレーションなどは天文学における重要課題であり、今後の計算機能力の向上によって達成されると期待されている。最近の研究の進展により達成への道筋がようやく示されたものもある。輻射とニュートリノの輸送機構を取り入れた空間 3 次元での超新星爆発シミュレーションや輻射流体力学計算による降着円盤の進化、一般相

対性理論に基づくブラックホール合体シミュレーションなどはまさにそのような例である。また原始惑星系円盤の進化と複数の惑星の相互作用を直接追うことのできる惑星形成シミュレーションは計算能力の飛躍的向上によって初めて可能となる。

ここで挙げた例はいずれも次世代の観測計画における主要な科学的ゴールと密接な関係にある。その現実的な成功のためには大規模シミュレーションを用いた研究は必須である。これらの多くはもはや個人のレベルでは達成不可能なものも多く、ある程度の人数を集めたプロジェクト的な研究スタイルを持ち込むことも重要であり、すでにそのような方向でいくつかの研究は進められている。計算コード開発からシミュレーション結果の観測との直接比較までを見据えた、長期的な取り組みも必要となるだろう。

第3章 現代の宇宙観測と未来を目指す長期計画

現代の天文学・宇宙物理学は「ビッグ・サイエンス」の一つに数えられるようになった。これからの天文学・宇宙物理学においても、さまざまな謎や課題の解決のためには新しい観測装置の実現が必須である。社会の注目、国際的な競争と協力の中でそうした目的を達成していくためには、コミュニティとしての長期計画の真剣な検討と厳しい議論が重要である。本分科会はそうした見地に立ち、分科会審議や公開討論を通して具体的な装置計画の議論を進めてきた。この第3章では提案された観測計画の主なものを紹介し、次の第4章で特に当面早急に実現すべき大型計画に絞って詳細に記述することにする。

なお、そのほかの提案や萌芽的计划も含めて、表、及び2回にわたって開催した「天文学・宇宙物理学長期計画公開シンポジウム」目次をまとめて提示するので、参照されたい。

また1.1.4（本報告で取りまとめた計画・分野の範囲について）でやや詳しく述べたように、第3章で取り上げた計画の範囲は2回の公開シンポジウムで発表された計画を基礎とし、進行中の計画や科研費レベルで推進すべき規模の計画は基本的に対象としていない。一定の準備が進んでいる大規模計画（例えばスペースの計画の場合はISASでワーキンググループ（3.2.3の(5)参照）が組織されている中・大型計画）を中心とした。従って、本報告に記載されていない小規模の計画の中にも優れたものが多数存在することはもちろんである。本文ですべての計画の網羅はできなかったが、分野ごとの計画リストと添付の公開シンポジウムプログラムで広く眼に触れるようにした。分野については当然天文学・宇宙物理学コミュニティからの提案が主体だが、素粒子物理学、地球惑星科学など交流・共同が進む分野には、コミュニティの電子メーリングリストなどを通じて広く計画の提案を呼びかけた。この章にもその結果がかなりの程度反映されているが、将来はさらに包括的な検討が必要になっていくだろう。

3.1 宇宙観測の発展と現状

人間は古代から、宇宙からの可視光を肉眼で観察し天体の運行の規則性を学んで、最初の科学である天文学を打ち立てた。1609年にはじめて宇宙観測に用いられた望遠鏡は、裸眼では見えなかった奥深い宇宙の存在を明らかにし、人間の宇宙観を劇的に転換させることになった。実際、望遠鏡の進歩とともに人間の宇宙は急速に広がったのである。宇宙探求の歴史を通して、新しい観測手段が導入されるたびに新たな発見があり、新たな宇宙と新たな謎が浮かび上がり、人間の宇宙は莫大なものに広がった。新たな観測装置の計画は、宇宙の理解を進める上での基本的な駆動力である。

現代の天文学・宇宙物理学において最前線を切り拓く計画は、技術的・専門的な蓄積の上に立って新しい観測手段や研究手法を開発することが基本であり、大規模な計画は電磁波の波長や粒子、また太陽や銀河など目的ごとの研究者コミュニティを基盤に検討・立案

される。本章で日本の天文学・宇宙物理学が構想する諸計画を紹介するにあたり、上記の事情を踏まえて、まず現代の宇宙観測の手段について概観し、次の項では長期計画の基礎となる各分野の研究体制と分野コミュニティー等の現状を述べておこう。

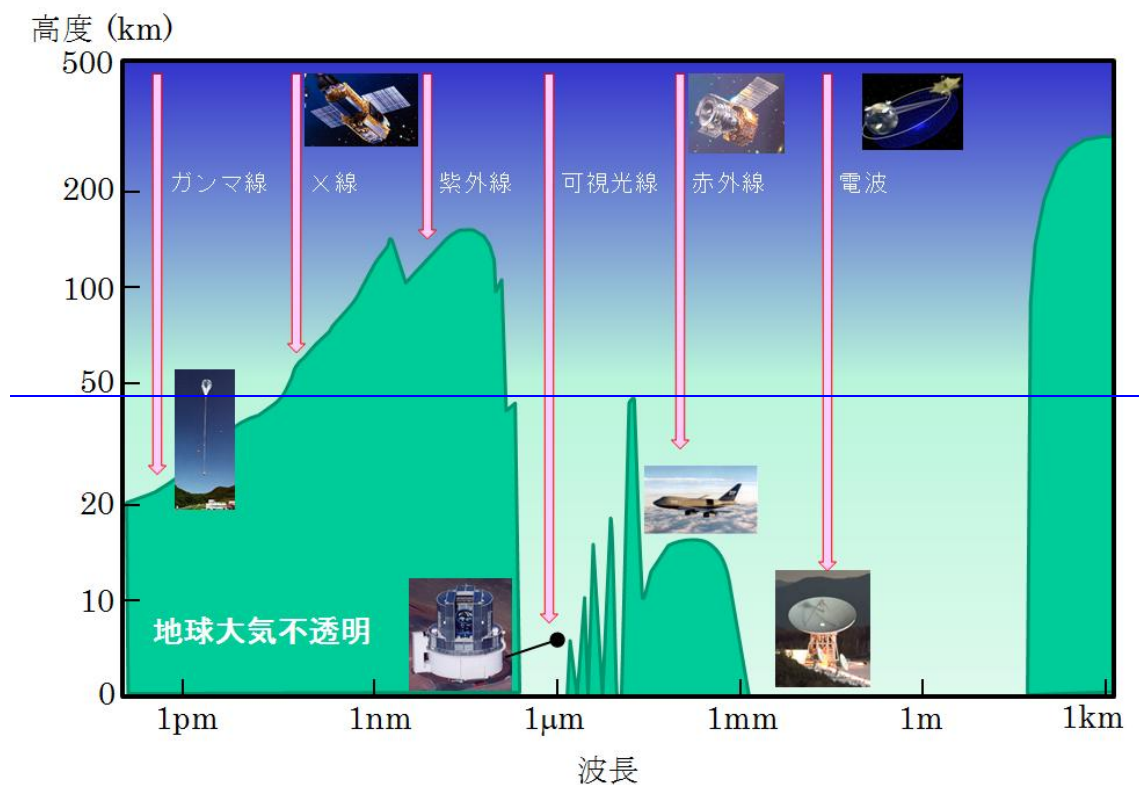
3.1.1 電磁波による宇宙の観測の発展

19 世紀から始まった近代科学、特に物理学の急速な発展は、望遠鏡による宇宙の可視光観測に革命的な進展をもたらした。特に天体写真術の導入、電磁波理論の成立、分光学と熱統計力学による天体の物理的・化学的性質の解明、さらに原子物理学などの成立で「天体物理学」が花開き、1929 年の宇宙膨張の発見に用いられたウィルソン山天文台の 2.5m 望遠鏡に象徴される、巨大な可視光望遠鏡が活躍するようになった。

1931 年の宇宙からの電波の発見を受けて、20 世紀半ばから電波の観測が急速に発展し、宇宙の低温ガス成分や高エネルギー現象など、可視光では知ることができなかった宇宙の姿が見られるようになった。電波観測は電波望遠鏡の大型化とともに干渉計の技術を発展させ、可視光観測と並んで地上からの宇宙観測の柱を形成するに至っている。また 20 世紀後半には、半導体を基礎として赤外線検出技術が進み、現在では可視光と同様な検出レベルを達成している。地上観測では可視光と近赤外線とともに電子検出の時代に入り、両者は技術的にもほぼ融合を遂げるに至っている。

20 世紀後半からはまた、ロケット・人工衛星技術の発達により大気圏外の宇宙空間（スペース）からの天文観測が進み、大気による吸収のため地上では観測できなかった高エネルギー電磁波である X 線やガンマ線を用いて、激しく変動する宇宙の諸現象が観測されるようになった。やはり地上まで届かない長波長赤外線の大気圏外観測では、星形成などの観測が画期的に進んだ。

21 世紀初頭の現在、宇宙の観測は上記のようにほぼ電磁波の全波長域に及んでおり、各波長のエネルギーと特性に応じて、極低温から超高温、真空に近い希薄から超高密度、惑星やコンパクト天体から膨張する宇宙の全域で展開される多彩な宇宙現象の観測と解明を、分担・協力する形で進めている。その中で日本は多くの観測分野において高い研究水準と成果を挙げており、多岐にわたる国際共同が進む天文学・宇宙物理学において、トップグループに位置しているといえることができる。



電磁波の透過度の波長依存性：波長ごとに、どれだけの高度まで透過してこられるかを示している。

3.1.2 高エネルギー粒子・重力波による宇宙観測

20 世紀初頭に、宇宙線とよばれる高エネルギーの粒子が宇宙から地球に降り注いでいることが発見され、高エネルギー物理学の端緒が開かれるとともに、新しい宇宙の観測手段として注目された。宇宙線の多くが電荷を帯びていることや大気との相互作用などから宇宙の観測という面での進展は遅かったが、電荷を持たないニュートリノの太陽からの検出に続き、1987 年には超新星爆発に伴うニュートリノが検出された。現在、宇宙線技術を用いたダークマターの直接検出も試みられている。また宇宙線の空気シャワー現象を超高エネルギーガンマ線の観測に応用するなど、宇宙の観測に新たな発展が生まれている。

一般相対性理論が予言する重力波は、極めてわずかな空間のゆがみを検出する技術的困難があったが、日本・欧米で精力的な技術開発や実証実験が進み、実際の検出が間近というところまで来ている。それによって開ける重力波天文学は、ブラックホール周辺や宇宙初期における時空構造の変動をじかに観測するなど、宇宙の理解に全く新しい観測手段をもたらすと期待されている。

3.1.3 無人探査機による太陽系探査

1960年代から始まった無人探査機による太陽系探査が、目覚ましい進展を見せている。地球周回軌道から月、太陽系諸惑星にまで、高性能カメラをはじめさまざまな計測装置を送り込んで、詳細な「その場」観測ができるようになった。とりわけ地上からの観測ではどんな望遠鏡でも不可能だった惑星や衛星の詳しい地形、地殻の組成と活動、大気と気象、重力や磁場、過去の歴史に至るまでの理解が得られつつあることは画期的で、惑星・衛星を含めて高温から極低温にいたるさまざまな太陽系環境において、地球とは似て非なる火山や地殻の活動が展開されていることが把握された。それらとの比較において地球そのものの理解も飛躍的に進み、比較惑星学という新しい分野の中で地球が位置づけられつつあることは、特筆すべきである。

3.2 日本における長期計画の基盤と方向性

この項では、3.3以降で述べる個別の装置計画の推進の前提となっているわが国の天文学・宇宙物理学研究分野の研究組織・研究者コミュニティの状況、および長期計画の立案において重要な基本的課題等について、その概要を述べる。

3.2.1 天文学・宇宙物理学分野の共同利用体制

現代の天文学・宇宙物理学の中核を担う先端的大型観測装置は、予算的にも組織的にも、大学の研究室・学部レベルで実施できる規模を超えるようになった。この種の中核装置では、大型化・高度化に加え、世界規模の共同利用、継続的な技術開発、国際共同の緊密化や得られたデータの国際的公開への対応など、装置周辺にしっかりした共通設備・支援組織の整備が求められることも、大学レベルでの運用を困難にしている。そこで、中核的観測装置の建設や運用は分野の研究者に開かれた中核的研究機関が担い、大学等の研究者がそれを利用して観測や実験を行うのが効果的である。共同利用研究所、とりわけ大学から独立した大学共同利用機関は、そのような考え方に基づいてわが国が独自に形成してきた研究組織である。天文学・宇宙物理学分野でも、1980年代から大学共同利用の機能を持つ以下3つの中核機関が順次整備され、それぞれの分野コミュニティの参加と付託のもとで中核的な大型観測装置の建設と運用を担い、共同利用・共同研究の場を構築して大学等の広範な研究者が研究・実験・観測等を行なうシステムが確立されている。

◆国立天文台（大学共同利用機関法人・自然科学研究機構（NINS）所属）

可視光・近赤外線、電波など地上から観測可能な電磁波の観測の中心となっているのが、自然科学研究機構の大学共同利用機関・国立天文台である。野辺山宇宙電波観測所やハワイのすばる望遠鏡、チリの国際共同電波干渉計アルマなどの建設運用と、VERAや大型計算機をはじめ多くの装置・観測所の共同利用を担っている。

◆宇宙科学研究本部（独立行政法人・宇宙航空研究開発機構（JAXA）所属）

長波長の赤外線、紫外線、X線・ガンマ線など、地上では大気の吸収で観測できない波長域の電磁波の宇宙空間（スペース）に打ち上げた望遠鏡からの観測や、無人探査機によ

る地球近傍・惑星・太陽系諸天体の探査・研究、そのための開発と打ち上げなど、スペースにおけるサイエンスの共同利用運用全般を担っている。

◆東京大学宇宙線研究所（東京大学付置全国共同利用研究所）

大学所属の全国共同利用研究所として、宇宙から到来する高エネルギー粒子や重力波の検出のための開発と観測、それらを用いた物理学的研究の中心となり、大学附置ではあるが分野コミュニティの中核としての役割を果たしている。

わが国の天文学・宇宙物理学の大型計画は、上記3つの機関が中核となり、分野コミュニティの意向を尊重しつつ相互に密接に協力し、また全国の大学の多くの研究者や関連研究機関と協力して進められる。3機関の役割を中心に、今後の長期的計画の遂行の枠組みを以下にまとめる。

3.2.2 地上からの電磁波観測分野

地上からの電磁波観測は、長い歴史のある可視光観測に1980年代から波長がやや短い近赤外線観測が加わった光赤外線天文学が、一つの柱である。日本ではすばる望遠鏡（2000年完成）で、世界の第一線に立った。また20世紀半ばにスタートし、日本では野辺山宇宙電波観測所（1982年完成）を中心に波長が短いミリ波や超長基線電波干渉計 VLBI で大きく発展し世界水準の活動を進めている電波天文学が、もう一つの柱である。それに加えて、対象を太陽に限った太陽物理学があり、これも日本では長い歴史と新たな発展がある。

(1) 地上からの宇宙観測： 観測サイトと国際共同、技術開発

地上設置の望遠鏡の宿命として、大気の影響は避けられない。その影響の軽減には観測装置のサイトが重要で、適地は国内に限らない。特にハワイ（マウナケア、ハレヤカラ山頂）、カナリー諸島、チリ高地が宇宙観測の三大最適地とされるが、観測波長によっては中国・インド奥地、オーストラリア西海岸、南アフリカなども比較的良好なサイトであり、近赤外線やサブミリ波では南極高地が地上最後の好サイトと考えられている。今後の高度な観測装置計画では、国外好適サイトの選択は必須である。だが研究者や技術開発の利便性、学生・院生教育への活用の観点からは、国内設置の観測装置も依然として重要である。

野辺山やヨーロッパの IRAM などミリ波望遠鏡の次世代として世界共同のアルマが建設され、すばる望遠鏡やアメリカの Keck 望遠鏡など 8-10m 望遠鏡の次に 30m クラスの望遠鏡（TMT など）が検討されているように、宇宙観測の中心である望遠鏡の大型化は、宇宙の理解の推進に今後も欠かせない。巨大化する建設や観測運用の経費を国際共同で担い、得られる科学的成果を世界で最大限に活用してゆくことが、今後の大型計画では必要である。

その一方、大型望遠鏡の観測には焦点に取り付けて電磁波を取り込み分析する多くの付属設備が必要で、その常なる開発と更新は極めて重要である。電波観測のイメージ撮像（電波カメラ）、テラヘルツ帯など新波長域の観測装置開発、光赤外線分野のマルチレーザー星 AO

など補償光学装置の展開、超広視野分光器や太陽系外惑星観測の高感度化など、望遠鏡本体に取り付けて新しいブレークスルーや発見をもたらすチャレンジングな装置開発の計画は、数多い。我が国の天文学の発展のためには、こうした付属観測装置の不断の開発研究が不可欠である。

地上からの観測で最大の問題は大気による像の揺らぎや吸収である。その点で最高のサイトは大気圏外、すなわち宇宙空間（スペース）であり、可視光・近赤外線ハッブル望遠鏡の成功が示すように、地上で観測可能な波長においても大気揺らぎのないスペースからの観測の魅力は大きい。しかしながら可視光、赤外線、電波分野の地上観測のメリットは、スペースからの観測に対して以下に列挙するように非常に大きい。

- ① 巨大な望遠鏡や長基線の干渉計の建設が可能（集光力・空間分解能の確保）
- ② 重量当たりの建設単価が格段に小さい
- ③ 望遠鏡の運用期間が20年～30年以上と、長くとれる
- ④ 望遠鏡本体、及び、観測装置の取り替え・修理が常時可能である
- ⑤ 最先端技術の導入が可能である（スペースでは時間をかけて確立した技術に限定）

地上観測では世界的にも多くの長期的大型計画が練られており、その基本的重要性が揺らぐことは当面ないが、スペースへの進出とその技術が高まるにつれ、光赤外、電波、太陽物理分野でのさらなるスペースからの観測の検討が大いに進むと予想される。宇宙の理解の前進のために地上・スペースそれぞれのメリットを活かし、相補的に活用して、天文学・宇宙物理学分野の長期的な発展を展望することが大切である。

(2) 大学共同利用機関： 国立天文台とその役割

現代天文学においては遠方の天体や微かな光を観測するために望遠鏡の大型化が進み、最先端の観測装置の建設や運営は、ビッグサイエンスと位置づけられるようになった。大型望遠鏡やその共同利用は一大学での建設・維持・運営は困難で、1988年に東京大学東京天文台、名古屋大学空電研究所の一部、および水沢緯度観測所の合併により、大学共同利用機関・国立天文台が、わが国の天文学の中核的研究機関として設立された。国立天文台はその後、すばる望遠鏡やVERAなど大型の観測装置の建設に成功し、大学などの研究者の共同利用・共同運営による世界トップクラスの成果により第一線の国際的研究機関として高い評価を得ている。現在共同利用中の大型観測装置は、設立以前から本格的共同利用を行っていた野辺山宇宙電波観測所の45m電波望遠鏡をはじめ、すばる望遠鏡（ハワイ観測所）、VERA望遠鏡（水沢VERA観測所）、電波ヘリオグラフ（野辺山太陽電波観測所）、188cm光赤外線望遠鏡（岡山天体物理観測所）などがあり、新たな大型観測装置として国際共同のアルマ望遠鏡を南米チリで建設中である。これら大型観測装置の多くはそれぞれの分野においてトップレベルであり、我が国の観測天文学は世界の最高水準にあるといえる。国立天文台は、日本独自のシステムである大学共同利用機関として、その機能と責務を確実に果たしてきたと言える。

国立天文台の観測装置は当初は国内を中心に展開されたが、1999 年度に完成したハワイ島マウナケア山頂の 8.2m すばる望遠鏡は、わが国初の国外設置の大型学術施設として海外適地での観測活動に先鞭をつけた。チリのアルマ望遠鏡では日・米・欧の 3 極合同建設という高レベルの共同建設を進め、技術面を含めて国際的にリードをしている。運営も 3 者が合同で進める予定である。30m 大型光学赤外線望遠鏡計画（TMT 後述）や次世代電波望遠鏡（SKA 後述）など今後の長期構想においても、海外適地での国際共同建設が予想されている。

(3) 大学の役割

科学における大学の大きな役割は、最先端の研究の推進とその成果に基づいた教育、人材育成である。天文学・宇宙物理学分野では、観測および理論の両分野において国際的に高い研究成果を達成していることをなどから、大学で天文学を志望研究する学部学生や大学院生、若手研究者が増え、天文学の教育・研究指導の要望も増加している。このような動きを受け、いくつかの大学では特色ある研究や教育を目的として自前の望遠鏡の建設を進め、実現してきた。その多くは中小望遠鏡だが、それらが果たす役割は以下のように、大きなものがある。

- ① 自前の望遠鏡を持つことで観測実習・装置開発など教育的効果が飛躍的に高まる。
- ② 小さくとも特定の目的に集中した観測が可能で、掃天観測などによる研究に威力。
- ③ 自前の望遠鏡なので、変光星観測、系外惑星探査など長時間の継続的観測が可能。
- ④ ガンマ線バースト、超新星など突発天体現象の機敏な観測協力に対応できる。
- ⑤ 大学独自のユニークな技術開発が可能。

光赤外線分野では、東京大学、東京工業大学、名古屋大学、京都大学、広島大学、鹿児島大学、北海道大学などが自前の望遠鏡を観測運用しており、京都大学は国立天文台と協力して 3.8m 新技術望遠鏡を建設している。電波分野では、光ファイバー網を活用して北海道大学、茨城大学、つくば大学、岐阜大学、山口大学、鹿児島大学で大学間連携研究（後述）を含めた教育研究活動を推進中であり、日本全国・東アジアを結ぶ VLBI ネットワーク（後述）に発展している。他大学の研究者や学生にも様々な形態で観測時間を提供するなど、大学間共同が進んでいる。また観測による研究・教育だけでなく、観測装置の開発を大学で推進することは日本の天文学の発展のために極めて重要で、すばる望遠鏡の観測装置やアルマの受信機開発では東北大学、茨城大学、東京大学、京都大学、大阪府立大学などが、優れた共同開発の成果を残している。

また、大学も海外の適地に望遠鏡を設置し、優れた観測成果をあげている。東京大学、名古屋大学では、科研費など様々な経費を活用してチリ、ハワイ、南アフリカ、ニュージーランド等で望遠鏡を運用してきた。今後は海外の観測拠点を活用する計画がさらに広がると期待されるとともに、筑波大学や東北大学は南極高地をサイトとする計画を検討中である。

(4) 大学・研究所間の連携協力事業の展開

電波観測分野の VLBI（超長基線電波干渉計）は、非常に長い基線長と多くの電波望遠鏡のネットワークを必要とする。このため、大学が所有する電波望遠鏡や運用を大学に依頼している国立天文台の電波望遠鏡を用いて、国内 VLBI 観測ネットワークを光ファイバを活用しつつ構築し、参加大学及び国立天文台で組織するコンソーシアムの運用によって超高空間分解能の観測を進めている。韓国や中国も含めた東アジアネットワークについても、実験中である。国内では北海道大学、茨城大学、筑波大学、岐阜大学、山口大学、鹿児島大学および国立天文台や JAXA 宇宙科学本部などの研究機関が参加し、運営経費は国立天文台が大学連携経費として各大学に委託事業として配分する大学間連携方式である。この形態は新しい共同利用・共同研究のあり方として今後さらに推進されよう。

光赤外線観測の分野でも、大学所有の中小望遠鏡と国立天文台の岡山天体物理観測所の望遠鏡などを含めた観測ネットワークによる連携を推進中である。さらに中国や韓国、台湾の中型望遠鏡でネットワークを組み、突発天体の研究、太陽系外惑星の探査等の研究を効率的に研究する組織作りの試みを模索し、一部実行されている。大学連合を含めた連携研究事業は海外でも成果をあげており、今後大いに推進されるべきである。

(5) 国際的連携計画

すでに述べてきたように国立天文台が中心となって進める国際的連携には、アルマ（欧米との共同建設・共同運用）、VERA を中心とした東アジア VLBI ネットワーク、岡山天体物理観測所と東アジア各国の望遠鏡の連携、すばる望遠鏡などマウナケアの望遠鏡間観測協力などがある。大学独自でも本格的な国際的協力が始まっている。

今後の天文学・宇宙物理学においてはさらなる国際連携は必須で、海外の観測装置の設置サイト、国際協力による天文学の発展、我が国の天文学が果たすべき国際的責任からも、強力に取り組んでゆくべき課題である。とりわけ次世代の大型光学望遠鏡計画（TMT など）や、宇宙の創生直後の観測などを目指す電波天文学分野の大型計画である SKA 計画などは、大規模な国際協力事業となる。大型計画でなくても、すばる望遠鏡にとりつける次世代観測装置 HSC（Hyper Suprime Cam）やダークエネルギーの解明計画などは、米国、台湾などの国際協力事業として展開が検討されている。

国際連携計画では、我が国の天文学の実績に基づき技術面でも科学面においてもリーダーシップを発揮できる形で推進することが肝要である。またそれは、国際コミュニティが我が国に期待し、我が国が果たして行くべき役割と責任でもある。

(6) スペースミッションとの連携

国立天文台と JAXA 宇宙科学研究本部（旧宇宙科学研究所）とは、人的交流も含め、特に太陽観測衛星などで密接な共同を進めてきた。最近では世界最初のスペース VLBI 衛星

となった「はるか」、わが国最初のスペース可視光望遠鏡となった太陽観測衛星「ひので」での緊密な共同による大きな成果がある。

また現在進行中の ASTRO-G (VSOP-2) 計画でも、「はるか」の場合と同様、スペース VLBI の基本として衛星望遠鏡と地上望遠鏡の連携が必須である。フェルミ・ガンマ線宇宙望遠鏡とのフォローアップ観測での連携などもあり、個別の観測装置の開発・製作の共同だけでなく、打ち上げられたスペースミッションと地上観測との連携は、今後もいっそう期待される重要な将来要素である。

3.2.3 宇宙空間（スペース）からの電磁波観測

わが国における宇宙科学【宇宙空間（スペース）を利用しあるいは対象とした科学研究を総称】は、大学・研究機関との密接な連携のもとで、旧・大学共同利用機関宇宙科学研究所、現・宇宙航空研究開発機構（JAXA）宇宙科学研究本部（以下、ISAS と略す）を中心として推進され、世界トップレベルの研究成果を達成してきた。

(1) 宇宙空間を利用した天文学・宇宙物理学研究、太陽系科学、月・惑星探査

1950 年代から気球・ロケット・人工衛星などの技術が発達した結果、ほぼすべての電磁波領域で宇宙を観測できるようになった。宇宙から到来する電磁波の多くは地球を包む厚い大気に散乱されたり吸収されたりし、地表に届く電磁波は可視光、短波長の赤外線、そして電波に限られるからである。「はくちょう」・「てんま」・「ぎんが」・「あすか」・「すざく」と続くエックス線衛星のシリーズ、「ひのとり」・「ようこう」「ひので」による太陽エックス線観測、赤外線衛星「あかり」がそれであり、ユニークな観測装置を搭載することで世界に誇れる成果を上げてきた。地表で観測可能な電磁波についても、「ひので」の可視光望遠鏡のように宇宙空間に持ち出すことで大気の揺らぎの影響をなくして精細な画像が取得できる。さらに「はるか」では電波アンテナを宇宙空間に持ち出すことで超長基線干渉計（VLBI）の基線を地球サイズを超えて長くでき世界で初めて本格的なスペース VLBI 観測を成功させた。一方太陽系探査においては直接観測装置を送り込んで「その場」観測をする無人探査の技術により、太陽系諸天体の個別の理解が飛躍的に進み、地球や人類の位置、置かれている環境の理解が一新されつつある。宇宙から飛来する高エネルギー粒子（宇宙線）や重力波の検出でも、宇宙空間を利用することで新しい展開が図られようとしている。これらと並行して気球やロケットを用いた小回りのきく観測手段が、萌芽的研究や先進的装置開発に大きい成果を上げてきた。

(2) 大学と研究者コミュニティ、大学共同利用システムを基盤とする宇宙科学

(ア) 中核研究所としての「ISAS」

我が国の宇宙科学研究は、研究者コミュニティとともに限られた資源を活用しつつ、米欧の大型宇宙科学に伍して特徴のある科学衛星・探査機計画を実施し、着実に先進的な

成果をあげて国際的にも高い評価を獲得してきた歴史がある。宇宙空間を利用する研究は規模が大きく、1981年に東京大学宇宙航空研究所を母体に大学共同利用機関・宇宙科学研究所が設置され、2003年からは宇宙航空研究開発機構（JAXA）宇宙科学研究本部となって、「大学共同利用システム」の枠組みにより大学との連携や大学院教育を進めつつ、日本の宇宙科学の中核研究所として宇宙科学と共同利用を効果的に実施してきている。

（イ）宇宙基本法下の研究体制

2008年8月に宇宙基本法が新たに施行され、日本の宇宙開発体制の見直しが行なわれている。宇宙科学は、天文学・宇宙物理学、太陽系科学、地球惑星科学、宇宙工学、宇宙環境利用科学、さらに地球環境科学、生命科学などの広い学術分野に横断的にまたがる総合科学である。今後の宇宙科学はこのことを踏まえつつ、我が国が宇宙基本法下で環境・エネルギー・資源など人類的課題も含めて宇宙開発利用を格段に進めていく上で、その基盤を科学の面から広く支える役割を果たすであろう。そのためにも、宇宙の構造・進化を探究する宇宙研究、太陽系諸天体の観測と探査、地球環境の精査、宇宙空間利用の新しい可能性を生み出す宇宙工学研究など広い分野において、大学など広い研究者コミュニティを基盤とし、大学院生教育・人材育成への貢献を果たし、共同して研究活動と共同利用を進めてゆく体制の確立と発展が、JAXAには一層求められる。

（ウ）大学・研究所との共同・連携による成果

上記のJAXAを中心とする宇宙科学研究は国立天文台、宇宙線研究所などの大学共同利用研究機関・研究所、数多くの大学、政府系研究機関との密接な共同・連携を得ることで、成功裏に発展してきたといえる。スペース VLBI 衛星「はるか」、太陽観測衛星「ひので」は国立天文台との実質的共同プロジェクトであり、エックス線観測衛星「すざく」、赤外線観測衛星「あかり」などは大学が重要部分を開発・製作するなど、多くの大学・研究機関がJAXA・ISASと一体となってプロジェクトを成功させてきている。この緊密な国内共同研究体制が特に中型以上の衛星計画では必須であり、コミュニティの育成、基礎開発体制の充実、人的交流の推進などを含めた、当該分野全体の一体的な発展を推進することが求められる。また大気球、ロケット、小型衛星などを利用して、大学研究者が中心となった萌芽的、先進的研究がなされている。

（エ）新たな共同・連携関係の構築

国立大学の法人化、大型競争的研究費の実現、JAXA 月惑星探査プログラムグループの発足などを受けて、近年次のような動きが顕著になっている。(1)JAXA と大学との包括連携協定がすでに7件（2009年7月現在）締結されている。これは元々文部省に所属していたJAXA・ISASと大学等がそれぞれ独立した法人組織になった状況下においても、大学共同利用の枠組みを維持・拡充するとともに、宇宙開発利用におけるJAXAと大学とのさらに広い連携を作っていくことが主要な目的である。(2)太陽系天体の研究においては、「人類の活動領域の拡大」の政策的推進との共同が不可避である。これを実施する組織としてJAXAに月惑星探査プログラムグループが設置され、大学等の宇宙科学研究

者の参加の下で新たな計画の検討が進められつつある。(3)大学独自の研究プロジェクトが大型研究費によって実施できるようになった。たとえば大気球を利用したプロジェクトにおいては米、インド、ブラジルなど諸外国での打ち上げも重要な研究手段であり、JAXA による支援体制のさらなる整備が重要となっている。

(3) 宇宙空間を利用した科学観測・実験の手段

JAXA・ISAS は、大学共同利用システムに基づいて宇宙科学研究を推進するために、さまざまな科学観測・実験を行なう手段を以下のような規模に分類している。なお () 内は経費の概略規模である。

- ①大気球 (数 1000 万円)
- ②観測ロケット (数億円)
- ③外国の衛星計画等への参加 (数億～数 10 億円)
- ④国際宇宙ステーション与圧部実験 (数 1000 万円～数億円)
- ⑤国際宇宙ステーション曝露部実験 (数 10 億円)
- ⑥小型科学衛星 (打上げ費用を含み 70～80 億円)
- ⑦中型科学衛星 (打上げ費用を含み 250 億円程度)
- ⑧大型科学衛星 (打上げ費用を含み 500 億円程度以下)

それぞれに研究者コミュニティの主体的な関与の下で各種計画が実施されている。これらのうち①から④については、あらかじめ一定の予算を用意し、対応する委員会で提案を審査し、採択されたものを順次実施している。⑤から⑧に関しては、まず対応する委員会で個別に計画の提案を受けて審査し、通った計画については JAXA においてさらに技術面などの審査を行った上で、個別に予算要求している。中型・大型規模の計画 (⑦と⑧に相当) については、以下に述べる宇宙科学の長期計画に沿っていることが求められる。

(4) 基礎的研究開発の重要性

天文学・宇宙物理学の最前線を切り拓くためには、新たな宇宙の姿を見ることを可能にする新しい観測装置・観測手法の開拓・導入がたいへん重要である。そのような新しい装置・手法の開発には基礎からの積み上げが不可欠であり、大学・研究機関における萌芽的研究の支援強化が諮られ、それら基礎的研究開発の成果を実証して行く小規模実証プロジェクト実施機会の充実が諮られて、本格的観測プロジェクトに結びつく基礎的研究開発体制の整備が重要である。

宇宙空間を利用した観測の装置・手法の開発にあたっては、比較的小規模な実証プロジェクトを実施できることが重要で、特に、今後、数 10 日というような長期にわたって飛揚を続けるような大気球が現実のものとなれば、衛星とは異なる新たな観測の場が開かれることとなろう。また、比較的小さな予算・体制で実施できる小型科学衛星計画や、国際宇宙ステーション「きぼう」を用いた実験機会活用の充実が諮られて行くことも期待され

る。これらの実証を支え、ひいては基礎的研究を加速するための飛翔技術の開発をこれまでに以上に推進すべきである。

(5) スペース計画の進め方

各種目的の装置をスペースに持ち出して実験や観測を行うためには、人工衛星のような、各種装置が自立的・自律的に働き、地上とデータのやりとりができるための環境・システムの用意と、それをスペースに持ち出すためのロケットのような飛翔手段が必要となる。そのため、宇宙科学研究には、実験や観測のための装置の開発・製作に加えて、ロケットや衛星の周到な用意とその運用のための大がかりな設備・施設と人員体制・予算を必要とする。そして、大学等の研究者がそのような宇宙科学研究を行うことができるようにするために、JAXA・ISAS が置かれ、大学共同利用システムが用意されている。

衛星に搭載される装置は、ロケットが打上げられる際の過酷な振動・衝撃に耐え、さらに、地上を離れてからの、決して手直しがきかない世界に対し、十分な信頼性を持って、目的達成のために十分な性能を発揮できる必要がある。そのため、ISAS における科学衛星計画は、大きく、次の3つの段階に分けて進められる。

①ワーキンググループ段階

新しい科学成果をめざした基礎的な装置開発や、衛星計画のおおまかな検討は、まず、各研究分野の研究グループで進められる。そして、それぞれのグループが、それらの開発・検討があるレベルまで達したと判断した時、それぞれは、それぞれの目的に応じて、ISAS の宇宙理学委員会・宇宙工学委員会・宇宙環境利用科学委員会のいずれかに、ワーキンググループの設置を申し出る。そして、ワーキンググループ設置にあたっては、計画の意義、所定の年限（計画の規模により 2 年から 5 年程度を想定）内に次の段階に進める技術的・システムの目処、当該研究者グループの力量、関連研究者コミュニティの支持、等が審査される。

なお、これらの3つの委員会は、それぞれ、関係する研究分野を代表する研究者（ISAS 外からの研究者が半数強、ISAS 内からの研究者が半数弱）で構成されており、宇宙理学委員会は、天文学・太陽系科学・地球惑星科学等を、宇宙工学委員会は宇宙工学を、宇宙環境利用科学委員会は、微少重力や放射線といったスペースの特別な環境を利用した科学を所掌している。

設置を認められたワーキンググループには、次の段階に進むために必要な技術開発や衛星概念検討のための予算が用意され、競争的に配分される。

②プリプロジェクト段階

それぞれのワーキンググループは、必要な技術開発・衛星概念検討を進め、衛星計画として実行できる段階に来たと判断すると、それぞれ対応する委員会にプリプロジェクト段階に進む申し出をする。この段階に進むに当たっては、衛星計画の目的・意義・価値などの定義がなされ、また、衛星等のシステムが満たすべき要求条件が精査される。そして、

それらが、ISAS・JAXA として責任をもって実施できる段階にあると判断されると、プリプロジェクトとして認定される。そして、この段階でメーカー選定が行われ、開発計画の具体的設定が進められる。

③プロジェクト段階

プリプロジェクト段階での作業を通じ、衛星等のシステムへの要求が定義されて、しっかりした予算計画・人員体制の下でプロジェクトの実行ができると判断されると、軌道上運用まで視野に入れた衛星計画として予算要求がされ、プロジェクトとして動き出す。

(6) JAXA 宇宙科学長期計画

JAXA は、宇宙開発委員会によって作成された「宇宙開発に関する長期的な計画」の下で、5 年ごとに設定された中期目標・中期計画に従って、宇宙科学研究を含む宇宙航空研究開発を推進することとされている。

JAXA 第 2 期中期目標期間（2008 年度から 5 年間）のために、まず宇宙開発委員会によって「宇宙開発に関する長期的な計画」が見直され、それを元に JAXA の中期目標が設定された。そのうち宇宙科学に関しては、宇宙開発委員会計画部会のもとに宇宙科学ワーキンググループがおかれ、2008 年度から 10 年程度を見通した「宇宙科学研究の推進について」（報告）が 2006 年 12 月まとめられた。2013 年度から 5 年間の JAXA 第 3 期中期目標期間に向けては、あらためて宇宙科学長期計画の見直しが行なわれることになる。この際には再度、分野ごとの検討・議論を積み上げた上で長期計画をまとめることになるが、この日本学術会議報告「天文学・宇宙物理学の展望と長期計画」の示す方向はコミュニティの総意をまとめたものであり、検討の基本となるべきである。

上記「宇宙科学研究の推進について」（報告）は 2008 年度から 10 年程度を見通したもので、天文学・宇宙物理学においては

- ①宇宙空間からの宇宙物理学及び天文学
- ②太陽系探査科学

の 2 分野が推進すべきものとして取り上げられた。これらの分野の研究目標が次のように設定され、10 年程度以内に実現をめざす中型・大型規模計画について、目標の概要が以下のように記述された。

①宇宙空間からの宇宙物理学及び天文学の分野

宇宙空間環境を利用して地上で実施できない観測を行うことで、以下の目標を追及する。

- (1)宇宙の大規模構造とその成り立ちを解明し、ダークマター・ダークエネルギーを探る。
- (2)太陽系外惑星の直接観測により惑星の形成過程を探る。
- (3)宇宙の極限状態と非熱的エネルギー宇宙を探る。

これらの目標を達成するため、今後 5 年程度の間 X 線天文衛星「すざく」、赤外線天文衛星「あかり」による観測を継続する。さらに天文観測史上最高の解像度による電波観測を目指したスペース VLBI 衛星 ASTRO-G、史上初の硬エックス線反射鏡による撮像観

測とX線観測史上最高の分光観測の実現を目指すASTRO-Hの開発・運用を行なう。

さらに今後10年程度の間の実現を目指すものとして、次世代赤外線天文衛星計画(SPICA)が検討されており、世界的に大きい期待が寄せられている。また、次期エックス線国際天文衛星(IXO)の検討が大きな国際協力の下で進められている。これらはいずれも天文観測衛星としては従来にない規模であり、一層の体制の充実が求められる。

②太陽系探査科学の分野

太陽、地球、惑星、始原天体、太陽系空間環境を多様な手段で調査し、太陽系諸天体の構造と起源、惑星環境とその進化、宇宙の物理過程等を探るとともに、太陽系惑星における生命発生、存続の可能性及びその条件を解明する。人類の活動領域は地球近傍から拡大し、月・太陽系内へ拡がりつつある。宇宙探査の目的は、知の創造と人類の活動領域の拡大にあるが、その推進には先進的工学研究を含めて宇宙科学の知見が必須で、宇宙空間からの科学と宇宙探査活動の協調的発展を目指すことが必要である。

(1)太陽系諸天体の構造と起源を探る。

(2)太陽と地球・惑星環境を探る。

これらの目標の実現を目指し、今後5年程度の間、太陽観測衛星「ひので」による太陽観測を継続し、月探査機「かぐや」の観測データを詳細に解析し、小惑星探査機「はやぶさ」が持ち帰った小惑星物質を分析する。金星大気の高速循環の謎に挑む金星気象衛星Planet-Cの開発・運用、日欧協力により水星の磁場・磁気圏と固体表面の探査を初めて総合的に行なう水星探査機BepiColomboの開発を行なう。

さらに、今後10年程度の間の実現をめざして、「はやぶさ」後継機による小惑星探査・サンプルリターンや、「かぐや」後継機により月表面着陸を実現し月の起源・進化過程を解明する計画が検討されている。また、次期太陽観測衛星計画の検討が進められており、「ひので」の成功を受けてこの分野の研究をさらにリードすることが期待される。

(7) 国際共同・連携の重要性

宇宙空間利用は、そのほとんどが緊密な国際的共同なしには成り立たない。上述したISASの中型・大型規模のプロジェクトは、それぞれの分野の国際的コミュニティーにとっても重要であり、現行のすべてのプロジェクトにおいて国際的コミュニティーの議論の下で計画が練られ、搭載装置等の国際協力・役割分担がなされている。協力・役割分担の大規模なものは米国との共同ではNASA、欧州との共同ではESAを通じて行なわれているが、小さい規模では欧州各国やカナダ、アジアの国々と個別に協力が行なわれている。今後、天文学・宇宙物理学分野では、宇宙空間を利用した大型計画の比重が増すと予想されるため、世界の知恵・技術を集約する点でも、また必要な費用の規模からも、国際的に共同して大きな計画を作り上げることがますます重要になると考えられる。

3.2.4 宇宙線、ニュートリノ、重力波

20 世紀後半に、電波、X線など可視光とは波長領域が異なる電磁波を用いて宇宙を観測することで、星間物質、星の形成、銀河中心核、中性子星、ブラックホールなど新しい宇宙の研究が大きく進展した。「宇宙を見る新しい目」を得ることは、宇宙のより深い理解に不可欠である。近年ではダークマターの存在が確立し、全く予想外のダークエネルギーの発見と合わせて、宇宙の全エネルギーの約 95%は電磁波で観測できない未知の何かで占められていることが確かになった。

電磁波以外を用いた宇宙の観測として、宇宙線や重力波を用いる方法がある。宇宙線とは宇宙から地球に絶えず高速で降り注いでいる原子核や素粒子である。古典的には陽子やヘリウム、炭素や鉄などの原子核を指す。高エネルギーの光子であるガンマ線も「宇宙線」に含める。ニュートリノは本来の意味では宇宙線に属するが、その相互作用の小ささや我が国が観測において世界をリードしてきた経緯などから、宇宙線と区別して記述する。

宇宙線、ニュートリノ、そして重力波の観測を通して、電磁波では観測することのできない宇宙の未知の姿を捕らえることが期待される。例えば超新星爆発は大質量星が重力崩壊によって生じるが、この際に星の中心部で起きる現象の解明は、ニュートリノや重力波の観測で初めて可能になる。発見以来ほぼ 1 世紀になる宇宙線は、その最高エネルギーが約 10^{20} 電子ボルトと、人類が加速器で実現できるエネルギーより 7 桁も高い。しかし、その起源や加速のメカニズムはいまだ理解されておらず、その謎に迫る研究が進められている。ダークマターについても、様々な方法でその正体解明の研究が進められている。

これらの宇宙線、ニュートリノ、重力波などの観測は観測方法やエネルギーごとに特定の装置を用い、また観測方法に応じた適地があるため、世界中に装置が設置されることになる。日本でも観測研究は様々な形態で進められているが、それらの多くは、東京大学宇宙線研究所をホスト機関とした全国共同利用研究として推進されている。またこれらの研究計画の多くは国際共同研究である。将来予想される研究の一層の大型化に伴って、今後は日本主導の国際共同研究と、日本は主導国ではないが主体的に参加する国際共同研究の両方の形態をとると予想される。

この分野はなお発展中であるが、ここではあえて 2 つの研究分野に分け、それぞれの目的達成に必要な観測について述べる。

(1) 高エネルギー宇宙の研究： 宇宙線、ガンマ線観測

宇宙から飛来する高エネルギー粒子をさまざまな方法で観測し、宇宙線の起源や加速のメカニズムなどを解明することによって、高エネルギー宇宙についての知見を得ることがこの分野の主題である。近年、TeV (10^{12} eV) ガンマ線源が複数発見されるなど大きな進展があるものの、高エネルギー宇宙の全貌解明は、なおその途上にある。その解明のための将来計画としては、

- (a) 最高エネルギー宇宙線の観測研究
- (b) 高エネルギー宇宙線の観測研究

(c) GeV, TeV ガンマ線の観測研究

(d) 高エネルギーニュートリノの観測研究

などがあげられる。(a)最高エネルギー宇宙線観測研究の大きな目的は、理論的に予言されている GZK カットオフと呼ばれる宇宙線の最高エネルギーの存在の検証と、このような超高エネルギー（約 10^{20} 電子ボルト）まで粒子を加速する銀河系外の天体の同定、およびその加速機構の解明である。また(b)前者より少し（約 4 桁）低いが十分高いエネルギーを持つ高エネルギー宇宙線研究の将来計画では、Knee（ひざ）と呼ばれる宇宙線のスペクトルの折れ曲がり銀河系内宇宙線と系外宇宙線との起源が異なるためと考えられる証拠をつかむため、特に宇宙線中の核種の組成がエネルギーと共に変化するかどうかを確認することを目指している。しかしこれらの宇宙線を観測しても宇宙線が宇宙空間の磁場で曲げられてしまうので到来方向はわからず、加速天体の同定はできない。そこでガンマ線やニュートリノが宇宙空間を直進して飛来することを利用した、(c)GeV, TeV ガンマ線観測研究、及び(d)高エネルギーニュートリノ研究が重要になる。特に TeV 領域では近年大口径の反射鏡を用いた空気チェレンコフ観測装置が数多くの成果をあげ研究が急速に進んでいる。これを受け、次世代の TeV ガンマ線観測計画の検討が世界中で進んでいる。

なお上記 4 項目の研究は、それぞれ国際共同で研究計画が立案されている。

(2) ニュートリノ、重力波観測

1987 年に大マゼラン雲でおきた超新星爆発からのニュートリノの検出は、超新星爆発におけるニュートリノの大量発生を証明し、電磁波以外の方法での宇宙の観測の重要性を示した。またニュートリノ振動が発見され、太陽ニュートリノの観測を通して太陽中心部、すなわち星の核融合エネルギー生成理論の正しさが証明された。今後の研究としては、

(a) 宇宙ニュートリノの観測研究

(b) 地上における重力波の観測研究

(c) 宇宙空間における重力波の観測研究

(d) ダークマターの探索研究

などの計画がある。超新星を例に取れば、(a)精度の高いニュートリノ観測により、超新星中心部で中性子星が生成される際のダイナミクスを知ることができる。また(b)重力波の観測によって、重力崩壊のプロセスについて情報を得ることが期待される。このような観測が同時に実現 (a+b) されれば、重力波は光速で進むかどうか、といった物理学の根本的な重要情報を得ることができることも、忘れてはならない。(b)地上における重力波の観測では、連星中性子星が合体してブラックホールを形成する最も劇的な事象の観測が、まず期待されている。日本などの大型重力波計画の装置は、これらの事象が最低でも年間数回は確実に観測できるように立案されている。さらに、(c)重力波観測はその感度を究極的に高め、宇宙空間における重力波観測研究を実現できれば、宇宙進化や初期宇宙の情報を得ることも可能になるかもしれない。宇宙にダークマターが存在することは明確になったが、

それがどのような粒子であるかは不明である。そこで、(d)ダークマター探索研究では、ダークマターと物質との散乱による反跳原子核を観測することを目指す方法と、宇宙空間に存在するダークマターが対消滅した際に生成される2次粒子を観測する方法があり、それぞれ研究計画が立案されている。

以上の4分野のうち、その科学的重要性が早くから認識され、日本独自の検出感度向上技術を含めて基礎開発研究がほぼ20年にわたって進められ、いよいよ本格的な観測装置を建設する段階にあるのが、地上における重力波観測装置計画LCGTである。この計画は2010年代半ば以前の観測開始と重力波の初検出をめざしている。さらに重力波が確実に観測されるようになれば、米欧の同様な観測装置との国際協力によって重力波の到来方向などを測定し、重力波天文学の開拓をめざすものである。このLCGTについては、4章で詳しく述べる。一方、宇宙空間での重力波観測で得られる科学的成果は地上における重力波観測とは相補的であるが、その実現にあたっては地上における重力波観測で得た技術的ノウハウの蓄積を進めつつ、宇宙における観測に特有の技術開発を進め、将来的に実現を目指すことになる。重力波の研究計画は規模が大きく、重力波天文学の確立という大きな目標の達成には長期間を要することなどから、この日本学術会議報告「天文学・宇宙物理学の展望と長期計画」を基本にして計画を進めるべきものと考えられる。

(3) 地上及びスペースにおける電磁波観測との連携

TeVガンマ線とX線の観測から天体での粒子加速の様子が理解されてきたように、近年、宇宙で起こっている様々な現象のより完全な理解のためには多波長の電磁波観測と多粒子観測が不可欠であるとの認識が強まっている。従って宇宙線、ニュートリノ、重力波観測の連携はもちろん、地上及びスペースにおける様々な波長の電磁波観測と、宇宙線、ニュートリノ、重力波観測との連携は、将来ますます重要になると考えられる。

3.2.5 データベース天文学

天文学では衛星や地上望遠鏡による観測データをデータベース化し世界に公開・利用することが大きな流れとなっている。これを国際的に組織化し、世界中の研究者が膨大な観測データを利用できるようにすることによって効率的に研究を推進しようとするのが「データベース天文学」である。大型装置とは異なる性格のものではあるが、天文学・宇宙物理学の研究環境を広く提供・強化するものであること、また国際共同も含めてコミュニティーの合意と中核的研究機関の関与が不可欠であることから、この長期計画の検討に含めるべきものである。

データベース天文学の構築は、ハッブル宇宙望遠鏡をはじめとする衛星観測によるデータの利用が、その均質性もあって先行し、地上観測がその流れを追う形で進んできた。欧米では30年ほど前から各種データ公開システムが構築されるとともに、すでに多くのデータセンターが設置されてデータ収集・公開の中心的役割を果たしており、世界中から利用

されている。

日本では、国立天文台や ISAS が中心となって地上望遠鏡や科学衛星データの公開システムを構築・運用してきた。最近では、様々な天体现象が放射する多波長データを有機的に利用し、現代天文学の多くの謎に統計的手法を用いて取り組むため、多波長天文データをインターネット上で相互接続利用できるヴァーチャル天文台（VO）の構築が進められ、欧米諸国との国際協力・連携のもとに相互の天文データやデータ解析プログラムを利用できる新しい研究推進基盤作りが進んでいる。

(1) データベース天文学が目指すもの

すばる望遠鏡をはじめ、Gemini、VLT など 8m 級大型望遠鏡はほぼ 10 年稼動し、観測データが日々大量に産出されている。衛星による観測データも合算すると天文学研究に利用できる観測データは年間 10TB の規模で増大している。アルマをはじめとする次世代計画が完成すると第一線の天文データがさらに多量に発生するが、従来の手作業中心のデータ解析手法ではこれらの膨大なデータを迅速に処理研究することはしだいに困難になる。一方、高速インターネット関連技術、計算機技術、ソフトウェア技術は急激に進歩し、天文学でも世界中に蓄積された大量の多波長天文観測データベース（以下、DB と略す）の画像、スペクトル、カタログなどを検索し取得することを可能とする高速ネットワークが実現できるようになる。

データベース天文学（以下、DB 天文学）の目標は、世界中の天文台を IT 技術で連結することを通じて多波長天文観測データを瞬時に検索・取得しできるヴァーチャル天文台を構築し、日本も含めた世界各国の協調によって、宇宙の諸現象について総合的に研究できる優れた研究環境を実現することである。

(2) 国内外の情勢

(a) 日本のデータベース天文学関連計画

国内の天文 DB は、国立天文台がすばる望遠鏡の観測 DB、野辺山電波天文台の観測 DB、太陽観測を行う「ひので」衛星 DB 等を構築・運用し、また ISAS によるデータ公開システムでは各種科学衛星データの DB 化およびその運用が行われている。各大学においても、東京学芸大学の暗黒星雲 DB や北海道大学による金属欠乏星 DB が個別に構築されている。これらの天文 DB はいずれもオンライン公開され、研究に活用されている。またその他の天文研究機関もデータを広く公開することを計画している。

国立天文台の Japanese Virtual Observatory (JVO) はこれらを連結するものであり、次項 (3) で述べる国際ヴァーチャル天文学連合が定める各種国際標準方式に準拠したシステム構築により、JVO ポータルを通じて、オンライン公開されている国内外の 1,600 を越える各種 DB からのデータ取得が一元的に可能となった (2008 年 11 月現在)。また JVO は、PC の画面上で各種データ解析もできる研究基盤の提供を進めている。JVO には、すばる望

望遠鏡の観測 DB、ISAS のデータ公開システムや金属欠乏星 DB 等も接続され、世界の天文学の発展に貢献している。

(b) 海外のデータベース天文学関連計画

DB に関しては、米国では宇宙望遠鏡科学研究所など中核的研究機関等のデータ公開・運用のための部署が役割を担っている。欧州でも欧州南天天文台や仏・ストラスブールデータセンター (CDS) 等がデータ収集・公開の中心的役割を果たしている。特に CDS は、データ公開で 30 年ほどの経験を持ち、そのシステムは世界中で利用されている。

海外における VO 構築は 2002 年から本格化し、米国 NVO、欧州の Euro-VO などが動き出し、その保有する天文 DB などを天文研究者に提供している。特に欧州はネットワークを活用した研究基盤の構築に力を入れており、VO は欧州の天文学将来計画の中の重要な柱の一つとして位置づけられている。

(3) 今後の課題

DB 天文学はようやくそのための「望遠鏡」というべき VO の実現に目処が立ち、各研究機関や大学、そして天文研究共同体などの協力のもと、今後大きく発展する段階にある。その普及や成功に向けた課題で特に重要と思われる点を、以下に列挙する。

(a) データベース天文学推進のコアとしてのデータセンターの強化

DB 天文学では、統合天文 DB 群を「観測対象」と考え、いつでもどこからでも「観測（検索）」できる「望遠鏡」システムを利用した天文学研究を推進するとともに、その研究施設を高度化・運用することが求められる。このための組織が「データセンター」である。即ちデータセンターは望遠鏡利用における「観測所」に対応し、ネット上に構築される天文台 (VO) である。したがってデータセンターは、DB 天文学の推進経験を天文コミュニティに還元するとともに、DB 天文学の国際連携の窓口として、天文データ内容の記述方式、天文データ本体、検索機能の高度化、データ解析ツールや可視化機能の高度化等を進め、各観測所との接点としてデータの収集・公開業務、各種支援業務を行う必要がある。

(b) 観測所（望遠鏡サイト）における品質保証

天文 DB の活用で重要なのは、DB の内容を安心して利活用できることである。そのためデータ（シミュレーションを含む）を生産する観測所は、較正を施し、かつデータ品質を保証するかデータ品質を示す指標をデータに付加して、VO の国際標準方式を通じて公開することが求められる。

(c) 国際協力・国際対応

世界各国の VO プロジェクト間の相互運用性を確保し、相互のデータ資源や計算資源を仮想化・共有化するため、日米欧などの VO プロジェクトが参加する国際ヴァーチャル天文台連合 (International Virtual Observatory Alliance、IVOA) が、天文データ内容の記述方式、データ取得方式、出力形式等の VO 用国際標準を策定している。これらの活動は国際天文学連合 (IAU) や、国際科学会議 (ICSU) 下の「科学技術のためのデータ委員会」

(CODATA)などにおけるデータ活用科学の礎となるものである。従って、日本の天文学研究の成果を広く世界に広めると同時に、世界の各データを活用して日本の天文学からさらに多くの研究成果を生み出すため、相互貢献の精神に基づき、これらの国際標準化活動に日本からも積極的に参加・貢献することが極めて重要である。

3.2.6 観測技術の長期継続開発の必要性

可視光用のシリコン CCD など、最近 20 年間における天文観測用センサーの高度化は、望遠鏡の巨大化に匹敵あるいはそれ以上の貢献をしたといっても過言ではない。わが国においては、高度な民生用半導体技術が使えるという基盤があり、少数ではあるが優秀な研究者が長期間にわたって開発に専心し続けたことにより、ミリ波・サブミリ波、可視光用 + X 線用 CCD、遠赤外線用センサー、そして最近ではガンマ線イメージャーなどで世界一流の開発成果を達成してきた。センサー以外にも X 線反射鏡、スペース用冷凍機などは世界一の技術レベルにあり、これらを用いた国際共同研究プロジェクトが実際に進行しつつある。

このような技術開発は長期の安定的研究費があることと、携わる研究者が正当に評価されることで健全な発展が望めるものである。短期の成果を性急に求めるのではなく、研究者が試行や工夫を存分に重ねることで、素晴らしい成果が生み出される。実際、ISAS では 25 年近くにわたってスペース用冷却技術の開発を継続した結果、2K 以下の極低温を世界で唯一達成することができ、「すざく」、「あかり」、SMILES、SPICA など多くのプロジェクトに利用されつつある。同様の例は枚挙にいとまがない。

しかしながら運営交付金が大幅に減額されたため、大学研究者は科研費に頼らざるを得ないが、最長 5 年の開発期間は明らかに不十分である。大学共同利用機関が中心となり、10 年あるいはそれ以上にわたって、厳選した少数のテーマについて長期間継続的に技術開発研究を進めることが、我が国だけでなく世界の天文学の進展にとって、きわめて重要である。

一方、技術開発に携わる研究者に対して正当な評価を与える環境については、我が国は極めて貧弱である。特に大学院生から若手研究者の時代に、昇進のために性急な成果を求められたり狭義の天文学論文執筆を推奨されたりすることが多くなり、優秀な若手研究者が安心して技術開発に携われる環境が整っていない。分野全体で議論し意思を統一して、評価に関して大幅な改善をする必要がある。

3.2.7 ここで取り上げる具体的な長期計画について

3.3 節以降では、各分野の長期計画について具体的に見ていく。ここでは、プロジェクトとして、国内外の連携を伴う大きなものを中心に取上げた。スペースミッションについては、JAXA/ISAS の下の宇宙理学委員会でワーキンググループ設置を認められているものについてのみ掲載している。規模の小さなプロジェクトや、まだ計画検討の初期段階にあ

るプロジェクトについては、巻末に、2006 年、2007 年の 2 回にわたって開催された日本学術会議主催『天文学・宇宙物理学の長期計画』のプログラムを添付したので、そちらを参照されたい。

提案されているプロジェクトの中でも、コミュニティーの総意として最優先で実現すべきと考えられているものについては、天文学・宇宙物理学分科会として、ヒアリングを実行した。その中で、特に、大型低温重力波望遠鏡計画 LCGT、30m 大型光学赤外線望遠鏡計画 TMT、次世代赤外線天文衛星計画 SPICA は、分科会として、特に実現が急がれる計画ということを確認、章を改め、4 章に詳細をまとめることとした。

3.3 電波観測装置の長期計画

3.3.1 はじめに

(1) 分野の現状と動向

日本の宇宙電波研究は、短波長側ミリ波天文学を中心に発展を遂げた。1980 年代初期に世界最大のミリ波観測装置である野辺山の 45m 電波望遠鏡と 5 素子干渉計が稼働し、星間物質・星の生成・銀河中心核活動等の研究でめざましい国際的成果を挙げ、かつ多くの研究者を育成した。超長距離電波干渉計 VLBI による天文学でも、宇宙科学研究所との協力で世界初のスペース VLBI「はるか」、地上では VERA による高精度電波三角測量を実現するなど、先端的開発が進んだ。平行して大学共同利用機関としての国立天文台の整備、大学と共同しての技術開発などが進み、日本の電波天文学は可視光観測と並ぶ地上からの宇宙観測の柱にふさわしいコミュニティーの広がりを持つに至った。

現在、電波観測は宇宙膨張初期の現象や太陽系外惑星の直接観測も視野に、高感度と高空間分解能を実現する大規模干渉計の時代に入った。日本は日米欧三者共同の大型ミリ波サブミリ波干渉計**アルマ計画**を中核プロジェクトに位置づけ、その建設で先導的役割を果たしている。また台湾などアジア諸国と共同のアルマアジア観測センターを構築するいっぽう、チリのアルマ建設地を拠点にサブミリ波の先進的な観測を進め、VLBI では「はるか」の後継機 **ASTRO-G** の 2012 年打上げと宇宙-地上ネットワークの構築を準備中である。

(2) 目指す目標：アルマ後の長期計画

国際共同の大型装置アルマの建設は、着々と進んでいる。当面、日本で発展したミリ波・サブミリ波天文学をアルマによって発展させ、宇宙の物質進化、星・惑星系形成、銀河形成などの諸分野で宇宙探求のフロンティアを切り開くことが日本の電波天文学分野の当面の大目標であることは、論を待たない。

いっぽうアルマ建設の進展を受け、地上からの電波観測の分野では世界的に、アルマ以後の長期計画の検討が進んでいる。最有力の SKA (Square Km Array = 1 平方 km 電波干渉計) 計画は、観測波長でアルマと相互補完的な長波長電波の大型観測装置計画であり、

すでに国際協力による部分的開発段階に入りつつある。SKA は宇宙論から相対論、宇宙の生命や文明探査まで幅広いインパクトをもたらし得る画期的な観測装置で、これに高度な検出・デジタル技術と観測研究の蓄積を持つ日本が参画し、さらに優れた計画として実現していくことが、日本にも世界にとっても重要である。日本の SKA 参加への国際的期待は高く、日本の電波天文学コミュニティとしても SKA をアルマ以後の中心的計画と位置づけ、具体的検討に入りつつある。SKA 計画の詳細とそれへの日本の対応は、次の[2]項で述べる。

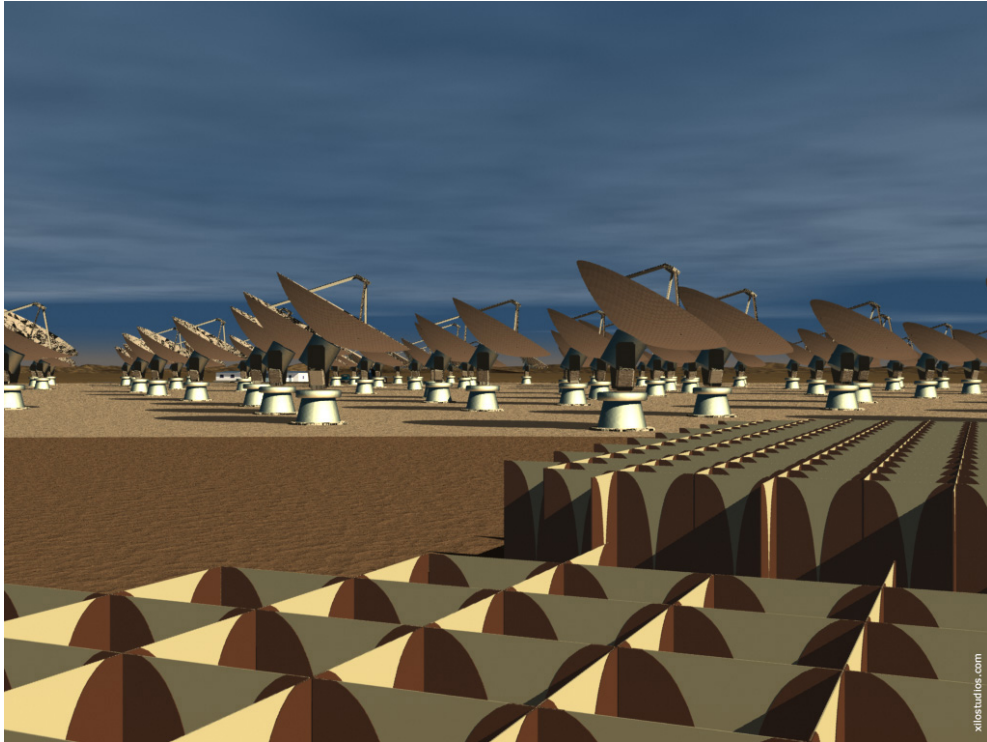
アルマ後の長期計画においては、銀河進化や高エネルギー宇宙物理学、高度化する電波位置天文学、重要性を増すインフレーション宇宙や電波による重力波直接実証等も含め新たな物理学的課題に挑戦するなど、SKA も含めて戦略的に目標を設定して行く必要がある。サブミリ波天文学の新たな発展や宇宙背景放射の高精度観測などさまざまな規模・時間スケールで視野に入ってきている計画については、[3] 項で概観する。

3.3.2 観測装置の諸計画

(1) SKA 計画 (Square Kilometer Array : 1 平方キロメートル電波干渉計)

(a) SKA 計画の概要

アルマ後の電波天文学の大型地上計画として国際的に最重要と位置づけられているのが、SKA である。SKA は、波長 1 cm 以下のミリ波・サブミリ波で観測を進めるアルマとは対照的に、波長 1 cm 以上 3m までの長波長域の電波を観測するもので、比較的小型のアンテナを 1000 キロメートル以上の範囲に 2000~3000 台展開し、集光面積 1 km² のという巨大電波望遠鏡を実現する。cm 波帯で現在最大の VLA [米] の 50 倍以上の感度、100 倍以上の空間分解能(最高 0.001 秒角)を達成する、画期的な国際計画である。



SKA の計画イメージ：Focal Plane Arrays と Small Disks

SKA の観測対象も、当然アルマと相補的である。主要科学目標として、5つの柱がある。
①中性水素ガスの直接イメージングによる宇宙初期の暗黒時代の探求、②宇宙磁場の起源と進化の研究、③重力理論の直接検証、④中性水素ガスの観測による銀河全天サーベイ観測と銀河進化、⑤宇宙における生命の起源、文明の探査。

上記のうち、中性水素ガス（21cm 線）の観測①④は、アルマが密度の高い分子ガスによって星や惑星の形成などを観測するのに対し、宇宙の基本元素である水素の 21cm 線をついてない規模で観測するものである。①は 130 億年よりも前、宇宙初代の星の誕生以前の、これらの材料である低温・低密度ガスを、はじめて観測する。膨張宇宙初期の未知なる暗黒時代の探求である。さらにデジタル技術を駆使して得られる高感度・広視野を生かし、宇宙初期から現在までの全天の中性水素ガスを観測し、どのように現在の宇宙が形作られてきたのかを解明する④。一方、偏波観測で宇宙の磁場の起源の解明をめざす②や、パルサーの超高精度観測により強い重力場で一般相対論を検証する③は、宇宙の基本原理や宇宙の最初期に起きた事実を理解する上で重要である。③の観測を高精度化すれば、宇宙初期の時空の形成時に発生したはずの背景重力波の直接検出も可能になると期待される。⑤は惑星形成の場での大型有機分子の進化を観測し、また地球的な電波文明が存在する可能性を探る（SETI = Search for Extraterrestrial Intelligence）もので、生命観や人類文明論に与える影響も大きいであろう。このように SKA は電波観測に全面的にデジタル技術を持

ち込んでコンピュータ望遠鏡とも言うべき新しい形式の観測装置を実現するものであり、それによってきわめて先進的かつ斬新な宇宙の探求が実現すると期待される。

(b)SKA 計画と日本の電波天文学

SKA 計画はオランダ、イギリスなど欧州諸国、アメリカ・カナダの北米、電波天文学の強い伝統を持つオーストラリアなどによる広い国際共同組織で検討推進され、技術開発も分担により高度なレベルで行われている。しかし本格的な建設予算のメドは、まだ立っていない。実現すればアルマとともに宇宙の基本的問題の解明に取り組む世界の電波天文学の中心的観測装置となるものであり、日本にとって極めて重要な計画であると同時に、国際的にも日本の参加に大きな期待がかけられている。

SKA の実現に日本が果たせる科学的・技術的貢献は、非常に多い。特に大きな寄与が期待されているのは、SKA の短 cm 波帯の装置開発と観測で、技術的には日本得意の超高速 AD (アナログ - デジタル) 変換器や高感度半導体を用いた超広帯域の受信機システムなどである。観測では、アルマでは観測が困難な大型有機分子 (生命と密接に関連する分子) の探査や、VERA の観測を発展させた銀河系遠方領域での精密電波位置天文学も、日本が開発を重ね高い経験を有する分野である。またすばる望遠鏡やアルマ、重力波、理論天文学などの高い実績と連携して、宇宙初期、重力波、宇宙進化、生命の起源など SKA が対象とする広いサイエンスへの重要な寄与が期待されるとともに、日本の天文学・宇宙物理学に多大の効果をもたらすものとなるだろう。

(c) SKA 計画への今後の対応

日本国内ではこれまで、電波天文学コミュニティーを中心に SKA への参加や科学面・技術面での寄与について検討が行われてきた。しかしアルマの建設に国立天文台の電波分野の総力を挙げている現状で、アルマとは別のチームで開発を進めているアメリカ、ESO、オーストラリアなど先進諸国に比べ出遅れは否めなかった。国立天文台はこれまで各国の Funding Agency が作る SKA フォーラムにオブザーバーとして参加し、世界各国との協議や情報の共有化を進めてきたが、アルマの建設が進んできた現在、さらに具体的な参加・協力体制の構築が急務であるというのが、電波天文学コミュニティーの一致した意見である。

当面は、日本としての参加形態、組織等について国内での検討を積み上げながら、SKA 実現を目指す主要国と連携して日本の参加による SKA の高度化と建設分担プランを練り上げてゆくべきである。日本が貢献すべき科学的目標と日本がリードし貢献できる技術開発分野をさらに具体的に整理し、その一方で、国際的にもなお本格的建設の予算化にはいたっていない SKA の実証段階として進む各国のパイロット装置計画 (オランダの LOFAR や ASKAP (Australian SKA Pathfinder) への協力も真剣に検討する必要があるだろう。それらと並行して、国立天文台とコミュニティーの協力で人的体制などの検討整備を進め、日本の電波天文学コミュニティーとして、アルマ以後の次世代の中核計画としての SKA の推進体制の構築に進むことが適切であろう。

(2) そのほかの計画

SKA はアルマと並ぶ次世代の電波観測装置であり、その実現に取り組むことは日本の地上からの電波観測分野として適切な選択である。しかしもちろん、科学はひとつの大型計画だけで進むものではなく、それを支え、あるいはそれぞれに多彩なフロンティアを切り開き、また多角的な発展の可能性を育成していくため、それと平行して萌芽的・先導的研究を日本主導で展開することが必須である。

特に、新たな波長域であるテラヘルツ波観測への挑戦や、広視野サーベイ、VLBI などの技術開発を進め、アルマ後のミリ波サブミリ波天文学の発展を目指すことは重要である。アルマを中核とするサブミリ波 VLBI 網構想は、サブミリ波・干渉技術と VLBI 技術の総合として構想されている。高度化するデジタル技術を含め、これからの時代を切り開く鍵となる電波観測技術の戦略的な開発を進めることが強く求められる。

また、これまでの蓄積を基礎にインフレーション宇宙の実証を目指すなど、新たな宇宙物理学の課題に挑戦することも重要である。そのため目的を明確にした大学の専用観測装置による先端的物理実験など、アルマや SKA など多様な観測を行う汎用地上大型電波望遠鏡とは異なる、多彩で新しい枠組みを作ってゆくことが重要であろう。

そうした将来計画の提案は数多く、規模や準備状況もさまざまである。その多くは、2006 年、2007 年の 2 回にわたって開催された日本学術会議主催『天文学・宇宙物理学の長期計画』において報告・議論されている。天文学・宇宙物理学の長期計画策定を中心課題とする本報告の性格に鑑み、これらの提案の主なものは、表 3-1 に一括して取りまとめ、以下で概略するにとどめる。また上記シンポジウムの報告一覧も収録したので、参照されたい。

(a) サブミリ波・テラヘルツ天文学の発展をめざす諸計画

進行形のアルマ完成後のサブミリ波天文学のさらなる推進は、重要である。特にアルマがカバーできないテラヘルツ領域（波長 $300\mu\text{m}$ 以下、周波数 1THz 以上）での天文学の開拓、ミリ波サブミリ波領域でアルマと相補的であり新たな観測の地平を築く超広視野・超広帯域サーベイ観測、そしてサブミリ波 VLBI 観測などがある。

【広視野ミリ波サブミリ波検出器の開発】

10 年程度を視野に入れ、光赤外線 CCD に相当する電波の 2 次元焦点面検出器として、サブミリ波超伝導多ピクセル検出器の開発を行い、世界の最先端を開く計画。銀河系内の低温ダストの熱放射や、遠方銀河の赤方偏移したダスト放射、および CMB の放射はいずれもミリ波から遠赤外線の領域に輻射強度のピークをもつので、その波長領域での高感度・広視野の連続波カメラの開発は広い分野の宇宙観測に極めて重要である。併せて、将来の THz 焦点面検出器の開発への展望も開いてゆく。（[4]の技術開発課題も参照）

【南極におけるテラヘルツ（および赤外線）天文学計画】

南極のドームふじ基地（標高 3810m ）でサブミリ波から近赤外線で天文観測を行い、将来的には天文台を設置する計画。高地・極寒（ -80°C ）のため大気中の水蒸気や酸素によ

る吸収が極めて少なく晴天率も高いことから、地上で最も優れたサイトのひとつと期待される。ここに赤外線やテラヘルツの望遠鏡を設置し、遠方の宇宙等を観測する。アルマ以短の $300\text{--}100\mu\text{m}$ (周波数 $1\text{--}3\text{ THz}$) の波長域は低温星間物質の進化や銀河進化の観測で重要で、炭素イオン[CII]輝線 ($1.9\text{ THz}; 158\mu\text{m}$) や窒素などの輝線が多く存在し、塵からの輻射の強度のピークがある。先行計画との相補性や費用対効果等を考察しつつ、極めて優れた観測サイトである南極での THz 天文学の実現を赤外線での同様の計画とも連携して進める。

【地上大口径サブミリ波望遠鏡計画】

現在、国立天文台野辺山と東大等は協力して 10m サブミリ波望遠 ASTE (Atacama Sub-mm Telescope Experiment) をチリ高地で運用し広視野観測を進めているが、口径 $20\text{--}30\text{ m}$ 級のサブミリ波望遠鏡を実現すれば本格的観測が可能である。広視野大型カメラや超広帯域分光装置の搭載で、アルマと相補的な超広視野サーベイや超広帯域分光観測、将来的には超広帯域分光イメージングが実現できる。チリでは口径 25m サブミリ波望遠鏡 CCAT の計画もあることを視野に入れつつ、日本として ASTE や野辺山 45m 鏡の科学的・技術的成果をもとに大口径サブミリ波望遠鏡実現に主体的に取り組み、実現を目指す。

【サブミリ波 VLBI によるブラックホール解像望遠鏡計画】

アルマを中核にして南米にサブミリ波 VLBI 網を構築し、我々の銀河系中心のブラックホール (SgrA*) を観測する計画である。観測周波数は 230 GHz と 345GHz 、 10 局程度の観測局を南米高地に直径 8 千 km の範囲で配置し、「事象の地平線 (ブラックホール・シャドウ)」の解像を目指す。現在 ESO が中心となってアルマ+3 局程度からなる南米 VLBI 網の計画が立案され、アルゼンチン、ブラジルの研究者とも協力してサイトの予備調査等を進めている。日本では最近、ASTE を用いたサブミリ波 VLBI の基礎実験計画の検討が始まっている。

(b) 宇宙背景放射 (CMB) の偏波観測

宇宙マイクロ波背景放射 (以下 CMB) の特殊な偏光成分 = 「CMB B-Mode 偏光」の観測の重要性が、世界の共通認識になっている。インフレーション理論ではその時期に生じた重力波の影響が CMB の B-Mode 偏光という形で刻印され、その検出でインフレーションの直接検証ができると考えられている。さらに CMB 偏光の詳細観測で宇宙初期の超高エネルギー状態を探り、エネルギースケールの推定や基本物理に迫ることも可能と考えられる。B-Mode 偏光の兆候については 2009 年 5 月に打ち上げられた PLANCK 衛星、地上でも多くの専用望遠鏡がチリ・アタカマサイト (QUIET, PolarBeaR, CLOVER 望遠鏡計画など) や南極 (SPT 望遠鏡) で観測を開始しているが、PLANCK 後の本格的検出を目指した衛星計画についてはまだ十分な検討が行われていない。そこで、B-Mode 偏光を検出しインフレーションの直接検証と原始重力波検出を目指す CMB 偏光観測衛星 (LiteBIRD) を日本主導で早期に打ち上げようという計画などが検討されている。

表 3-1 電波観測諸計画まとめ

名称	目的	計画概要	代表者、提案・推進主体	予算規模	進捗状況
SKA (Square Kilometer Array)	①中性水素ガスの直接撮像による宇宙の暗黒時代の探求、②宇宙磁場の進化の研究、③重力理論の検証、④中性水素ガスの観測による近傍銀河全天サーベイ観測と銀河進化、⑤宇宙における生命の起源の探求	長波長用アンテナを 1000km 以上の範囲に 2000～3000 台展開し、集光面積 1 km ² の電波望遠鏡とする。観測波長は 3m から 1.2 cm。画期的な高感度と高分解能(最高 0.001 秒角)の実現を目指し、センチ波帯では現在最大の干渉計 VLA の 50 倍以上の感度、100 倍以上の空間分解能を達成する	欧州・米国・豪州などによる国際協力。日本は参加を検討する段階。	1000 億円	2020 年完成を目指している。現在、SKA フォーラムが、検討を進めている段階。日本は、オブザーバーを派遣。
CMB 偏光観測衛星(LiteBIRD)	インフレーション期に生成された重力波によって生成された宇宙マイクロ波背景放射の偏光成分の測定	偏光の検出に最適な 1 度角の角度分解能を持つミリ波超伝導 2 次元検出器を搭載する無冷媒冷却方式の小型衛星を早期に打ち上げる。	羽澄昌史 高エネルギー物理学研究機構	90 億円	2017-2020 年頃打ち上げ。宇宙理学委員会に WG 設置
地上大口径サブミリ波望遠鏡計画	宇宙初期の星形成銀河をサブミリ波で観測し、そこでのダークハロー分布や大規模構造を明らかにする。	口径 20-30m 級のサブミリ波望遠鏡強をチリ高地に建設する。広視野連続波・ヘテロダイン受信大型カメラ、超広帯域分光装置を搭載する。	川邊良平 国立天文台野辺山観測所	30-40 億円	2017 年頃。
サブミリ波 VLBI によるブラックホール解像望遠鏡計画	銀河系中心のブラックホール、SgrA*の事象の地平線を直接分解観測する。	アルマを中核に、サブミリ波 VLBI 網を構築。観測周波数は 230 GHz と 345GHz、10 局程度の観測局を南米高地に直径 8 千 km の範囲で配置。	国立天文台、米欧などの国際協力	100 億円	2020 年頃

3.3.3 技術開発の課題

(1) ミリ波サブミリ波用の焦点面大型 2 次元検出器の開発

国立天文台は国立研究所や大学等と協力し、ミリ波サブミリ波望遠鏡やアルマに向けたミリ波サブミリ波のヘテロダイン超伝導受信機の開発を進めて、現在世界のトップクラスに立っている。一方、光子検出型検出器の開発については理化学研究所や国立天文台独自の努力が行われてきたものの、実用レベルに至っておらず、世界から立ち遅れている。

ミリ波サブミリ波帯で光子検出型 2 次元検出器を開発することは、緊急かつ重要な課題である。長期的視点では、衛星での CMB B-Mode 偏光の検出を目指したミリ波 10k pixel の超高感度検出器や、衛星搭載用のサブミリ波・THz 帯の 10k pixel 超高感度検出器の開発も必須であろう。短・中期的には宇宙用ほどの高感度を必要としない地上用の検出器の実用化・高度化が急がれる。

有力な 2 次元検出器技術としては、超伝導 TES (Transition Edge Sensor) ボロメータと、超伝導トンネル接合素子 STJ (Superconducting Tunneling Junction) がある。TES は、米国 UC Berkeley や NASA が先頭にあり、観測の実績もある。日本でも JAXA の X 線ブルーブや東大、理研等で開発が進められて来た。国立天文台もこれらの機関や UC Berkeley と協力し TES のミリ波サブミリ波カメラの開発を進めている。STJ に関しては理研、国立天文台で開発が進められ、5x5 素子 650GHz アレイの開発と ASTE での試験観測に成功した。10k pixel サイズの検出器開発では、多チャンネルに対応する読み出し回路の開発も鍵となる。STJ という独自技術の開発は重要だが、目標を達成する上では先行する TES アレイも保険技術として位置づけておく必要がある。

検出器の開発には多大な費用、多くの人員、時間が必要で、共同開発体制や資金・人員の早期投入が重要である。また将来的には、冷却系や較正系も含む衛星搭載可能な観測システムの開発も重要であろう。

(2) 超広帯域観測が可能なシステムの開発と SKA への応用

サブミリ波 VLBI の実現や SKA において、周波数における超広帯域観測が可能な観測システムの開発は、重要な鍵である。特にサブミリ波では、センチ波やミリ波に比べ可干渉時間 (相関が得られる時間) が非常に短くなる。短い積分時間で干渉縞を検出するには、周波数域での超広帯域サンプラーと超広帯域レコーダーからなる超広帯域観測システムによって、観測感度を大幅に上げることが不可欠となる。現在国立天文台を中心に InP 使用の超広帯域サンプラーの開発・試作が進んでおり、野辺山 45m 鏡では 22GHz 水メーザの観測で増幅後の信号を直接 A/D 変換してスペクトルを取得することに、世界で初めて成功した。また VLBI グループは超広帯域レコーダーの開発を進めている。これら日本がリードする技術の開発をさらに進め、超高感度観測を目指す SKA への応用を可能とする。これは、日本が SKA に参加することで貢献する極めて重要な技術の一つとなる。

(3) サブミリ波 VLBI 技術の確立

日本ではアルマの実現に向けてサブミリ波ヘテロダイン受信機、サブミリ波干渉技術、超高性能・広帯域相関器の開発が深く進められてきた。これらの技術はそのままサブミリ波 VLBI の実現を可能にするものである。今後これらを発展させ、サブミリ波 VLBI のための要素技術確立することが求められる。特に次の段階への移行を可能とする次世代相関器技術や、超長基線でのサブミリ波干渉技術などが鍵となる。

3.3.4 国際協力・国際対応

アルマと並ぶ大型国際計画 SKA では、アルマよりもさらに深いレベルの国際協力が必須と予想され、日本としてどのような形で参加するにせよ、SKA の建設を主導する主要国との密接な連携が不可欠である。世界との連携を図る窓口の明確化と、そこを通して適切に協議を進める体制・支援システムの構築が、SKA の今後の課題と言える。

また、大型計画だけでなく先駆的・先導的な小中規模の計画においても、欧米との技術協力や共同運用は日常化し、予算・人員・基盤設備や最先端の技術を国際的に分担し、科学的成果を最大限に、タイムリーに実現してゆくことが世界的な標準となっている。協議等による間接経費負担はあるものの、日本も可能な限り国際的な共同体制のもとで計画を推進してゆくことは必須であろう。このような小中規模の国際協力を効果的に支援できる仕組みの整備や充実も必要である。

3.4 光・赤外線観測装置の長期計画

3.4.1 はじめに

(1) 分野の現状

光赤外天文学の研究者コミュニティは、2010 年代に我が国が目指すべき方向を 2003 年度より 2 年間かけて検討した結果、(ア)すばる望遠鏡につづく地上大型望遠鏡として次世代 30m 望遠鏡の建設と(イ)赤外線観測衛星あかりに続いて 3.5m 赤外線望遠鏡 SPICA の打ち上げの実現を主要計画と位置づけることを合意し、「2010 年代の光赤外天文学―将来計画検討報告書」を 2005 年 3 月にとりまとめ発表した。計画の大型化に伴い、この報告書では法人・機関間協力、国際協力の枠組み整備が訴えられた。

これを受け、国立天文台では ELT プロジェクト室が発足し、マウナケア山頂での 30m 大型光学赤外線望遠鏡計画 (TMT) の国際共同建設に向け合意書の署名等の活動が始まっている。また JAXA 宇宙科学研究本部では宇宙理学委員会のもとに SPICA WG が結成され活動を行ってきたが、ESA との国際協力が Cosmic Vision の推進候補採択まで進むとともに、2008 年 7 月に JAXA のプリプロジェクト(3.2.3(5)参照)へと移行した。

これらの国家規模プロジェクトに加えて、大学の法人化に伴い、教育研究面で各大学が特色ある個別の中規模計画を策定し推進している。大型計画推進の人材育成のためにもこれら個別計画を平行して実現していくことが肝要である。

(2) 目指す目標

光・赤外線観測天文学が目指す主要な研究テーマとして、すばる望遠鏡に代表される 8m 級地上望遠鏡、ハubble、スピッツァー、あかりなどの宇宙望遠鏡が切り開いてきた、(ア) 高赤方偏移宇宙の銀河の具体的観測による銀河形成史の解明、(イ) 星間ガスとダストから星形成に至る過程の解明、(ウ) 恒星分光による元素合成史の解明、(エ) 原始惑星系円盤からの惑星形成過程の解明、(オ) ガンマ線バースターや活動銀河中心核の物理の解明、などのさらなる発展があげられる。次世代 30m 級望遠鏡の大集光力と高解像力、未踏の中間・遠赤外域の高質な観測を提供する SPICA の能力などを考えると、これらの分野では、確実な学術的進展が見込まれる。

さらに、近赤外や可視域での広視野サーベイ観測は、統計的なアプローチに大幅な前進をもたらすだけでなく、ダークマターやダークエネルギーの解明などに、光赤外観測から迫る新しい可能性を提供する。また我が国発のアストロメトリ衛星計画「JASMINE」が実現すれば、新境地を開くことができる。

3.4.2 観測装置の諸計画

30m 大型光学赤外線望遠鏡計画 TMT、次世代赤外線天文衛星計画 SPICA、そのほかの計画についてその概要を記す。

(1) 30m 大型光学赤外線望遠鏡計画 TMT

次世代の口径 30m 大型光学赤外線望遠鏡計画 (TMT) については、第 4 章で詳しく述べるので、ここではその位置づけの記述にとどめる。

光赤外天文連絡会の将来計画検討会は口径 30m の JELT 構想のとりまとめを行い、国立天文台は 2006 年に JELT プロジェクト室を設置した。JELT は国際的にいくつか独立して提案されている次世代超大型望遠鏡(ELT: Extremely Large Telescope)の日本版である。

JELT は、(1) 銀河形成と宇宙再電離の解明、(2) 系外惑星探査と星形成過程の解明、(3) クェーサーやガンマ線バースターの物理の解明、などの観測的研究で、これまでにすばる望遠鏡で得られた成果をさらに大きく発展させるとともに、JWST、アルマなどと並ぶ 2010 年代の天文学最前線を牽引する基幹望遠鏡となる。

JELT 構想には日本独自の斬新な構想が盛り込まれたが、日本単独での早期実現は困難との判断から、カリフォルニア工科大学、カリフォルニア大学、カナダ天文学大学連合が検討を進めていた TMT(Thirty Meter Telescope)計画に合流して、マウナケア山頂地域で世界でもいち早く実現することを目指す方針を 2007 年 1 月に固め、このための活動を強化している。

2009 年 7 月にはサイトがマウナケアに決定された。これを受けて 2010 年度の調査費要求を行い、2011 年度からの大型計画として、スタートすることを希望している。順調に建設が進めば 2018 年に部分的ファーストライトとなる見込みである。

(2) 次世代赤外線天文衛星計画 SPICA

次世代赤外線天文衛星計画 SPICA (Space Infrared Telescope for Cosmology and Astrophysics) についても 4 章に詳しい記述があるので、その位置づけの記述に止める。

SPICA は、(1) 銀河の誕生と進化、(2) 星・惑星系の誕生と進化、(3) 物質の進化の研究を目指し、L2 軌道上で高感度でかつ高空間分解能の中間赤外・遠赤外観測を目指す日本主導の口径 3.5m の大型望遠鏡計画である。近赤外の JWST、ミリ波サブミリ波のアルマの間の波長域をカバーする宇宙天文台として、その科学的意義や開発チームの実績から 2010 年代での実現が望まれ、光赤外天文連絡会の将来計画検討会でも、日本の光赤外スペースミッションの最重要課題と位置づけられている。

欧州では、SPICA への参加が将来ミッション候補の一つとして ESA Cosmic Vision の枠組みの中で選択され、その検討予算がすでに認められている。韓国、米国でも参加の検討が進められている。SPICA ミッションは、開発経費、打ち上げ経費、運用経費を含めると数百億円の規模になると見積もられている。大型科学衛星計画として 2017 年の打ち上げ実現を目指して、検討を進めている。

(3) そのほかの計画

【JASMINE (赤外線位置天文観測衛星)】

JASMINE ミッションは、天の川銀河のバルジ領域を口径 80cm の望遠鏡で近赤外線 Kw バンド (中心波長 2 ミクロン、バンド領域 1.5–2.5 ミクロン) でサーベイし、約 100 万個の星々の固有運動の測定と年周視差法による距離測定を行い、これまでの HIPPARCOS 衛星より位置測定精度で 2 桁、恒星数で 1 桁多い観測をめざす。ESA の GAIA 計画、NASA の SIM 計画はいずれも可視域の観測。宇宙科学研究本部宇宙理学委員会のもとに JASMINE ワーキンググループが 2003 年より設置されている。この計画に先行して、2015 年頃の打ち上げを目指す小型 JASMINE 計画の検討も進めている。

【WISH (超広視野初期宇宙探査ミッション)】

口径 1.5m 鏡と視野直径約 30 分角の近赤外線カメラによるサーベイミッション。宇宙最初期における銀河進化史と大規模構造の形成史の解明、変光天体 (SNe、AGN、GRB) の研究などを目指す。早期に実現できれば、赤外線天文衛星 SPICA や地上 30m 望遠鏡 TMT と、波長域、科学的目標においても良い相補関係にある。

WISH とは独立に、宇宙初期に誕生した種族 III の星からの近中赤外線宇宙背景放射の精密観測を目指して、黄道光の影響を受けない軌道に赤外天文観測器を投入する黄道面脱出ミッション (EXZIT: EXo-Zodiacal Infrared Telescope) も検討され始めている。

【JTPF (地球型系外惑星探査ミッション)】

JTPF 計画は地球型系外惑星を検出するとともにさらに生命の兆候を検出することを目的とする。

系外惑星の直接観測には、高感度、高解像度、高コントラストの3つの要素が同時に実現されなければならない。このため、可視光の中口径の望遠鏡で高コントラスト撮像を迫する方法と、主星との光度比が3桁ほど緩和される中間赤外線での干渉計を用いる方法を検討中。前者のため3.5m軸外し望遠鏡をL2軌道に打ち上げる構想の概念設計とコロナグラフ技術のR&Dを行ってきたが、必要予算規模が大きいため、米欧との国際協力に基づく最初の地球型系外惑星直接観測ミッションの実現可能性も追及している。

【東京大学アタカマ天文台（TAO）プロジェクト】

チリ共和国・アタカマ地方にある標高5600mのチャナントール山頂に口径6.5m赤外線望遠鏡を建設し、JWSTに次ぐ性能で中間赤外線観測を行うことと、近赤外線域での大規模サーベイを行う。観測的宇宙論・銀河形成から惑星系形成の謎まで幅広く最先端の研究を進めるプロジェクトである。大学望遠鏡として若手育成や萌芽的研究にも臨機応変に対応し、望遠鏡時間の一部は国内の他機関の研究者・大学院生へ提供する。

2009年時点では、パイロット望遠鏡としてのmini-TAO 1m望遠鏡が完成、近赤外線カメラANIRによるPa α （パッシェン α ）画像取得にも成功した。さらに中間赤外線カメラMAX38による観測準備と遠隔観測のための山麓基地の建設を進めている。プロジェクトの予算規模は約80億円で外部資金・概算要求・大学等の複数財源を計画している。6.5m望遠鏡についても近赤外線・中間赤外線観測装置各1台を製作する予算が認められた。

【京都大学3.8m新技術望遠鏡計画】

京都大学は、国立天文台、名古屋大学、ナノオプトニクス研究所との四者連携で、国立天文台岡山天体物理観測所の敷地に、民間資金にて口径3.8mの新技術光学赤外線望遠鏡を建設する構想を2006年度より推進している。主鏡は国内初の分割鏡方式とし、超精密研削技術を駆使して製作し、超軽量の架台を採用するなど、次世代の超大型望遠鏡建設のために必要な基礎技術を実験開発する。大学での教育・人材育成に使用することほか、完成後は、ガンマ線バーストなどの突発天体や星惑星形成領域の観測を行う計画であり、公開天文台としてアマチュアとも全国規模で連携したネットワークをつくる。2012年のファーストライトを目指している。

【東北大学南極望遠鏡計画】

南極内陸のドームふじ基地（標高3810m、最低気温 -80°C ）において赤外線での天文観測を行うために、東北大学、筑波大学、極地研究所などの研究者が南極天文コンソーシアムを結成した。赤外線40cm望遠鏡を2010年度に設置して、近傍銀河ハローの観測や系外惑星探査の観測を行う準備を進めている。将来的には2m級望遠鏡を設置する可能性を検討している。

【すばる望遠鏡次期観測装置計画】

すばる望遠鏡は第二期装置計画として、多天体ファイバー分光器FMOS、レーザーガイド補償光学系LGSAO188、新コロナグラフHiCIAO、超広視野カメラHSCを建設中である。ELT時代の運用は他の8m–10m級望遠鏡との連携・役割分担を重視したものとす

る方向で国際的協議が始まっている。その関連で、すばる望遠鏡は主焦点機能の強化戦略を採用し、HSC による広視野撮像機能に加えて国際協力で広視野多天体ファイバー分光機能を持つ新装置の建設可能性の検討を進めている。

表 3-2 光赤外線観測諸計画まとめ

名称	目的	計画概要	代表者、提案・推進 主体	予算規模 (日本負担分)	進捗状況
TMT (Thirty Meter Telescope)	銀河形成と宇宙再電離、系外惑星探査と星形成過程、クエーサーやガンマ線バーストの物理の解明	カリフォルニア大他が構想中の 30 m 望遠鏡計画に参画し、ハワイ山頂での早期実現を目指す。	日本側は家正則、多国共同事業・国立天文台が参加希望表明中	1300 億 円 (350 億円)	2011 年建設開始、観測開始 2018 年
SPICA (Space Infrared Telescope for Cosmology and Astrophysics)	銀河の誕生と進化、星・惑星系の誕生と進化、物質の進化の研究	口径 3.5m の望遠鏡を L2 軌道に打ち上げ、アルマと JWST の間の波長域をカバーする国際ミッション構想。	中川貴雄、多国共同事業・宇宙科学研究本部	衛星 (320 億円) 打ち上げ、運用経費別	2017 年打上
JASMINE (Japan Astrometry Satellite Mission for INfrared Exploration)	銀河系バルジの構造と進化史の解明	近赤外線アストロメトリ衛星で銀河系バルジ域の多数の恒星を測定。小型衛星で先駆的研究、中型衛星で完全実現を目指す。	郷田直輝、国立天文台・京都大学・宇宙科学研究本部	120 億円	2020 年代前半打上
WISH (Wide-field Imaging Surveyor for High-redshift)	初期宇宙の銀河形成・進化史。	近赤外線での 1.5m 広視野サーベイ衛星ミッション。	山田亨、東北大学・国立天文台・宇宙科学研究本部	200 億円	2010 年代後半打上
JTPF (Japanese Terrestrial Planet Finder)	地球型系外惑星探査と生命の兆候の有無を検出	軸外し望遠鏡を L2 軌道に挙げて可視光で高コントラスト撮像を追及する方法と、中間赤外線でナール干渉計を用いる方法を検討中。	芝井広・田村元秀、多国共同事業・宇宙科学研究本部・国立天文台	1000 億 円 (200 億円)	2020 年頃打上

TAO (The University of Tokyo Atacama Observatory Project)	観測的宇宙論・銀河形成から惑星系形成まで、サーベイ観測を主に、一部共同利用。	海拔 5600mの世界最高地に 6.5m 望遠鏡を建設し、中間赤外線で地上最高感度を実現。	吉井譲、東京大学	80 億円	miniTAO 試験開始(2009)、2014 完成
京大新望遠鏡	分割主鏡望遠鏡の開発。突発天体や星惑星形成領域の観測。公開天文台としても活用。	民間資金により、次世代望遠鏡建設に必要な技術開発を兼ね、国内初の分割主鏡望遠鏡を建設する。	長田哲也・柴田一成、京都大学・ナノオプト研究所・名古屋大学・国立天文台	民間資金約 12 億円	2006 年開始、2012 年完成
東北大南極望遠鏡	銀河面サーベイ観測と将来の 2.5m 望遠鏡設置に向けての調査。	南極ドームふじに口径 40 c m のテスト望遠鏡を設置、将来的に 2.5m をめざす。	市川隆、東北大学・極地研・筑波大学	7 億円	40cm 計画は 2010 年－2018 年
すばる次期観測装置	ダークマターとダークエネルギーの研究および系外惑星探索に特徴を出し、他の 8－10m 望遠鏡との連携・役割分担を諮る。	補償光学系の高度化と平行して、超広視野カメラや多天体分光による主焦点機能を強化し、ELT 時代に備える。	林正彦、国立天文台 ハワイ観測所	100 億円	完成は 2016-2018 年

3.4.3 技術開発の課題

(1) 望遠鏡製作技術

地上望遠鏡もスペース望遠鏡もまずは鏡である。大型化する非球面鏡の製作には比較的大きな設備投資が必要であり、天文学以外での民生や防衛面での需要が大きくなかった我が国では、この面での開発が遅れてきた。光学、機械、制御技術の合わせ技となる分野であり、我が国の基本技術力で世界的に貢献できうる分野であると考えられる。学術面だけでなく、宇宙基本法の理念、太陽エネルギーの有効利用、新素材開発、光産業育成などの将来施策との関係で、この方面の技術基盤育成の検討も進めるべきであろう。

(2) 観測装置・検出器関連技術

すばる望遠鏡や大学望遠鏡などの観測装置やスペース観測衛星用の観測装置の開発に関しては、それなりの実績があり経験を積んだ若手・中堅研究者が育っている。天体観測用 CCD などでは、国際的に注目される国内企業の実績がある。赤外線衛星のために我が国独自に開発された宇宙用冷凍機は今や X 線や電波天文学衛星に用いられ、世界に誇る技術になった。一方、近・中間赤外線撮像素子の開発は海外依存である。遠赤外線センサーは独自開発によって技術が蓄積してきた。日本の光工学関係でのさまざまな新たな技術は、天文観測に活かせる可能性を秘めており、周辺分野との交流、挑戦的開発を支援する体制が必要であろう。

(3) 大学等の基盤整備

天文学は理論、観測、装置開発の三つが一体となって発展する学問である。大学と大学共同利用機関は、教育、研究、開発、人的交流のさまざまな面で協力関係を構築してきた。次世代望遠鏡などの観測装置は、その規模が大学の一研究室では全体の責任を負うことができないほどの規模と複雑さになりつつあるものがあり、複数グループが役割分担して一つの大型観測装置を製作するためのマネージメント・支援体制の充実などが重要と思われる。法人化とともに各大学はその特色を出すことが求められ、この連携関係を今後より発展させる必要性とは、相容れない面がでてきているように思われる。各大学独自の基盤整備とともに、共同利用機関と大学の連携を促進するような枠組みを構築して、予算の人員的交流を活発化することが肝要と思われる。

3.4.4 国際協力・国際対応

予算規模の増大とともに次世代の大型計画は必然的に国際協力が前提となってきた。地上望遠鏡については、観測条件の良い設置場所を選ぶ必要性からも国際協力が不可欠となってきた。このような中、大学や共同利用機関の法人化により国際協議の自由度が増した面は評価できる。その一方、コミュニティー全体での意向決定や優先順位の議論をする場の位置づけが不明確になった面があり、自由競争と日本全体としての戦略の議論検

討を行う場の再構築が課題となっているのではないだろうか？

3.4.5 コミュニティーによる検討経過

光赤外線天文学のコミュニティは 2010 年代の光赤外天文学を展望し、すばる望遠鏡やあかり衛星に続く将来計画を検討するため、2003 年 1 月に光赤外天文連絡会と理論天文学懇談会の有志の呼びかけで将来計画検討会を発足させ、約 2 年間の検討結果を 2005 年 3 月に「2010 年代の光赤外天文学：将来計画検討報告書」としてとりまとめた。

その総括（同報告書、P38）は、長期指針として（1）すばる望遠鏡に続く地上計画として次世代 30m 級望遠鏡（仮称 JELT）計画の具体化、（2）スペースミッションとしては SPICA 計画を最重点計画として具体化、（3）これらの計画のピアレビュー、（4）法人間協力体制の整備、（5）大学の基盤整備、（6）国際協力の推進体制、の重要性を唱った。

その後、光赤外天文連絡会主催の検討会や、国立天文台の光赤外専門委員会、JAXA 宇宙科学研究本部の宇宙理学委員会、各大学内委員会等での度重なる検討を経て、個別計画はさらに練られ、2007 年 12 月と 2008 年 5 月には日本学術会議第 3 部会主催のワークショップでは、光赤外線以外の将来計画も俯瞰した報告・検討が行われるに至っている。

3.5 X 線・ガンマ線観測計画

3.5.1 はじめに

(1) 分野の現状

[X 線]

宇宙からの X 線は 1962 年、ロケット観測で偶然に発見された。初期に進められた銀河系内の明るい X 線連星の観測では、太陽の 10 倍程度の質量のブラックホールの存在が明らかになった。X 線観測はその後、銀河団には銀河の総計 5 ～10 倍もの質量をもつ、数千万度の超高温プラズマが存在することを明らかにするなど、宇宙の理解に不可欠な道具として発展を続けてきた。星の終焉の姿である白色矮星、中性子星、そしてブラックホールにおける極限環境の理解、また地上の加速器では到底実現できないほど高いエネルギーを持つ宇宙線の加速環境などの研究は、X 線天文学の進展とともに進んできた。日本は 1979 年の「はくちょう」を皮切りに、「てんま」、「ぎんが」、「あすか」、「すざく」と 5 機の X 線衛星を継続して打ち上げ、この分野に大きく貢献している。

現在は「すざく」（2005 年 7 月に打ち上げ）が、アメリカの Chandra、欧州宇宙機構の XMM-Newton と並んで活躍中である。しかし、これらの衛星も、やがてその任務を終える。後継機となる次期 X 線天文衛星 ASTRO-H（旧称 NeXT）は現在、日本の X 線天文学のコミュニティが総力をあげ、2013 年度の打ち上げをめざし世界各国の研究者と共に開発中である。ASTRO-H は、マイクロカロリメータによる超高分解能の X 線分光観測と、はじめての硬 X 線領域での集光撮像観測などによる 0.3 ～600 keV という 3 桁を超す広帯域・高感度の観測により、銀河団プラズマの速度分布の測定、ブラックホール周辺での一

般相対論的な時空の歪みの計測、厚い物質に隠された巨大ブラックホールの観測を通じたブラックホールと銀河の共進化の研究など、宇宙の構造形成やエネルギー的な進化を知る上で、鍵となる観測に挑戦する。

より小型の計画としては、2000～2007 年、日本（理研、東工大、青学大）と米仏の協力による HETE-2 衛星がガンマ線バーストの即応観測を行い、2 種類のバーストの起源を明らかにする大成果を挙げた。2009 年 7 月には、全天 X 線モニター装置 MAXI (Monitor of All-sky X-ray Image) がスペースシャトルで打ち上げられ、国際宇宙ステーションの日本実験モジュール「きぼう」の船外プラットフォームに設置され、8 月より稼働を開始した。

[ガンマ線]

ガンマ線天文学は、1952 年、早川幸男により宇宙線相互作用からのガンマ線が予測されるなど、X 線天文学よりも長い歴史を持つが、エネルギーが高くなるに従って光子数が少なくなるうえ、検出が難しいことなどにより、進歩が遅れていた。初期の SAS-2 や COS B 衛星以降、ガンマ線天文学に目覚ましい進歩が始まったのは、1989 年にヨーロッパの Granat、1991 年にアメリカの Compton Gamma Ray Observatory (CGRO) が打ち上げられた以降である。21 世紀にはいり、INTEGRAL(2002 年)を皮切りに、Swift (2004 年)や AGILE (2007 年)が打ち上げられ、さらには GeV 領域で格段の感度向上をめざすフェルミガンマ線宇宙望遠鏡が 2008 年に打ち上げられた。Swift は HETE-2 の後を受けてガンマ線バースト研究に新展開をもたらし、フェルミは打ち上げ直後から GeV ガンマ線において多くの新天体を発見するなど、その高い感度を誇っている。これらの二つの衛星には、日本のチームが積極的に参加している。日本でも「すざく」に搭載された硬 X 線検出器は、様々なアイデアにより、数 10 keV の硬 X 線から 600 keV 前後の軟ガンマ線の領域で高い感度を実現し、これにより日本も自前の科学衛星で、軌道上ガンマ線天文学に踏み出すことになった。

超高エネルギーの TeV ガンマ線は、大気との衝突のさいチェレンコフ光を発するため、地上から観測することができる。しかし大気に突入する高エネルギー宇宙線陽子なども、同様にチェレンコフ光を発生し、ガンマ線観測の雑音となる。この雑音を克服し、大気チェレンコフ望遠鏡が実際に TeV 領域の宇宙ガンマ線の観測装置として確立するまでには、時間を要した。1989 年、大型の光学反射鏡の焦点面に多数並べた光検出器でチェレンコフ光の像をとらえ、ガンマ線起源と原子核起源のシャワーを識別するイメージング技法が実用化されるに及び、世界各地で解像型チェレンコフ望遠鏡が建設され、超高エネルギーガンマ線天体が数多く観測されるようになった。日本では 1992 年より「カンガルー」望遠鏡が日本とオーストラリアの国際共同で開始され、規模を拡大しながら観測を行っており、現在は複数の望遠鏡からなる「カンガルー III」が稼働している。

(2) 目指す目標

現代の天文学では、異なる波長域で、匹敵する深さと広さで観測を行うことは、きわめて重要である。とくに X 線からガンマ線までは、波長にして 12 桁にも及ぶため、観測の目標も広汎である。高エネルギー天体物理学から観測的宇宙論に関わる研究、宇宙線や素粒子に関わる研究などの観点から、広範な議論が行われ、それを満たすための将来ミッションの計画が検討されている。その流れは、ASTRO-H およびそれに続く大型の汎用 X 線天文台ミッションと、JAXA が策定した小型科学衛星計画に代表されるように、機動力を活かした特色のある小型ミッションの 2 つに大別できる。以下、それらの目標を「初期天体の形成」と「高エネルギー粒子」という二つの観点から述べ、§3.5.2 ではここ 10~20 年で提案されている具体的な諸計画を紹介する。宇宙線に関する記述は§3.6 に譲る。

(a) 初期天体の形成

赤方偏移にして~2 から数十にかけての宇宙は、現在に近い宇宙の姿が仕込まれた重要な時期である。そこでは宇宙の大構造が成長し、最初の銀河が形成され、その中で星形成が起きたと想像される。この時代を探る上で、光赤外線での深宇宙探査の重要性は言うまでもないが、それと呼応した X 線の観測もきわめて重要である。なぜならこの時期、銀河中心には同時に、巨大ブラックホールが成長したと考えられており、濃いガスに包まれ成長するブラックホールを探るには、X 線が不可欠だからである。さらにこの時代、ダークマターの塊としての銀河団が合体を通じて成長し、その中では、可視光で見える銀河よりはるかに大量の高温プラズマが、重力場で加熱され、閉じ込められたと考えられる。その過程を解明する上で、X 線に勝る観測手段は無い。

より個別のテーマで重要なものの一つが「隠れたバリオン」である。宇宙のヘリウム量、宇宙初期の元素合成理論、および宇宙論パラメータから、宇宙のバリオン物質の総量は高い精度で決まる。ところが検出ずみのバリオンの量は約 20%に過ぎず、残る大半は未検出である。この「隠されたバリオン」は温度 10 万~100 万度の中高温銀河間物質 (Warm-Hot Intergalactic Medium: WHIM) として、銀河団同士を結ぶダークマターのフィラメントに沿って分布して、軟 X 線を放射すると考えられており、その検証が急務である。もう 1 つは、第 1 世代の星がどのように重元素を合成し、それらがいつ宇宙空間に捲き散らされたかであり、これも銀河団プラズマなどの X 線分光観測で探ることが可能である。

(b) 高エネルギー粒子の研究

宇宙の理解の大枠は、物質や放射が宇宙の各所で平衡状態、あるいは準静的な状態にあるという"自然"な仮定に基づいてきた。それにも拘わらず、現実の宇宙の姿は著しく非一様で非平衡であり、平衡・準静的な宇宙から離れ、多様性に向けて進化している。広大な宇宙の中では、必ずしも粒子間でエネルギーが等配分されず、大量の低エネルギー粒子が持つエネルギーを少数の高エネルギー粒子が奪い続けるという、常識はずれの過程がしばしば進行する。こうした「エネルギーの非等分配」という物理過程は、宇宙物理の未開拓の研究分野として、大きな謎に包まれており、21 世紀の重要なテーマとなっている。こ

れを理解するには、生成される非熱的粒子を精度よく捉える必要があるが、それらの放射は電磁波の広い帯域にわたり連続的なエネルギー分布をもつため、狭い特徴的な帯域に現れる熱的放射よりずっと観測が難しい。そこで、X線からガンマ線にかけての広大な帯域において、高い感度とともに、十分な角分解能とエネルギー分解能をもつミッションを実現できれば、宇宙のどこで粒子がどこまで加速され、作られた非熱的な粒子が宇宙のエネルギー総量にどれだけ寄与するか、また、熱的エネルギーがどのように粒子の運動エネルギーに変換されるかを知ることができると期待される。これは「すざく」から ASTRO-H、さらにその先につながる、大きなシナリオとなっている。

MeV ガンマ線領域には、ブラックホールの最深部の情報、銀河の非熱的エネルギーの大半を占める GeV 程度のエネルギーを持つ陽子の総量や加速過程、超新星爆発における不安定原子核の生成、さらには宇宙初期に大量に形成されたと考えられるマイクロブラックホールの蒸発現象など、重要な課題が数多い。にもかかわらず、検出感度を高めることが難しいため、X線や GeV/TeV ガンマ線での観測に比べ、大きく遅れている。今後、日本の優れた検出器技術を用いた研究開発を進め、ミッションを検討していくことが必要である。

3.5.2 観測装置の諸計画

(1) スペースからの観測 【IXO】

現在、大規模な国際協力にもとづいて計画されている次世代宇宙 X 線ミッションに IXO (International X-ray Observatory) がある。これは、ヨーロッパと日本が共同提案してきた XEUS 計画と、アメリカが提案する Constellation-X 計画が統合され、日本を含む世界の X 線天文コミュニティの総力を結集した大型ミッションである。日本では、ASTRO-H の次にコミュニティ全体で行うべきミッションとして認識されており、ヨーロッパでは Cosmic Vision、米国では Decadal Survey における評価のプロセスを経る必要がある。IXO の X 線望遠鏡は、5 秒角という高い解像度と、1 keV で 3 平方メートルという巨大な有効面積（過去最大の XMM Newton の数十倍）を併せ持つ計画で、これにより $z=5\sim 10$ にある最初の巨大ブラックホールだけでなく、 $z=2$ の銀河団すら分光観測可能となり、§3.5.1 (2) で述べた目標の多くに、強力な手段となる。検出器としては、透過型の回折格子や TES カロリメータなど超精密分光素子のほか、X 線 CCD を用いた広視野観測装置、それに組み合わされる硬 X 線撮像素子、X 線偏光検出器などが搭載される予定である。日本は、冷凍機システム、TES カロリメータシステムや硬 X 線撮像のための多層膜技術、X 線 CCD や硬 X 線撮像素子など、これまで培った技術により、広い参加をめざす。

(2) スペースからの観測：そのほかの計画

【FFAST】

FFAST (Formation Flight All-Sky Telescope) は、 $20\text{m}\pm 10\text{cm}$ の距離に制御された二機の

小型衛星を、ほぼ同じケプラー軌道上に編隊飛行（フォーメーションフライト）させ、硬X線領域で広い天空を観測する走査型衛星である。一機を、特別な表面処理をした硬X線反射鏡による望遠鏡衛星、もう一機を硬X線イメージャーを搭載した焦点面検出器衛星として、80keVまでのエネルギー範囲で観測する。10 keVを超える領域での望遠鏡を用いた天体走査観測は、世界で初めての試みである。ASTRO-H に続く打上げを目指し、小型科学衛星シリーズの1つとして提案されている。広い天空を観測し、活動銀河の質量関数やその進化の様子を探る。

【DIOS】

DIOS (Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor) 計画の目的は、高いエネルギー分解能による広視野 ($\sim 1^\circ$) の撮像分光により、赤方偏移した酸素の K 輝線をマッピングし、§3.5.1 (2) で述べた隠れたバリオンを検出するとともに、宇宙の大構造を直接に探ることである。観測系は、4 回反射 X 線望遠鏡(FXT)と、TES 型 X 線マイクロカロリメータアレイ(XSA)からなり、ASTRO-H の 2 年後の 2015 年ごろの打上げを目指し、小型科学衛星シリーズの1つとして提案されている。

【CAST】

100 keV から ~ 3 MeV という未踏のエネルギー領域で、最高感度の撮像分光観測を実現することで、宇宙の高エネルギー現象の理解を飛躍的に高めることを目的とする。ASTRO-H のガンマ線検出器を発展させた「半導体コンプトン望遠鏡」技術を用いてガンマ線の入射方向を高い精度で知ること、感度の向上を図る。明るい天体では、数 100 keV 帯域の偏光測定も狙う。基本は全天サーベイ型の小型衛星として小型科学衛星シリーズの1つとして提案されているが、フランスなどとの国際協力により、数分角の角度分解能をもつガンマ線レンズを併用し、サーベイとポインティングを組み合わせたオプションも検討中である。

【Polaris】

X 線天体の偏光は、過去に 1 個の天体（かに星雲）から、限られたエネルギーで実測されたのみで、X 線天文学に残された未開拓分野の一つである。X 線の偏光観測により、超新星残骸やブレーザーからのシンクロトロン放射、ブラックホールの降着円盤の時空構造、パルサーの磁場配位、ガンマ線バーストの輻射機構などが解明できると期待される。これに挑戦するのが、X 線ガンマ線偏光観測衛星 Polaris (Polarimetry Satellite) で、小型科学衛星シリーズの1つとして提案されている。この衛星は X 線偏光検出器と硬 X 線用反射鏡により、代表的な種族を網羅する数十個の明るい（かに星雲の 1/100 以上の明るさの）X 線天体に対し、X 線偏光度と偏光方向をワイドバンド(4-80keV)で測定するとともに、広視野ガンマ線偏光検出器でガンマ線バースト現象などの偏光測定をめざす。

(3) 地上からの観測【CTA】

2000 年代初頭より稼働を始めた H.E.S.S. や MAGIC などの大型チェレンコフ望遠鏡の活躍により、TeV ガンマ線天体は 90 個を超えるまでになった。さらに一桁以上の感度向上と、観測領域を低エネルギー側(10GeV)と高エネルギー側(100TeV)の双方に拡大することを目指して、EU を中心とした大型国際計画 **CTA (Cherenkov Telescope Array)** の検討が進んでいる。CTA では観測可能な TeV 天体の数が現在の 100 程度から 1 桁向上する。日本からもハードウェアの貢献を含めた参加表明が出されている。

(4) 地上からの観測：その他の計画

米国でも CTA と同様の目的を持つ AGIS (Advanced Gamma-ray Imaging System) 計画が検討されている。一方、銀河宇宙線の起源の解明に焦点を絞り、10 TeV 以上のガンマ線観測に特化して大面積を目指す **TenTen** 計画もオーストラリアを候補地に検討されており、日本からの貢献が見込まれている。

【チベット空気シャワー観測装置を用いた 100TeV 領域の宇宙ガンマ線観測】

高地で展開する唯一の大規模宇宙線観測装置である日中共同のチベット空気シャワー装置を発展させ、地下ミューオン観測装置を新設することにより、100 TeV 領域のガンマ線と、“knee” エネルギー前後の一次宇宙線化学組成を小さな系統誤差で観測することを目指す計画も検討されている。

表 3-3 X 線ガンマ線観測諸計画まとめ

名称	目的	計画概要	代表者、提案・推進主体	予算規模	進捗状況
IXO (International X-ray Observatory)	初期宇宙での巨大ブラックホールの成長を観測し、巨大ブラックホールと銀河の共進化、あるいは、銀河団の観測を通じた大規模構造の進化の解明をめざす。	NASA/ESA/JAXA 協力大面積 X 線望遠鏡。1keV で 3 平方メートルという巨大な有効面積と 5 秒角の角度分解能を実現する。	國枝秀世(日本側)、 NASA/ESA/JAXA	250 億円程度 (日本分担)	ヨーロッパ Cosmic Vision Program に欧日共同提案。米国 Decadal Survey に提案。日本は WG 活動中
CTA (Cherenkov Telescope Array)	TeV ガンマ線源のサーベイ、非熱的成分の解明、宇宙線の加速機構の解明。	既存の装置より、一桁以上の感度向上と、観測領域を低エネルギー側と高エネルギー側双方に拡大	Werner Hofmann(全体代表)・戸谷友則(日本側)、京大、東大宇宙線研究所	20-30 億円 (日本分担)	2008 年より Desing Study 開始、2013 年より建設開始予定、ヨーロッパとの国際協力
FFAST (Formation Flight All-Sky Telescope)	10 keV を超える領域での望遠鏡を用いた初めての掃天観測により、埋もれた活動銀河核の光度関数や宇宙進化の解明。	二機の小型衛星を、ほぼ同じケプラー軌道に編隊飛行させ、硬 X 線領域で広い天空を観測する 80keV までのエネルギー範囲を観測する。	常深博、阪大・名大・神戸大・JAXA 他	70-80 億円 (小型衛星)	WG 活動中

DIOS (Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor)	中高温銀河間物質(WHIM)の出す酸素の輝線を捉え、ミッシングバリオンを見つける。	TES カロリメータと広視野望遠鏡による WHIM の空間分布の直接観測	大橋隆哉、首都大学・名古屋大・JAXA 他	70-80 億円 (小型衛星)	WG 活動中
CAST (Compton All Sky Telescope)	MeV ガンマ線サーベイ、粒子加速の総エネルギーの解明、電子陽電子対消滅線の検出。	次世代半導体コンプトンカメラによる広視野ガンマ線(数 100 keV – 数 MeV) サーベイ	中澤知洋、東大・埼玉大・阪大・JAXA 等	70-80 億円 (小型衛星)	WG 活動中
PolariS (Polarimetry Satellite)	偏光 X 線観測によって、降着円盤や降着流れの構造、超新星残骸の磁場構造、ガンマ線バーストの放射機構に迫る。	焦点距離6m の多層膜硬 X 線反射鏡を4 台と、その焦点面に設置する2 種類(散乱型、ガス型)の X 線偏光計で構成する X 線ガンマ線偏光観測装置。	林田清、阪大・金沢大・山形大他	70-80 億円	WG 活動中
チベット実験	宇宙線一次観測によって、100TeV 領域(10-1000TeV)ガンマ線天文学を進め、宇宙線の化学組成を Knee 領域で明らかにする。	既存の高感度広視野空気シャワー観測装置 Tibet-III に、水チェレンコフ大型(約 10,000m ²)地下ミューオン観測装置を新設する。	瀧田正人、東大宇宙線研究所、中国との国際協力	9.5 億円	提案中、建設機関は3 年

3.5.3 技術開発の課題

日本では、従来からの高エネルギー天文学に加え、宇宙線観測や素粒子実験において高い技術力を確立しており、それらの技術を融合する形で、X線やガンマ線などの天文学を切り開いてきた。今後、こうした分野との連携をより一層発展させることが必要である。

より遠方あるいはより微弱な天体の観測において、可視光や赤外線将来計画と並び立つには、X線望遠鏡として、数秒角を切る高い角度分解能と数平方メートル以上の有効面積が必要となり、それを実現するための焦点距離は数十 m にも達する。このような X 線望遠鏡で、1 keV 以下の軟 X 線領域から数十 keV の硬 X 線領域までカバーすることは、今後の大きな技術課題である。他方、WHIM のように薄く広がった X 線信号の探査においては、X 線望遠鏡としては短焦点で視野を広げるなど、異なる設計が有利となる。

衛星搭載の X 線検出器としては、大別して 4 つの方向が重要となる。第 1 は Polaris 計画など、未開の次元である X 線偏光に挑むもので、光電子追跡型とコンプトン散乱型に分類できる。第 2 は 10 keV 以下の領域において、極限のエネルギー分解能を追求するもので、ASTRO-H のカロリメータや、DIOS で開発中の TES 型分光検出器など、いずれも極低温を必要とする。第 3 は、ASTRO-H の硬 X 線撮像装置や、米国で開発中の NuSar 衛星に代表されるように、数十 keV までの硬 X 線領域で撮像を行う画像検出器で、テルル化カドミウムなどのシリコンよりもはるかに重い元素の半導体素子が有力である。最後は、CAST 計画にみられるように、数百 keV～数 MeV 領域という、観測が難しく「感度の谷間」となっている帯域に挑むもので、ASTRO-H や大気球実験などで開発が進む半導体やガスを用いたコンプトンカメラのように感度を向上させるための新しい工夫が、大きな有効面積と高いバックグラウンド除去効率とともに、不可欠である。

大気圏外での観測では、大型の望遠鏡や検出器を搭載する衛星そのものの開発も重要である。焦点距離が長い X 線望遠鏡の場合、衛星全体を望遠鏡ととらえた設計を行う必要がある。そのために軌道上での指向精度や方向制御、冷凍機を搭載した場合の冷却、熱ひずみに対する対策など、高精度の観測を行う上で、同時に解決をはからなければならない課題が多い。また衛星が大型化するにつれて、実現までの時間が長くなりコストも上昇する結果、新しい観測テーマに即応しにくくなる。そこで 100～500kg 程度の重量ながら、低コストで迅速に実現することができる小型の科学衛星が共通の技術基盤として検討されており、2012 年頃には第一号機が実現する見込みである。

解像型チェレンコフ望遠鏡に関しては、大口径の望遠鏡を用いて、より低エネルギー側に観測するエネルギー範囲を広げるための開発や、イメージングの解像度を高めるための新しい光検出器の開発が必要である。システムとしての性能を向上させるために、多くの望遠鏡を高地に設置する計画についても議論されており、限られたコストの中でより感度をあげるための技術開発が求められている。

3.5.4 国際協力・国際対応

日本は、X線天文学の黎明期より、独自の衛星計画を持ち、連続して計画を進めてきた。特にスペースシャトルの事故などにより、世界のX線天文学において空白が生じそうになった時に、英国および米国との国際協力で「ぎんが」衛星を開発し、世界に貢献したことは高く評価された。その後、「あすか」衛星では、X線検出器やX線望遠鏡が日米協力に基づき開発され、国際的な観測公募の枠組みが導入され、得られたデータも国際標準に基づいたフォーマットでアーカイブされ、解析ソフトウェアも標準化された。こうした国際協力の体制は「すざく」でさらに発展し、ASTRO-H 衛星においても受け継がれている。今後はアジア諸国とのより密接な協力関係を育てていくことが目標となろう。

日本のX線コミュニティは、自国の衛星に海外の研究者を招致するだけでなく、Swift、フェルミ衛星、また最近アメリカで採択されたX線偏光衛星 GEMS など、海外の衛星の開発に積極的に参加している。観測目標の高度化に伴って、観測装置は必然的に大型化の道に進んでおり、それを搭載するための衛星は大規模な国際協力にて実現される。その中心となる IXO 計画に日本も世界の3極の一つとして参加していることは、§3.5.2で述べた。こうした大型の国際協力でも、また中小ミッションにおいても、有効な国際協力を進める上での要件は、日本がサイエンスの主要分野をリードすることと、特色ある先導的技術（スーパーミラー、化合物半導体素子、冷凍機、極低温検出器、高性能 CCD、ガス電子増幅フォイルなど）を有することである。

TeV ガンマ線観測において日本は、解像型チェレンコフ望遠鏡の黎明期より大きく貢献し、「カンガルー」望遠鏡を実現して成果をあげてきた。今後は、より感度をあげるための国際協力計画が議論されており、日本がどのように関わっていくかが焦点となっている。

3.6 宇宙線・ニュートリノ観測計画

3.6.1 はじめに

(1) 分野の現状

山梨県明野村に建設された 100 km^2 をカバーする空気シャワー観測装置 AGASA による 1990 年から 2002 年までの 13 年間の観測から、 10^{20} eV を超えるエネルギーを持つ宇宙線が 11 例報告された。これは Greisen-Zatsepin-Kuz'min (GZK) 効果から予想されるカットオフを超える宇宙線が存在することを示唆し、その解釈を巡り様々な議論が沸き起こった。この結果を受けた次世代の実験として、アルゼンチンに $3,000 \text{ km}^2$ の有効面積を持つ地上検出器と 4 か所の大気蛍光ステーションを建設した Pierre Auger 国際共同実験の初期結果が最近報告された。得られたエネルギースペクトルには GZK 効果が効いていることが示唆され、最高エネルギー領域の宇宙線の到来方向分布が近傍の活動銀河核と相関があるという示唆とともに話題を呼んでいる。日米共同の Telescope Array 実験は、AGASA の 10 倍の面積の地上検出器と 3 か所の大気蛍光検出ステーションを建設し、ユタで 2008 年本格稼働を開始しており、待望の北天の観測結果がまもなく提供される。

より低エネルギーの宇宙線のエネルギースペクトルには、 10^{15} eV 付近に“Knee”と呼ば

れる構造があり、スペクトルのべきの値が低エネルギー側の -2.7 から高エネルギー側の -3.0 に変化することは早くから知られてきた。宇宙線が銀河系に閉じ込められなくなって漏れ出していく可能性や、高エネルギー宇宙線の起源と考えられてきた超新星残骸における粒子加速の限界に対応している可能性などが指摘されてきたが、このエネルギー領域では、宇宙線の化学組成の情報は非常に限られていることもあり、それらの起源と伝播についての統一的な理解には至っていない。最近の大型気球実験や、AMS-01・PAMELA など衛星搭載実験の進展により、低エネルギー側では精度の良いデータが揃いつつあるが、検出面積や観測時間に限りがあり、高エネルギー側では統計量を稼ぐのは難しいため、空気シャワー現象を利用した間接的測定によらざるを得ない。日中共同チベット空気シャワー装置や、ドイツの KASCADE 実験の結果は、モンテカルロ計算のモデルに依存する面もあり、一致した結果が得られていない。また、最近 PAMELA 実験から数十 GeV 以上で陽電子の過剰が報告され、気球搭載の ATIC と PPB-BETS から報告されている 600 GeV 付近の電子スペクトルのピークと合わせ、その成因に大きな関心が寄せられている。

宇宙線荷電粒子は、宇宙の磁場で曲げられてしまうので、到来方向がわからない。よって宇宙線の加速源を特定するには、加速源で生成される2次的な中性粒子（X線、ガンマ線、ニュートリノ）を用いることが有効である。じつさい宇宙線の電子成分に関しては、それらが発するシンクロトロンX線を手掛かりに、パルサー星雲、超新星残骸、活動銀河核からのジェットなどで、TeV を越すエネルギーまで加速が起きていることが明らかになった。ガンマ線バーストも加速源として注目されている。しかし宇宙線の主体であるハドロン成分は、光子放射率が低いことから、その加速場所に関する手掛かりは乏しかった。

ここに新たな進展をもたらしたのが、昨年打ち上げられたフェルミ・ガンマ線宇宙望遠鏡 [§3.5.1 (1)] である。その初期結果により、星間分子雲から放射される広がった $0.1 \sim 10$ GeV のガンマ線は、宇宙線ハドロンが水素原子などと衝突して作られる π^0 粒子が、二体崩壊したものとして説明できることがより確実となった。これにより今後、地球から離れた場所での宇宙線強度が調べられ、また宇宙線ハドロンの加速源が特定されると期待される。ATIC の報告した電子の過剰ピークは、フェルミでは確認されていない。

天体からの高エネルギーニュートリノ探索は、これまで地下の核子崩壊実験装置や、深海や湖、南極の氷を利用した実験で試みられてきたが、検出が期待できる感度には届いていないのが現状である。

(2) 目指す目標

荷電粒子としての原子核成分や電子成分に加え、ガンマ線やニュートリノを含めた宇宙線の諸成分を、最高エネルギーに至るまで広域で精度良く測定し、地球に降り注ぐ高エネルギー宇宙線はどこでどのようにして誕生し、地球まで飛来するのかという、1912 年の宇宙線発見以来の「宇宙線起源の謎」を解明することが最終目標といえる。方法としては、荷電粒子を直接間接にとらえる方法、高エネルギー宇宙線の加速や伝搬の過程で生じるニ

ニュートリノを探索する方法、同様に 2 次光子を用いる方法、などに大別される。

ただし一口に「宇宙線の起源」といっても、その内容は多岐にわたる。電子だけでなくハドロン成分（陽子）の加速源を特定すること、そこでの到達エネルギーを陽子と電子と独立に知ること、加速のメカニズムや効率を解明すること、ハドロン成分の化学組成を知ること、太陽系近傍で測定された宇宙のフラックスとスペクトルを、加速源候補の足し合わせで再構築すること、宇宙線の銀河系内での伝搬を定量的に解明すること、GZK 限界や超 GZK 粒子の存在に決着をつけること、などが列挙される。さらにダークマター粒子の崩壊もしくは対消滅の信号を探索し、地上の加速器で到達できない $>1\text{ TeV}$ のエネルギー領域で未知の素粒子現象を探索するなどの野心的なテーマも検討されている。

3.6.2 観測装置の諸計画

(1) 最高エネルギー宇宙線観測計画

Pierre Auger や Telescope Array のような大規模実験でもなお、得られる最高エネルギー宇宙線の数統計的に十分とはいえないため、さらに次の世代の実験が構想されている。Pierre Auger 実験は北半球にもより巨大な装置の建設計画を持っているが、これまでと同様の手段を用いる地上観測は限界に近いと考えられるため、宇宙からの蛍光観測を行う **JEM-EUSO** や、シャワーからの電波観測など、新しい検出法が検討されている。

【JEM-EUSO】

口径約 2.5m で約 60 度の視野を持つ超広視野望遠鏡を、国際宇宙ステーション日本実験棟 (JEM) の曝露部に搭載することを目指す **JEM-EUSO** 実験では、最高エネルギー宇宙線が空気中で起こすシャワーの発する蛍光を 400km の高度の宇宙から観測し、200,000km² という巨大な有効面積をカバーすることができるため、3 年間の観測で最高エネルギー宇宙線 1000 例以上の観測が期待できる。

(2) 高エネルギー宇宙線観測計画

“Knee”領域宇宙線の観測状況の改善を図る地上空気シャワー装置では、チベット空気シャワーアレイを増強する **YAC** が提案されている。一方、飛翔体を用いて一次宇宙線を直接観測する **CALET** 計画が検討されている。

【CALET 計画】

宇宙線中の高エネルギー電子を観測すると、エネルギー損失が大きく近傍からしか飛来しないという特性から、粒子の加速源が特定しやすいという利点がある。この観測を主目的とする **CALET** 実験は、国際宇宙ステーションの JEM 曝露部に搭載することを目指しており、これまでの気球実験に比べ飛躍的に大きな統計量を稼ぐことが可能である。この装置では GeV 領域のガンマ線や“knee”領域までの荷電宇宙線の測定も行うことができる。特に数十 GeV のガンマ線に対しては、Fermi ガンマ線宇宙望遠鏡より高いエネルギー分解能を持ち、宇宙ダークマターが対消滅して生じるガンマ線により高い感度を持っている。

(3) ニュートリノ観測計画

最高エネルギー宇宙線が荷電粒子である限り、宇宙背景放射の光子との衝突（GZK 効果）の際に、荷電パイ中間子が生成され、その崩壊から高エネルギーニュートリノが生み出される。また、宇宙線を加速する天体では、高エネルギーハドロンと周囲の物質との相互作用からニュートリノが放出される。ニュートリノは物質との相互作用断面積が小さいため、その検出には膨大な標的質量が必要である。しかし、太陽ニュートリノなどの低エネルギーニュートリノに比べ、高エネルギーニュートリノの反応で放出される荷電粒子は元のニュートリノの方向を保持するため、放出している天体を特定することが可能である。日本も参加して南極で氷などが建設中の **IceCube** は 1 立方 km の氷をカバーし、2012 年に完成予定であるが、外側への拡張と、電波検出装置の付加も検討されている。EU が共同で推進している **KM3NeT** も、同様の規模の装置を地中海の深海に展開することを目指している。両者が北半球と南半球をカバーすることにより、活動銀河核など高エネルギー天体からのニュートリノ探索が全天で可能になる。最高エネルギー宇宙線観測装置でもニュートリノが起こす上向きや山体からの横向き空気シャワーからの蛍光により観測が可能であり、**Ashra** 実験の準備もハワイ・マウナロアで進められている。しかし、GZK ニュートリノの検出にはこれらの装置でも十分とはいえず、さらに高感度の装置が必要である。**JEM-EUSO** では年に数例の検出が期待されており、電波や音波による検出法も検討されている。

一方、陽子崩壊の探索を主な目的とする 100 万トンクラスの大型水チェレンコフ検出器として検討されている**ハイパーカミオカンデ**は、ニュートリノをプローブとした天文学の観測装置でもあり、超新星爆発や過去の超新星爆発に由来するニュートリノや、太陽ニュートリノの観測を高精度で行い、超新星爆発過程の解明や、ニュートリノの性質の研究を行うことができる。

表 3-4 宇宙線ニュートリノ観測諸計画まとめ

名称	目的	計画概要	代表者、提案・推進主体	予算規模	進捗状況
JEM-EUSO (Extreme Universe Space Observatory on ISS/JEM)	10 ²⁰ eV を超える超高エネルギー宇宙線を 3 年で 1000 例とらえ、エネルギーと到来方向を測定し、その起源を明らかにする。	国際宇宙ステーションの日本実験棟曝露部に、口径 2.5m のフレネルレンズを用いた望遠鏡を設置し、6000 個の光電子増倍管で宇宙線シャワーの蛍光をとらえる。	戎崎俊一、理化学研究所および国際協力(日本、米国、フランス、ドイツ、イタリア、メキシコ、韓国など)	120 億円 (日本担当分 60 億円)	JAXA 「きぼう」第 2 期利用ミッション Phase-A 研究、2013 年打ち上げ予定。
CALET (CALorimetric Electron Telescope)	TeV 領域の高エネルギー電子・ガンマ線、及び 1000 TeV 領域に至る陽子・原子核成分を観測し、宇宙線の加速・伝播機構を定量的解明し、近傍ソースを検出する。	国際宇宙ステーションの日本実験棟曝露部に、イメージングカロリメータを用いた高エネルギー粒子線観測装置を設置して観測を行う。またガンマ線バーストモニターを設置する。	鳥居祥二、早稲田大学理工学研究所および国際協力(日本、米国、イタリア、中国)	60 億円 (日本担当分 40 億円)	JAXA 「きぼう」第 2 期利用ミッション Phase-A 研究、2013 年打ち上げ予定。
IceCube Neutrino Observatory	TeV から EeV(=10 ⁶ TeV) にわたる高エネルギー宇宙ニュートリノ検出による宇宙線起源の探求、及びニュートリノによる非加速器素粒子実験。高エネルギーニュートリノを生成する宇宙線放射機構の解	南極点直下の深氷河にチェレンコフ光検出器アレイを埋設し、1 ギガトンの検出容量を持たせる。さらにその周辺にアウトリガー光検出器及び電波検出器アレイを敷設し、年間 40 例以上の EeV 以上の超高エネルギーニュートリノを捕らえる。	吉田滋、千葉大学理学研究科および国際協力(日本、米国、スウェーデン、独、ベルギー、英国、ニュージーラン	30 億円 (周辺拡張検出器のみ)	1 ギガトン検出器アレイは 2011 年 1 月完成予定、2009 年現在約 7 割の検出器が稼働。アウトリガー検出器は検討段階、電波検

	明、ダークマター探査、素粒子標準模型を超える現象の探索を行う。		ド)		出器アレイはフェーズⅠ計画が日本、米国、ベルギーを中心に提案中。
ハイパーカミオカンデ（Hyper Kamiokande）	超新星や太陽ニュートリノなどの宇宙ニュートリノの精密測定により、超新星爆発過程の解明やニュートリノの性質の研究をする。また、加速器とタイアップし、ニュートリノセクタでの CP 破れの研究などを推進する。	総重量 1 0 0 万トンの水チェレンコフ装置を地下に設置する。	東大宇宙線研究所および高エネルギー加速器研究機構を中心に、国内の共同利用、国際協力研究として行う。	750 億円	スーパーカミオカンデが、本計画のプロトタイプに相当。新しい光センサーの開発が進行中。ワーキンググループが詳細設計を進めている。

3.6.3 技術開発の課題

(1) 光検出器

チェレンコフ光や大気蛍光を利用する検出法では、ほとんどの場合いかに光子を効率良く集めて多数の光電子を得るかが問題になる。有感面積の大きさと反応時間の速さから、光電子増倍管が用いられてきたが、従来型の光電子増倍管の量子効率¹は 20・30%であった。光電面の改良により、最近は高量子効率型が利用できるようになったが、従来型とただちに置き換え可能な状況には至っていない。さらに高効率な光検出器として、ハイブリッド型光電子増倍管や、半導体を用いた **Multi-Pixel Photon Counter (MPPC)** が開発されている。前者はコストや必要な高電圧が高くなることが問題である。後者では 50%を超える量子効率²が得られ、低コスト化が期待されるが、有感面積を大きくすることが難しい。実用に向けて、企業との協力のもとにさらなる開発研究が求められている。

(2) 電子回路とデータ収集

装置の規模が大きくなるにつれ、必要な電子回路のチャンネル数も増大するため、高速処理のできる電子回路を、コストを抑えつつ大規模に構成することは常に課題になってきた。さらにデータの質を向上するため、信号波形の記録を行なうと、取得データ量は膨大になり、データの転送速度やデッドタイム、記録方法の問題が浮上する。衛星上の装置では地上とのデータ転送速度が制限となる。また、地上に大規模に展開された装置では、検出器間の距離が大きくなるため、ユニット毎に分散してデータ取得と処理を行い、ネットワークを通じて転送して中央で記録する必要が生じ、分散した検出器間で同期をとる二次・三次トリガーのリアルタイム処理の問題も起こるなどの課題を克服する必要がある。

(3) データハンドリング

収集された膨大なデータを蓄積し、そこから必要な事象を探し出して処理する計算能力も規模の拡大とともに要求が大きくなっていくため、より効率の良いデータハンドリング技術や高速のネットワークが求められている。さらに、大規模装置による観測データはアーカイブとして公開が求められる傾向が高まっており、外部ユーザーにとって使いやすい形で提供するための努力も求められることになろう。

以上(1)-(3)の課題は、高エネルギー実験の検出器や他の衛星搭載機器と共通するものも多く、情報を交換して共同で開発を行うことが効率的であり、奨励されるべきであろう。

3.6.4 国際協力・国際対応

次世代の大型計画は予算規模も増大し、必然的に国際協力が前提となる。日本の宇宙線グループは、実験の最適地を求めて世界中に観測基地を広げてきた実績をもつが、多くの国が対等な立場で参加する大規模な国際協力実験においても、日本グループが重要な貢献を行ないリーダーシップを発揮できるよう、計画と体制を練り上げていく必要がある。

3.7 ダークマター探査計画

3.7.1 はじめに

(1) 分野の現状

重力レンズ探査から、ダークマターが天体である可能性は相当低くなってきている。そのため、現状で最も可能性の高い素粒子、特に弱い相互作用のみをする素粒子の直接探査実験が世界中で活発に繰り広げられている。バックグラウンドの低い地下にターゲットを設置し、地球に飛来するダークマター粒子がごくまれに起こす衝突を測定する実験である。

直接探査実験では、ダークマターの反応の起こりやすさ、すなわち散乱断面積および、銀河系のダークマターが地球に飛来するフラックスが、測定の鍵を握る。フラックスが大きければターゲットとの衝突が起きる回数がそれだけ多くなるからである。我々の銀河系ハローには、ダークマターは 0.3 GeV/cm^3 の密度で存在するとされ、地球はダークマターの海を平均 260 km/s で突き進んでいる。地球からみると、ダークマターは、はくちょう座の方向から地球の銀河系に対して運動する速度に比例し、またダークマター粒子の質量に反比例するフラックスで飛んでくるように見える。同じ重力を生み出すのに、粒子1個当たりの質量が大きいと、数密度は反比例して少なくなるからである。さらに銀河系に対して地球が $\pm 30 \text{ km}$ の速度で公転することにより、フラックスは季節変動する。

現在までに多くのダークマターの直接探査実験が行われているが、まだ、確実に検出に成功したものはない。イタリアの DAMA グループ (NaI の結晶を用いた実験) が、季節変動を観測したとして、ダークマターの質量 $30\sim 90 \text{ GeV}$ 程度で、スピンに依存しない相互作用断面積が $3\times 10^{-42}\sim 3\times 10^{-41} \text{ cm}^2$ のあたりにダークマターの存在を主張している。また、最近それを発展させた実験でも同様の結果を得ている。しかし他の実験、例えば CDMS-II (Ge および Si の結晶を用いた実験) やキセノンを使った実験などは、DAMA の主張する質量・断面積領域を否定している (たとえば CDMS 実験は $4.6\times 10^{-44} \text{ cm}^2$ まで否定)。矛盾する結果をうまく説明しようとする理論もあるが、DAMA の結果は広く認められているとはいえない。

ここ数年、ダークマターの直接探査実験は、スケールが大型化する時期を迎えている。これは、ターゲットが、これまでの高純度結晶から、アルゴン、ネオンやキセノンなどの稀ガスへと移行してきたからである。現在いくつかの実験が、断面積で 10^{-45} cm^2 程度の感度を目指してしのぎを削っている。日本の XMASS 実験 (フェーズ I) を含め、ターゲットの有効質量が 100 kg 程度の実験が測定を開始しようとしている。これまでの、チャンピオンであった CDMS は、Super-CDMS として検討が進んでいる。

(2) 目指す目標

宇宙のあらゆる階層で、ダークマターの存在は示されている。WMAP 衛星等の観測結果によれば、宇宙の物質・エネルギーの 73% は宇宙の加速膨張の源で、いまだに全くその

正体のわからないダークエネルギーであり、23%は重力の作用でしかその存在を知ることができないダークマターである。我々の知っている物質は、わずかに 4%である。ダークマターの存在は、銀河の回転速度の観測からかねてから知られていた。安定で、質量が重く（おそらく陽子の 100 倍以上）、電荷を持たないダークマター(Weakly Interactive Massive Particles) は新しい素粒子ではないかと考えられている。したがって、ダークマターを直接観測により捕え、その正体を解明することは、ダークマターがその任を負っているとされる宇宙の構造形成の起源をより正確に知るだけでなく、新しい素粒子の発見につながる。地球上の検出装置で、ダークマターと物質の相互作用を直接観測することにより、ダークマターの相互作用の強さ、スピン依存性、質量などの諸性質が分かり、ダークマターの正体を解明する大きな手がかりを得ることになる。ダークマターの研究は、宇宙物理学、素粒子物理学の両方にまたがる大きなテーマである。

3.7.2 観測計画

次世代のダークマター実験は、断面積の感度として、現在進行中の実験のさらに 2 桁先の 10^{-47}cm^2 を狙うものである。もし進行中の実験で、ダークマターの信号が検出されれば、季節変動などの精密測定に向かうことになる。一方で、 10^{-46}cm^2 以下の領域にはいると、低エネルギーの pp-太陽ニュートリノが観測されるようになる。これは太陽物理学にとっては大きな情報となるが、ダークマター測定にはバックグラウンドになる。そこで、次世代測定器では、電子と原子核反跳の区別が重要である。また、もう一つの大事な将来の検出器の方向性は、ダークマターの飛来方向を観測するものである。外国では、大規模な将来計画の提案は出てきているものの、詳細な検討はまだ行われていない。

将来の計画の策定に関しては、日本が一步先んじている。10 年前に計画された国内の実験計画である XMASS 実験は、もともと有効質量 10 トンの液体キセノン検出器で、ダークマターの探索だけでなく、pp-太陽ニュートリノの観測、二重ベータ崩壊検出 (^{136}Xe) によるニュートリノのマヨラナ性の確立と質量の測定など、複合目的を持っている。ダークマターへの感度は、 10^{-47}cm^2 以下になることが期待され、超対称性理論から予想されるダークマター存在領域へ大きく切り込むことができる。測定器はシンプルにデザインされており、ダークマターが液体キセノンと反応するときに発する微弱な蛍光を、検出器内壁の 64%を覆う光電子増倍管を用いて高感度に検出するものである。測定器の外側 20~30cm は外来放射能（ガンマ線など）に対する自己遮蔽とし、その内側を実際の実験に用いる。直接探査においては、スピンの依存した反応と、スピンの依存しない反応を分けて検出が行えることが望ましいが、キセノンでは同位体の分離により、偶核・奇核に分けることが可能で、反応を分けた測定も可能であるというユニークな特徴がある。現在進行中のフェーズ I 計画は、100kg の有効質量でダークマターに特化したものであり、 10^{-45}cm^2 程度の反応断面積までを目標に、今後 4 年間で実験が進められ、本計画である XMASS 実験に移行する予定である。

もう一つのアプローチは、ダークマターの飛来方向を測定し、「地球に吹き付けるダークマターの風」を検出することであり、これにはダークマターによる反跳原子核の方向が測定できる測定器を作る必要がある。ガス検出器はその候補であり、低圧にする必要があるため有効質量を大きくできないという欠点があるが、ダークマターとしての確実な証拠を得ることができるという利点ももつ。世界を見渡しても、ほとんどの検出器はまだ開発・試作段階である。原子核乾板を用いた装置も計画されているが、低圧のガス検出器、特にタイム・プロジェクション・チェンバー(TPC)を用いるものが主流になっている。いかにして大型の検出器で分解能良く反跳原子核の方向を計測できるかがポイントである。

日本では、このアプローチとして、三次元微細飛跡検出器「マイクロ TPC」を用いた実験計画 NEWAGE がある。すでに、プロトタイプ検出器により中性子を用いた反跳原子核の飛跡をとらえることに成功しており、将来が期待される。日本のダークマター探査計画は、技術的にも高く、実験の感度も世界最高レベルに達しており、大型検出器、指向性検出器という二面からの可能性を持っている。

表 3-5 ダークマター検出計画まとめ

名称	目的	計画概要	代表者、提案・推進主体	予算規模	進捗状況
XMASS-II (Xenon neutrino MASS detector II)	ダークマターと物質の反応の直接検出を行い。ダークマターの質量や反応断面積の測定を行う。	10 トンの液体キセノン測定装置により、ダークマターが液体キセノンとの反応により生ずる蛍光を測定する。感度は、スピンに依存しない断面積に対して 10^{-47}cm^2 である。副次的成果として、pp-太陽ニュートリノの観測が可能になる。	鈴木洋一郎、東京大学宇宙線研究所神岡宇宙素粒子研究施設	90 億円	現在、1 トンのキセノンを用いたフェーズ I 装置での研究を進めている。この成果を踏まえ、速やかにフェーズ I I に移行する。

3.7.3 技術開発の課題

ダークマター探索実験は、いかに低バックグラウンドを実現するかという技術にかかっている。実験の感度を一桁上げるためには、バックグラウンドも状況に応じて低減してなければならない。その技術開発は、測定器を作る素材そのものの純化、低バックグラウンド化から始まって、ガンマ線や中性子等バックグラウンドをひき起こす粒子の低減策まで、広い範囲にわたる。また、それぞれの検出技術に固有の開発要素もある。

将来に向けた新たな検出技術開発も世界中で活発である。2つの泡箱プロジェクトが進んでいる。PICASSO は、 C_4F_{10} を用いた泡箱検出器であり、泡生成時の音波をピエゾ素子で観測する。スピンに依存した相互作用断面積に対する感度として、次の 700kg の装置で $10^{-37}cm^2$ 、最終的に $10^{-39}cm^2$ を目標としているが、現在の装置は 2kg であり、まだ大規模な開発が必要である。COUPP(Chicagoland Observatory for Underground Particle Physics)も同様な測定器で、 CF_3I を用いる点が異なる。

3.7.4 国際協力・国際対応

次世代のダークマター実験は、もはや一つの国で行える規模を超えている。国際協力が必然であり、現在、情報の交換、技術の交換など、基盤的レベルでの国際協力が進められており、国際共同実験への道筋ができてつつある。

3.8 重力波観測計画

3.8.1 はじめに

(1) 分野の現状

現在、我が国が推進している大型重力波検出計画は、地上における検出器 LCGT と宇宙における検出器 DECIGO の2つである。LCGT は、一刻も早く国家レベルで推進すべき大型計画という位置づけであり、一方 DECIGO は 2001 年頃から検討が進められてきた LCGT の次の将来計画である。我が国の重力波研究のロードマップとしては、まず LCGT で重力波の初検出を行い、重力波天文学を創成し、次に DECIGO でさまざまな重力波源からの重力波を頻繁に検出し、LCGT によって開かれた重力波天文学をより発展させるというシナリオである。この2つの計画は、計測方法としては基本的に同じ技術を使うため、LCGT で成熟した技術を DECIGO に応用するという関係を持つ。

LCGT については第4章において詳しく述べられるので、ここでは DECIGO 計画の目的、概念設計、ロードマップ、現状、国際的な位置づけなどについて解説する。

(2) 目指す目標

重力波の直接検出の重要性は、それが単に一般相対性理論の検証となるだけでなく、重力波を通して宇宙の謎を解き明かす、いわゆる重力波天文学創成の可能性を秘めている点にある。重力波は確かに検出するのが非常に難しい。それは物質との相互作用が極めて小

さいからである。つまり重力波は何でもほとんど素通りしてしまうのである。しかし、これが逆に天体の観測という点から見ると非常に強力な武器となる。例えば、宇宙が電磁波に対して晴れ上がる時期（宇宙誕生の 38 万年後）よりずっと以前の宇宙開闢の様子や、中性子星やブラックホール同士の衝突なども重力波によって直接観察することが可能である。したがって、重力波天文学は電磁波や宇宙線による天文学と相補的に、我々がより深く宇宙を理解することを可能にしてくれるのである。

3.8.2 観測装置の諸計画

(1) LCGT

LCGT 計画については、第 4 章で詳しく述べられるので、ここではその位置づけの記述に留める。1990 年代から世界各地で始まった大型レーザー干渉計の建設と観測実施に引き続き、現在では、重力波の確実な検出を目指す第二世代の検出器の開発が進められている。LCGT はその 1 つとなる、超高感度レーザー干渉計である。目標感度は、最大で 6 億光年先で起こる中性子星連星の合体から発生する重力波が観測できるように設定されており、これにより 1 年に数回以上のレベルで重力波の検出が期待される。それにより一般相対性理論の検証を行い、また、超新星爆発、ブラックホール連星の合体、パルサーからの重力波なども検出し、重力波天文学を創成することを目標としている。

LCGT の基線長は 3 km であり、鏡はその熱振動（ブラウン運動）を低減するため 20K にまで冷却される。光源は 100W レベルのレーザーを用い、量子雑音を最適化するため、帯域可変型干渉計が用いられる。検出器は地面震動の小さい神岡の地下に建設され、超高防振装置を組み込むことにより、地面震動の影響をさらに抑えこむ予定である。

LCGT は東京大学宇宙線研究所をホスト機関として、国立天文台および高エネルギー加速器研究機構が協力して推進する国際共同計画であり、国内外の研究者 120 余名からなる研究組織により推進されている。

(2) スペース重力波アンテナ DECIGO

スペース重力波アンテナ DECIGO の目的は、初期宇宙起源の重力波や宇宙論的な距離にある天体からの重力波を観測し、宇宙の起源や構成に対し、電磁波では得られない（または相補的な）知見を得ることである。以下その具体的な目的をいくつか挙げる。

- a) 初期宇宙からの重力波：3 K 宇宙マイクロ波背景放射の揺らぎなど様々な観測事実は、宇宙初期（ 10^{-36} ～ 10^{-34} 秒後）にインフレーションと呼ばれる急速な膨張時期があったことを強く示唆する。そこで、DECIGO によってインフレーションの時期に生成された背景重力波を検出し、インフレーションの存在を確認し、その特徴を明らかにする。
- b) 宇宙の膨張加速度の計測：遠方の超新星爆発の観測は、宇宙の膨張が加速していることを示唆し、その要因は、「ダークエネルギー」に起因すると説明されている。そこで、DECIGO によって、遠方の中性子星連星からの重力波波形を測定し、超新星の観測と

は全く異なる手段で、宇宙の膨張加速度を直接的あるいは間接的に決定する。

- c) 巨大ブラックホール形成のメカニズムの解明：銀河の中心には太陽質量の $10^6 \sim 10^{10}$ 倍の質量を持つ巨大ブラックホールが存在するが、その生成過程はまだよく分かっていない。そこで、DECIGO により宇宙の広い範囲で起こる、中間質量ブラックホール連星からの重力波を検出し、巨大ブラックホールの形成のメカニズムを解明する。

これら以外にも DECIGO の目的は数多くあり、物理、天文、宇宙論を含めた広い意味での天文学として、非常に大きな成果を挙げることが期待できる。

DECIGO は図 1 に示すように、1,000km 離れた 3 台の人工衛星から構成される。3 台の衛星は、いずれも、いわゆるドラッグフリー衛星 (drag free 衛星。衛星の中に作った空間に物体を浮かせて、その物体が重力以外の力 (太陽輻射圧など) を受けないように、回りの衛星の姿勢・軌道を制御するようにしたもの。) とし、衛星間の距離は、重力波の到来によって微小に変化するので、その距離の変化をレーザー干渉計により測定する。DECIGO の技術的な特徴は、光共振器を使うことで装置の感度を高めている点にある。これは、日本の重力波グループがこれまで進めてきた、地上干渉計の極限技術を応用したものである。目標感度は $0.1 \text{ Hz} \sim 10 \text{ Hz}$ で重力波の引き起こすひずみに対して $1 \times 10^{-23} \text{ Hz}^{-1/2}$ 程度である。この 3 台の人工衛星から構成される DECIGO 3 組を 1AU 程度離して太陽周回軌道に配置することにより、重力波源の方向に対する高い角度分解能を持たすことができる。また、背景重力波に対する感度を高めるため、2 組の DECIGO を同じ位置に配置し、その関連データをとることを行う。

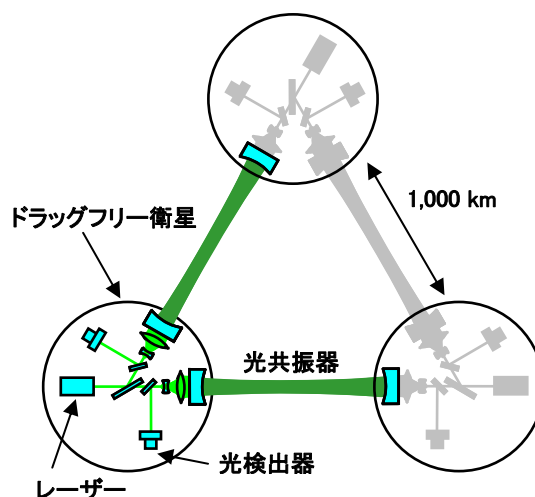


図 1: DECIGO の構成

DECIGO は 2024 年の打ち上げを目標としているが、その実証過程として、2012 年に DECIGO パスファインダー (DPF)、また 2018 年には Pre-DECIGO という、2つの前駆ミッションを打ち上げる計画である。DPF では1つの衛星の中に2つの鏡を浮かせ、その距離を光共振器を用いて計測する。目的はドラッグフリー衛星の技術試験と計測技術の宇宙空間での確認をすること、そして地上では困難な 10 Hz 以下の重力波の観測を、可能な限りの感度で行なうことである。Pre-DECIGO では、最小限のスペックをもって重力波を検出するというサイエンスの目的も掲げるとともに、離れた衛星の間を光共振器で結ぶという鍵技術の実証も目指す。

DECIGO は現在、予備概念設計が完了し、より詳細な概念設計を完成させる作業を継続中である。また、DPF は JAXA/ISAS における小型科学衛星 WG として活動を開始しており、できるだけ早い段階での打ち上げをめざして、提案を行っている。

表 3-5 重力波観測諸計画まとめ

名称	目的	計画概要	代表者、提案・推進主体	予算規模	進捗状況
LCGT	①重力波を直接観測し、伝播速度、横波の性質等を確認し、一般相対論の検証を行う。 ②連星中性子星合体や超新星爆発で発生する重力波及び中性子星からの連続重力波等の検出により重力波天文学の創生。	神岡地下に設置される高感度レーザー干渉計である。200Mpc 程度までの重力波観測を行い、1 年の観測で確実に重力波を検出する計画である。レーザー干渉計の基線長は 3km であり、干渉計の鏡は懸架系とともに 20K にまで冷却される。高感度をめざし世界で初めて地下設置と低温鏡を採用する。	黒田和明、日本国内の重力波研究者の総意に基づいて提案され、東京大学宇宙線研究所がホスト機関として、国立天文・KEK と協力して推進する。	158 億円	TAMA と CLIO と呼ばれる装置によって技術開発と実証試験を行ってきた。現在は装置建設のための概算要求中である。
DECIGO	①インフレーション時の重力波直接観測。 ②遠方の中性子星連星からの重力波で、宇宙膨張加速度の計測。 ③銀河中心の巨大ブラックホール形成のメカニズムの解明。	1,000km 離れた 3 台のドラッグフリー衛星間の、重力波によって引き起こされる距離の変化を、光共振器型レーザー干渉計により測定する。目標感度は 0.1 Hz~10 Hz で重力波の引き起こすひずみに対して $1 \times 10^{-23} \text{ Hz}^{-1/2}$ 程度である。	川村静児、国立天文台・JAXA/ISAS など。欧米などとの国際協力は必須。	1000 億円	まずは、DECIGO Pathfinder による技術実証を目指す。

3.8.3 技術開発の課題

DECIGO の最大の特徴は、後述の LISA 計画などで用いられる光トランスポンダ方式ではなく、光共振器を使う点にある。これにより一般的に、光トランスポンダ方式に比べて感度を上げることが可能であるが、力の雑音に対する要請がより厳しいものになる。光共振器で感度を上げることが可能かどうかは、今後の研究にかかっている。

日本では未経験のドラッグフリー衛星の実現、そして 3 台の衛星によるフォーメーションフライトなども、これからの技術開発の課題である。

3.8.4 国際協力・国際対応

欧米ではスペース重力波アンテナ LISA 計画が推進されており、またその後継機である BBO の検討も最近になって開始された。LISA は 500 万 km 離れた 3 台の衛星から構成され、目標感度は 1 mHz~10 mHz で重力波の引き起こすひずみに対して $1 \times 10^{-20} \text{ Hz}^{-1/2}$ 程度であり、目的としては巨大ブラックホールの合体や銀河内の白色矮星連星の公転運動からの重力波の検出である。BBO は DECIGO と同程度の目標感度・周波数帯域を持ち、目的に関しても DECIGO と共通する部分が多い。

DECIGO の国際的な位置づけとしては、LISA の次を狙うものであり、BBO に匹敵するものである。いずれにせよ、DECIGO と BBO との融合を視野に入れた、両グループの緊密な国際協力が望まれるものであり、実際 2008 年 11 月には LISA と DECIGO の国際協力の第一歩として大きな意義を持つ第 1 回 LISA-DECIGO 国際ワークショップが日本で開催された。

3.9 太陽観測計画

3.9.1 はじめに

(1) 分野の現状と動向

わが国の太陽物理学は、「ひのとり」(1981 年)、「ようこう」(1991 年)、「ひので」(2006 年)の 3 機の太陽観測衛星を実現し、宇宙からの太陽観測で世界をリードしてきた。「ようこう」は、軟 X 線・硬 X 線で、太陽フレアやダイナミックに変化する高温の太陽外層大気(コロナ)を撮像観測し、激しい活動性の起源は磁気リコネクションであることを初めて実証的に示した。「ひので」は、コロナ観測とともに太陽表面(光球)での磁場構造の変動を高解像度・高精度に測定し、アルヴェン波と考えられる波動の初検出に成功し、これまでの想像を大きく上回る激しい現象(ジェットなど)に満ち満ちた光球・彩層の活動性を明らかにしつつある。現在、コロナの活動性や加熱と光球での磁場構造の変動の関係などを解明することを目的として、精力的に研究が進められている最中である。

衛星による観測と相補的な役割を果たす地上の太陽光学観測は、国立天文台・乗鞍コロナ観測所、京都大学・飛騨天文台を中心に行われてきた。しかし、主たる観測装置が 30 年以上を経過し、具体的な将来計画を立案する時期に差し掛かっている。また、野辺山電波ヘリオグラフによる太陽フレア爆発における加速粒子の電波放射等の観測は、1992 年から継続的に行われている。

(2) 目指す目標

「ひので」の最新成果も踏まえて、太陽物理分野として今後 10~20 年に重点的に取り組むべき科学課題の柱として、以下の 2 つがあげられる。

- a) 太陽大気のダイナミクス・加熱の物理プロセスの定量的な理解
- b) 太陽磁場の生成起源および太陽周期活動の理解

このうち a) は、「ひので」の動画観測が初めて明らかにした激しい大気活動性(ジェットや波動現象、大気加熱)に注目し、それらの現象の背後に存在する、空間的にも時間的にも分解できていない要素的な物理素過程を理解することを目指す。偏光分光観測による現象の物理量診断(速度・磁場など)を、彩層を中心に光球からコロナに至る太陽大気にわたり行うことが重要である。この課題設定は、天体プラズマに共通する物理を、分解して観測可能な太陽プラズマという環境下にて定量化をはかることでもある。これらの太陽観測による研究は、太陽磁気活動が地球周辺の宇宙空間や人間生活にどのような影響を与えるかについて理解を目指す「宇宙天気」の基礎的研究においても重要な役割を果たす。

b) については、太陽大気の活動性や加熱を引き起こす源としての太陽磁場が太陽内部でどのような機構で生成されるのか、またその磁場がどうして約 11 年の周期で変動するのか、という太陽・恒星磁場の起源の理解を目指すものである。近年の観測的、理論的研究から、対流層深部に磁場の起源が存在することが示唆されており、対流層深部の運動を詳細に調べるためのブレークスルーとなる観測が期待されている。その一つの可能性が、こ

れまで流れや磁場の詳細な観測がなされていない太陽極域の探査である。また、数 10 年以上にわたり継続的に行われる太陽全面磁場・速度場等の長期連続観測は、太陽周期活動の研究の基礎となるものである。

これらの科学目的の達成のためには、2020 年頃の太陽活動極大期での観測が重要であり、2010 年代後半に「ひので」に続く新しい太陽ミッション「SOLAR-C」を実現させたい。また衛星観測と相補的な役割を果たす地上観測設備の拡充も重要な課題である。

3.9.2 観測装置の諸計画

(1) 太陽観測衛星「SOLAR-C」

次期太陽観測衛星「SOLAR-C」は、§3.9.1 (2) で述べた 2 つの目標のどちらかに主眼を置くかにより、a) 分光観測・偏光観測に重点をおいた高解像度観測・高時間分解能観測で、ダイナミックに変動する太陽磁気プラズマ活動性の物理素過程を探査する「偏光分光観測ミッション」、あるいは、b) 黄道面を離れた視点からの観測により未踏の太陽極領域を探査する「太陽極域観測ミッション」、のいずれかをを目指す。

a) の選択肢は、「ひので」で開花したサイエンスをさらに深化させ、天体プラズマで働く物理素過程の定量的な理解をはかるミッションである。磁気リコネクション、加熱、アルヴェン波、超音速流などの現象を、「ひので」と同程度の解像度で、彩層起源の吸収線の偏光分光観測によりとらえ、その物理的理解を進めるものである。さらに、その上空の遷移層やコロナでは、「ひので」の輝線分光観測（2 秒角程度の解像度）から、画像では分解できない複数の運動成分があることが見出され、より細かい構造のあることが明確になってきた。このような激しい運動は、彩層のすぐ上空の遷移層・コロナ下部で発生しており、エネルギー解放領域と考えられるその現場を高解像度観測で捉えることは、天体物理学で基本的な難問であるコロナ加熱の物理過程を理解する上で、極めて重要なステップである。彩層偏光分光観測と同程度の解像度で、物理過程を探るのに必要な高時間分解能の遷移層・コロナの撮像・分光観測が必要となる。

b) の太陽極域観測ミッションでは、軌道半径 1AU 程度、太陽赤道面から傾斜角 45 度以上に離れることで、これまで地球からでは好条件での観測が難しかった、太陽高緯度・極領域の詳細な探査を行なう。この未知領域における対流の様子、磁場の形態、太陽周期にわたる磁気量変化などは、太陽の対流構造や磁場の形成機構の理解を飛躍的に高めると期待される。日震学的な手法を用いることで、高緯度・極領域の自転角速度、子午面還流、極磁場反転の現場を確実に測定することが可能となり、太陽ダイナモ理解のために重要な基礎量を観測から決定できるほか、対流層底部で実際に磁場が生成されている証拠を探索することが初めて可能となる。太陽極領域はまた、800 km/s もの速度に加速される高速太陽風の吹き出し口として知られているが、望遠鏡および分光装置によるリモートセンシング観測と「その場」観測により、その加速機構の本質に迫ることが期待される。

(2) 太陽望遠鏡

地上観測は、衛星観測と相補的な役割を持ち、地上観測でのみ実施可能な課題もある。地上観測と衛星観測の相乗効果により、科学成果が飛躍的に上がることは、「ようこう」「ひので」が行ってきたサイエンスの成果からも明らかである。地上からの太陽研究の主要な柱の一つは、太陽全面磁場・速度場等の長期連続観測による太陽周期活動の研究であり、もう一つの柱は、高分解能観測による磁気プラズマ現象の機構解明である。中でも現象のエネルギー源および構造形成を担う磁場の高精度観測が重要であるが、「ひので」が明らかにしたように、彩層構造はフィラメント構造（0.1 秒角以下）からなり、ダイナミックな変化（10 秒以下）を示す。コロナ加熱、コロナ質量放出現象などコロナ中には未解明の重要問題が残っているが、これは彩層でも同様で、むしろ彩層の方が大きなエネルギーを加熱に必要としており、地上観測の重要なテーマとなる。

現在、国立天文台、京都大学、北見工大を中心に、高精度偏光観測、像補正、赤外観測など、必要となる基礎技術の開発が進んでいる。また「ひので」可視光望遠鏡の資産も元に、地上太陽観測設備を持つ国立天文台・太陽観測所、京都大学・飛騨天文台からのメンバーを中心としたワーキンググループで、今後の地上太陽観測の将来計画が策定されつつある。オプションとして、(1)日本独自の望遠鏡（口径 2m クラス）を適地に置く、(2)国際協同により望遠鏡を実現する、(3)すでに実現されつつある望遠鏡（例えばアメリカの後継 4m 望遠鏡計画 ATST）へ日本から観測装置を提供し、共同利用による観測時間を獲得する、という 3 案があり、(1)が有力視されている。

表 3-6 太陽観測諸計画まとめ

名称	目的	計画概要	代表者、提案・推進主体	予算規模	進捗状況
SolarC	<u>プランA</u>（太陽極域観測ミッション）：太陽の対流構造や磁場の形成機構、太陽風加速機構の解明。 <u>プランB</u>（偏光分光観測ミッション）：彩層・コロナにおけるダイナミックに変動する太陽磁気プラズマ活動性の物理素過程の解明。	<u>プランA</u>：黄道面を離れた視点から、太陽極領域の日震学的速度場観測、および、望遠鏡・分光装置によるリモートセンシング観測を行う。 <u>プランB</u>：高空間分解能・高時間分解能観測による彩層・遷移層・コロナの分光観測・偏光観測を行う。	常 田 佐 久 、 JSAS/JAXA、国立天文台	中型	2017 年打ち上げ目標。
太陽望遠鏡	太陽全面磁場・速度場等の長期連続観測による太陽周期活動の解明と、高分解能観測による磁気プラズマ現象の機構を解明する。	日本独自ないし国際共同によって、後継 2m クラスの望遠鏡を適地に置く。あるいは、すでに実現されつつある望遠鏡へ日本から観測装置を提供し共同利用による観測時間を獲得する。	末松芳法、国立天文台・太陽観測所、及び京都大学・飛騨天文台	20 億円	2013 年頃。

3.9.3 技術開発の課題

SOLAR-C の 2 案のうち、太陽極域観測ミッション案は、黄道面を離脱し太陽の極域観測を行うミッションであるため、サイエンスと並んで「衛星」(探査機)のシステム的な成立性が重要な課題となる。他方の案である偏光分光観測ミッション案は、「ひので」可視光望遠鏡で成し遂げた宇宙望遠鏡の開発技術の延長線上にあると位置づけられ、偏光分光観測のための特徴を持たせた、観測望遠鏡の開発が重要な課題である。

地上観測については、太陽望遠鏡の大口径化、リアルタイム像補正システムの実用化、赤外用 2 次元検出器などの技術的改善が必須である。大口径化はすでに海外では進行中で、1.5m クラス (米国、ドイツ) が建設中、口径 4m 太陽望遠鏡計画 (米国 ATST) が 2015 年頃ファーストライト予定で予算化を目指している。日本でも、高精度偏光観測、像補正、赤外観測など基礎技術の開発を進めており、これをさらに推進することが必要である。

3.9.4 国際協力・国際対応

SOLAR-C ミッションについては、Science Definition 国際会議等の場で、太陽極域観測ミッション案と偏光分光観測ミッション案ともに科学的意義が極めて高いと、著名な海外研究者による評価を受けた。ミッションの実現には国際協力は必須であり、ESA および NASA とともに、ミッションの具体化について検討を進めている。

3.10 太陽系探査計画

3.10.1 はじめに

(1) 分野の現状

1970 年頃より太陽系形成に関する理論的研究が進められ、原始惑星系円盤が進化して惑星系が形成される過程として、円盤中のダストから微惑星ができ、微惑星の衝突合体により原始惑星が形成され、原始惑星の巨大衝突により惑星ができるという描像が構築された。また惑星の多様性が、原始惑星系円盤におけるガスの散逸と密接な関連をもつことも明らかとなった。隕石の研究からは、太陽系形成は今から 46 億年前にさかのぼり、数百万年以内に火成活動をおこす小天体が形成されていたこと、隕石中にはラセミ体のアミノ酸が含まれることも明らかとなった。他方 1995 年以降、天文観測により太陽系以外の惑星系が数多く発見され、星の直近を巨大ガス惑星が周回する惑星系や、軌道離心率のきわめて大きな惑星系の存在が明らかとなった。この結果、星と惑星系の関係が改めて検討され、惑星軌道の多様性が惑星表層環境の多様性を生むこと、軌道の多様性には星と円盤の相互作用や、原始惑星系円盤からのガス散逸のタイミングがきわめて重要であることが明らかとなった。さらに、星のサイズと惑星の軌道により生命存在可能 (ハビタブル) な惑星の存在しうる条件が限られることも明らかにされてきた。

惑星系と生命の存在は、今や惑星科学のみならず、天文学から生命科学にわたる、あらゆる自然科学の中心的な課題の一つとなっている。しかし、惑星はそれぞれ異なる組成、

内部構造、大気、表層、惑星を取り巻くプラズマ環境をもち、太陽系の惑星の多様性の理解は、惑星系と生命の存在に関する研究にとってますます重要性を高めている。

日本における太陽系探査は、磁気圏探査を皮切りに進展してきた。1970年代後半から、地球周辺に磁気圏の「その場観測」のためのいくつかの探査機が軌道投入され、なかでも1989年に打上げられた「あけぼの」と1992年に打上げられた GEOTAIL は、20年近い年月を経た今も、観測を継続している。1985年に地球に接近したハレー彗星に向けては、太陽系空間探査機「さきがけ」と「すいせい」が相次いで惑星間軌道に投入され、わが国の太陽系探査の幕が切って落とされた。1990年に、日本初の月探査機として「ひてん」が打上げられ、ミッション後期には月の周回軌道に投入された。1998年には、火星周回衛星計画として「のぞみ」が火星への軌道に投入され、探査機の不具合により、火星周回軌道投入は果たせなかったものの、太陽系内を航行する高い軌道制御技術が確立された。2003年には、小惑星探査機「はやぶさ」が打ち上げられ、2005年に、小惑星「イトカワ」へのタッチダウンに成功した。2007-2009年には、アポロ以来の本格的月探査機である「かぐや」が月周回軌道に投入され、月の内部構造探査を含む大きな成果をあげつつある。

(2) 目指す目標

惑星探査は、その天体に行くこと、それぞれの天体のまったく異なる物理条件に応じた探査を行うこと自体がきわめて大きな挑戦であり、強い工学的・技術的制約のもとに展開される。この点で、地球周回軌道において展開され、観測機器開発が新たな発展への鍵となる他の天文・宇宙物理探査ミッションとは、根本的に異なる。それぞれの天体が異なる物理環境にあることは、それを支える科学者コミュニティもそれぞれ異なることを意味している。固体惑星なのか、ガス惑星なのか、磁場があるか否か、大気があるか否か、始源的な天体なのか分化した天体なのかなど、その要素は多岐にわたっている。

こうした条件を踏まえた上で、惑星科学の進展を支えるこれからの日本の太陽系探査の科学目標は、以下の4つに絞ることができよう。

惑星の進化と多様性の解明：地球以外の惑星に生命存在に適した海洋・大気が存在しない理由、惑星の気候変動の究極的な原因、惑星磁気の発生消滅、地殻やマントルを駆動するエンジンなどを知るため、現在の環境と惑星誕生以来の46億年間の歴史を解明することが目標である。このためには、惑星大気の組成、運動、変化の他に、惑星そのものの内部構造の解明、表面の地形と組成などを明らかにしていく必要がある。

太陽系の起源の実証的解明：原始太陽系星雲から惑星がどのように形成されてきたかを解明する。このためには太陽系の初期の記録を残した始原天体を探査し、原始太陽系で起きたさまざまな物理・化学的過程を明らかにしていくことが必須である。

生命の発生、進化に必要な環境の解明：地球外生命を探索することは、生命科学を地球の生命科学から、より普遍的な宇宙生命科学に変える可能性を持つ。始原天体の有機物や揮発成分の探査、火星や外惑星の衛星であるエウロパ、タイタンなどにおける地球外生命、

太陽系外の生命居住可能惑星の探索を行うことは、人類にとって大きな意味をもつ。

宇宙プラズマ物理過程の根源的理解：人類が「その場」で観測することのできる唯一の宇宙空間、すなわち太陽系空間を用いると、宇宙プラズマ現象を明らかにし、惑星磁気圏の統一的理解を深め、多様な天体プラズマ現象の解明にも大きな貢献が可能となる。このためには太陽圏や地球以外の惑星磁気圏での「その場」観測とともに、地球磁気圏における超精密な観測が必要である。

これら4つの課題に挑戦する舞台として、それぞれ、月・固体惑星探査、始原天体探査、惑星大気探査、惑星磁気圏・太陽系プラズマ探査が当面のターゲットとなる。以下でそれらをより詳しく論じる。

3.10.2 太陽系探査の諸計画

(1) 月・固体惑星探査

月の起源と進化の解明は、単に月単体への興味だけでなく、その母星である地球の形成史を考える上でも重要な課題である。また月表層環境には太陽系 45 億年の歴史が刻まれており、太陽系の形成史を解明する上でも、月は重要な科学探査の対象である。

1990 年代に米国のクレメンタインやルナープロスペクターにより、月表層の全面探査が行なわれ、2007-2009 年には SELENE（かぐや）により、高解像度の地形データが取得されるとともに、化学組成・元素分布、磁場、重力場が高精度で計測された。その結果、斜長岩地殻の組成や、表と裏の内部の熱進化の違いの証拠が得られた。今後、月のコアの有無、コアがある場合はそのサイズ、地殻の厚さ、マントルの均質性、裏と表という二分性の広がりやその成因など、根本的な問題を解明するため、SELENE シリーズによる継続的な地表探査を行いつつ、最終的には月に着陸し、岩石を地球に持ち帰ることを目指す。

【SELENE-2】

無人着陸機、月面探査車、中継用小衛星から構成される計画で、アポロやルナによる探査のおこなわれていない地域の岩石やレゴリスの物質的証拠から、月地殻の物質・地域差を明らかにすること、地震計測・熱流量計測により、内部構造に関する情報を得て、月の内部構造と進化を明らかにすることなどを目的とする。具体的には、100m 程度の精度で目的地に着陸し、数 100m～2km 程度の範囲を探査車が移動し、地質調査、ロボットアームによる岩石・レゴリス分析などをおこなうことを目指している。

(2) 始原天体探査

太陽系に存在する小天体は、太陽系形成時の情報を維持していると期待される。これらの天体探査の目的は、太陽系の原物質、とりわけ、有機物と水という生命の起源につながる物質の始原天体における存在とその物質進化を解明すること、始原天体で起こる衝突など、微惑星進化をになう諸過程の理解にある。

【はやぶさ2およびマルコポーロ】

「はやぶさ」の活躍を受け継ぐはやぶさ2及びヨーロッパとの共同計画であるマルコポーロは、始原的な遠方の小天体に到着し、その場での観測・分析を行うとともに、サンプルを地球に持ち帰ることを目指す。目標とする小天体から得られる情報は、隕石から得られる情報を超え、太陽系や生命の起源につながる情報であることが望まれる。そのため、反射スペクトル型がC型的小天体や、より始源的と考えられているD型小天体探査からのサンプルリターンを検討している。

(3) 惑星大気探査

日本は2010年に探査機プラネットCを金星に投入し、惑星気象学の端緒につく。このミッションは、惑星本体の規模としては地球に酷似している金星が、それを取りまく大気や気候の面では地球と全く異なる理由を探るため、複数のカメラで大気の運動を3次元的に捉える。2年間にわたる大気運動のデータを統計的に扱い、金星大気中での波動などにより角運動量がどのように惑星本体から金星に受け渡されているのかを調べることが、最大の目標である。

火星は、地球の1/10というサイズで、地球形成以前の固体惑星進化を考える上で重要な天体である。同時に、過去において表層に流水が存在し、湿潤温暖な気候が存在したことが明らかにされており、現在のドライで低温の惑星に至った過程の解明が重要な課題である。アメリカは15年間にわたり、生命の存在の探査を最大目標にかかげた探査を進め、将来的にもその方向の計画が進められている。

木星はガスを主体とする惑星本体、磁気圏、ガリレオ衛星と、ミニ太陽系を構成し、その理解は、ガス惑星自体の形成進化とともに惑星系の形成進化に決定的な重要性を持っている。

【MELOS(Mars Exploration with Lander-Orbiter Synergy)計画】

「火星の大気進化の理解」を科学目標とする火星複合探査計画で、過去に湿潤温暖であったはずの火星が、現在の姿に至った原因の解明を目指している。具体的には、現在の希薄な大気の原因と考えられる大気散逸、全球の物質輸送を担っている惑星気象、大気と内部の接点である表層環境、進化のもっとも重要な要素であるコアと地殻の構造の理解、などをターゲットとする。そのため、二つのオービター（大気散逸科学、惑星気象学）、ランダー（固体惑星科学）からなる次期火星探査を2010年代後半に実現するべく、検討を進めている。

【木星システム観測（EJSM）計画】

EJSM（Europa Jupiter-System Mission）計画は、日欧米の共同計画で、木星本体、木星磁気圏、ガリレオ衛星を調査することを目的としている。科学目標は、木星の起源（岩石コアの有無）、木星システムのメカニズム（プラズマ-荷電粒子相互作用）、生命存在可能性（エウロパにおける地表下の海と生命探査）である。日本の役割としては、木星周回機による磁気圏探査の主導、トロヤ群へのランデヴー探査、ガリレオ衛星探査による木

星原材料物質、「木星系の起源」の解明が予定されている。

(4) 惑星気圏・太陽系プラズマ探査

磁気圏科学は、磁気圏そのものへの興味、人類の宇宙進出をサポートする宇宙環境理解というふたつの目標に加え、宇宙における磁場・プラズマ物理の根源的理解のために磁気圏における「その場」観測が目標となってきた。次世代計画では、宇宙プラズマの根源的理解へ向け、大きく異なる複数のスケール（MHDスケール、イオンスケール、電子スケール）での物理現象を同時に把握し、それらスケール間の結びつきを解明することを目指して掲げる。

【地球磁気圏探査SCOPE】

SCOPE (cross-Scale Coupling in the Plasma universE) 計画は、プラズマのマクロダイナミクス（流体としての振舞い）とマイクロプロセス（電子やイオンという粒子運動が関係するプロセス）との連動を明らかにすることをめざす計画である。対象となるのは、磁気圏尾部を含む様々な領域における、複数の物理過程のマイクロとマクロの側面である。そのため、5機の衛星が編隊を構成し、3機の編隊観測から大規模な電磁場・プラズマ流体の空間構造の把握を行いながら、同時に2機のペア衛星が電子計測・波動観測を超高速で行うことでマイクロプロセスを解明し、全体としてのプラズマダイナミクスの時空発展を観測する。遠地点の地心距離が30地球半径といった軌道を取ることで、プラズマ物理過程の根源的理解のために必要なマルチ・スケール観測を「その場」で同時におこなう。

表 3-7 太陽系探査諸計画まとめ

名称	目的	計画概要	提案・推進主体	予算規模	進捗状況
SELENE2 (SELEnological and ENgineering Explorer)	日本独自の計画。地質調査や岩石の分析から、月地殻の物質・地域差を明らかにすること、地震計測・熱流量計測により、月の内部構造、進化を明らかにすること	無人着陸機、月面探査車、中継用小衛星から構成され、100m 程度の精度で着陸、数 100m-2km 程度の範囲を探査車が移動し、地質調査、ロボットアームによる岩石・レゴリス分析などをおこなう。サンプルリターン、月面環境利用・調査も行う	JAXA	大型	プリプロジェクト段階にあり、概念設計を進めている
はやぶさ後継機	D型小惑星あるいは枯渇彗星核探査とサンプルリターンにより、太陽系起源物質および生命起源物質を明らかにすること	太陽系起源物質及び生命起源物質の探査を目的とし、試料採取・地球への帰還が重要な課題となる。そこで、リモートセンシング、ローバーによる表面調査、衝突機による内部の掘り起こし・試料採取等を行う	JAXA	中型	イオンエンジンの増強、大型太陽電池パドル、試料採集、着陸機、着陸ロボット衝突機検討中
SCOPE (cross Scale COupling in the Plasma universE)	地球磁気圏においてプラズマのマクロダイナミクスとマイクロプロセス連動を明らかにすることを目指す	5機の衛星が編隊を構成、多点同時観測を行う。3機編隊観測が大規模な電磁場・プラズマ流体の空間構造を、2機のペア衛星が電子計測・波動観測を超高速で行ってマイクロプロセスを解明、全体としてのプラズマ動力学の時空発展を観測する	JAXA	中型	プリプロジェクト移行前段階にあり、編隊飛行技術、国際協力などの検討を進めている

MELOS	火星の大気散逸、全球の物質輸送を担っている惑星気象、大気と内部の接点である表層環境、進化のもっとも重要な要素であるコアと地殻の構造の理解	「火星の大気進化の理解」を科学目標とする火星複合探査計画で、二つのオービター（大気散逸科学、惑星気象学）、ランダー（固体惑星科学）からなる	JAXA	大型	ワーキンググループ段階にあり、概念設計を進めている
EJSM	木星の起源（岩石コアの有無）、木星システムのメカニズム（プラズマ-荷電粒子相互作用）、生命存在可能性（エウロパにおける地表下の海と生命探査）を明らかにすること	日欧米の共同計画で、木星本体、木星磁気圏、ガリレオ衛星を調査することを目的としている。日本の役割としては、木星周回機による磁気圏探査の主導、トロヤ群へのランデブー探査、ガリレオ衛星探査による木星原材料物質、「木星系の起源」の解明	JAXA	大型	ワーキンググループ段階にあり、概念設計を進めている

3.10.3 技術開発の課題

月をはじめ、惑星内部構造探査に決定的役割をはたすのは、ペネトレータ（衝突貫入型プローブ）である。これは日本の独自技術であり、月以外の天体のネットワーク観測にも重要な役割をはたすことが期待されている。しかしその最初の搭載機会であった Lunar-A ミッションは、ペネトレータが技術的に未完成のため中止となった。今後ペネトレータ技術を完成させる際の課題としては、母船とペネトレータ間の通信系のロバスト化、シーケンス異常への対応、デジタル計測回路改修、ターンアラウンド時間の短縮、耐衝撃性機器の確立がある。月内部（地殻、マントル、コア）構造を定量的に決める基軸技術となる高感度広帯域地震計の開発は緊急の課題である。とりわけ高感度、安定計測に必要となる設置法（埋設法）は新規開発を要する。

サンプル採取、ロボティクスについては、採取機構、掘削システム、機器設置・組み立て、汚染管理、微量試料分析装置、さらに SELENE 後継機に対しては崖やクレーター内探査機構、大きな温度差のある越夜用構造物構築、低温環境におけるサバイバル技術（電力・温度の確保）、重量物搬送・展開・組み立て、自立/遠隔操作による作業、その場分析などの開発すべき要素がある。

始原天体探査においては、目標天体に適した近赤外分光計（NIRS）の波長の変更や、プロジェクタイルの形状と角運動量の変更が課題となる。またより遠方への飛行のため、「はやぶさ」において用いられたイオンエンジンを改良し、より大きな推力を実現することが必要であり、同時に地表下試料採取を可能とするサンプラーの開発も課題となる。さらに、両探査に必要な惑星間空間航行技術として日本が早急に習得すべきものは、通信技術、探査機の位置を正確にとらえる測距技術に加え、惑星に探査機を送り出すロケットの技術である。具体的には、惑星探査機の打ち上げには必ずしも最適化されていない H-IIA ロケットにアップステージを追加して 3 段ロケットとし、惑星行軌道投入における自在性を確保することが必要となる。

地球磁気圏探査 SCOPE に関しては、衛星間の通信装置、衛星搭載の巨大データ・ストレージ、高速電子計測（従来よりも 100 倍以上高感度）、衛星スピン軸方向アンテナ（プラズマ波動・電磁場とも 3 成分観測のため）、波動・粒子相互作用を検出するための機上処理装置などが、重要な開発項目となる。

3.10.4 国際協力・国際対応

月の内部構造を解明するため、NASA が主導する国際月ネットワーク観測（ILN）構想が提案されており、アメリカ・日本を含め 9 カ国が協力を表明している。月面に 6～8 機の観測所（ステーション）を設置し、第 2 世代の地球物理学網を構成するもので、各 ILN 観測所を地理的に広範囲に配置し、中核となる観測機器一式（たとえば月震計、レーザー逆反射体、熱流計）を搭載する。複数のワーキンググループが結成され、観測機器選定、通信の相互運用性などを検討し始めている。

マルコポーロは、ESAとの共同計画としてESA Cosmic Vision 2015-2025 の候補として選考段階にある。ランダー、ローバー、観測装置などの多岐にわたり分担計画が検討されている。また、木星システム探査計画EJSMは、当初は日本独自の計画としてスタートしていたが、2008年、ESAとの共同計画として、さらに、NASAも含めた3機関合同探査としての計画が進められている。日本はJMO (Jovian Magnetospheric Orbiter) とトロヤ群小惑星探査機を提供し、「木星系の今」と「木星系の起源」という科学テーマに貢献することを計画している。

地球磁気圏探査 SCOPE は現段階では日本-カナダ-アメリカの共同計画として、5機編隊の中心となる親機-子機ペアを JAXA が、周辺の3台の子機をカナダ CSA が製作することになっている。打ち上げは JAXA の H-IIA を想定し、その余剰能力を NASA が使って衛星編隊を打ち上げ、同時にカバーするスケールの範囲を充実させる方向で検討が進んでいる。さらに SCOPE は ESA が計画する Cross-Scale 計画と親和性が高く、打ち上げは別ではあるが、同時共同観測が検討されている。ロシア IKI、中国 CSSAR も衛星を自ら打ち上げて同時観測へと参加することに強い興味を示し、かつ具体的なミッション・シナリオも準備されつつある。SCOPE 以外は、従来性能の磁気圏観測衛星の提供となる見込みであるが、従来性能の衛星であっても、多数が同時に観測することが重要である。SCOPE の存在によりそれら探査機群が、同時マルチ・スケール観測として組織化できることになる。このように、日本・カナダの高性能観測編隊 SCOPE がコアにあって主導的役割を果たしつつ、最終的には全世界6宇宙機関が共同し、10機以上の大編隊とすることが計画されている。

3.11 理論シミュレーション計画

3.11.1 分野の現状

ここでは、主にシミュレーション研究の現状についてまとめる。理論シミュレーションによって推進されるべきサイエンスについては、2.10 を参照されたい。

大規模シミュレーションは、理論・観測と並ぶ重要な研究ツールになってきた。これは通常の意味での実験が困難である天文学の特性と、計算機の能力が過去数十年にわたって指数関数的に発展してきたことによる。宇宙全体を含む様々な天体は、構成要素間の相互作用が基礎的な物理法則そのもので記述できるという意味で、生命や社会のようなシステムに比べて理解しやすいシステムである。システムを記述する方程式系が解析的には解けない場合においても、コンピュータによる数値計算によってシステムの振る舞いを知り、そこから理論的な理解を構築し、また観測と比較することで理解を検証することができる。このため、計算機の能力の向上、計算手法の改良によって、これまで扱うことができなかったシステムが扱えるようになることが直接に研究の発展に結びついてきた。

まず、計算機の能力の向上と計算手法の改良のそれぞれについて現状をまとめる。1980年代から90年代初めまでは、スーパーコンピュータ技術において日本が世界をリードしていた。また重力多体シミュレーションについては、90年代初めからは、日本で開発が継

続されている GRAPE システムが性能で世界をリードしてきた。これらのお蔭で、シミュレーション研究のいくつかの領域では日本のグループが世界をリードしてきている。

しかし、GRAPE が優位である多体シミュレーションの分野を除くと、日本のスーパーコンピュータの優位性は 2000 年代にはいつから急速に失われつつある。これは、日本のスーパーコンピュータ開発が、航技研の数値風洞(富士通 VPP500 の原型)や地球シミュレータ(NEC SX-6 の特別モデル)に代表されるように、70 年代に開発されたアーキテクチャであるベクトルアーキテクチャを元にした分散並列システムが主体でありつづけたのに対し、諸外国ではスカラー型マイクロプロセッサ、特に安価な x86 アーキテクチャプロセッサによるクラスタシステムに移行してきたためである。

さらに近年では、パソコンの画像表示用プロセッサである GPU を汎用計算に使う GPGPU と言われる動きも盛んになっており、GPU メーカーも積極的にこれをサポートしている。GPU の性能は単精度であれば 1 チップで 1 Tflops(2009 年時点)と汎用マイクロプロセッサの 1 桁上であり、応用によっては高い性能が得られそうに見える。じっさい GPGPU の応用は、GRAPE でのアルゴリズム開発の実績がある多体系シミュレーションでは良い結果がでているが、それ以外の分野での実績はあまり多くはない。

日本では、スーパーコンピュータ技術における優位性を回復することを目指す京速コンピュータプロジェクトが 2006 年度から 7 年計画でスタートした。これはベクトルアーキテクチャでの分散並列システムとスカラーアーキテクチャでの分散並列システムをそれぞれ開発し、協調してシミュレーションをさせる、というプロジェクトであったが、2009 年 5 月にベクトル部分の開発を担当していた 2 社がプロジェクトからの撤退を表明する等、混乱した状況が続いている。

GRAPE 開発グループは 2004 年度から、プロセッサアーキテクチャを大きく変更した GRAPE-DR システムの開発をスタートした。これは、上の GPGPU と類似した考え方で、重力計算専用パイプラインプロセッサを使っていた GRAPE に代わり、プログラム可能だが単純なプロセッサを多数並列動作させるものである。2006 年度にチップが完成し、2009 年 5 月現在で 85 Tflops のシステムが稼働している。このシステムは電力あたりの演算性能で世界一を実現しており、電力コストがハードウェア調達コストを上回りつつある現在では非常に注目されるものとなっている。

計算手法については、数値解法、物理モデルの改良と同時に、上のような計算機アーキテクチャの変化に柔軟に対応でき、新しいアーキテクチャで高い実行効率を実現する計算コードの開発が、世界的にも重要な課題になっている。流体計算では Flash、Enzo に代表される並列化された AMR コード、重力多体や SPH による自己重力流体では Gadget、PKDGRAV/Gasoline に代表されるツリー法ベースの並列コードが主流であるが、これらはいずれも大規模で複雑なコードであり、複数の開発者からなる開発チームがコードの様々な部分を開発し、さらに開発されたコードを使ったサイエンス研究は多くのユーザーが行うという分業体制が成立しつつある。日本では AMR の SFUMATO、AMRO や重力多体

の GreeM、SPH の ASURA 等高いレベルでのコード開発は行われているが、ASURA を例外として開発は個人ベースに留まっている。

3.11.2 将来計画

シミュレーション研究で世界をリードしていくためには以下の 2 つを並行して進めていくことが必須となる。

a) GRAPE、GRAPE-DR のような、天文シミュレーションに最適化した専用計算機ハードウェアの自主開発

b) 専用計算機、汎用計算機を問わず、大規模並列システムで効率良く実行できる並列シミュレーションソフトウェアの継続的開発

ハードウェア開発については、半導体技術自体の成熟により、カスタム LSI 開発が極めて大きな初期コストを必要とするという問題がある。これについては、以下の 3 つの方向を並行して進めることで対応していく。

1. ある程度の汎用性をもつ、GRAPE-DR 的なシステムの改良・継続開発を行なうこと。
これは多額の費用を必要とするため、天文学の枠の中だけで継続するのは困難であり、京速コンピュータの次の世代、あるいは同時並行的に、計算科学のプロジェクトとして推進していくことが望ましい。
2. アプリケーションに高度に専用化したシステムを、構造化 ASIC など、トランジスタ利用効率は劣るが初期コストの低いチップを使って開発すること。
3. GPGPU、FPGA 等の、商業的に利用可能なチップをそのまま利用すること。
 1. については、例えば 4 年後の 2013 年の完成を目指すなら GRAPE-DR の後継システムとして 30Pflops (京速コンピュータの 3 倍) 程度の性能を開発費 20 億程度(京速コンピュータの 1/50) で実現することが可能である。これにより、自己重力粒子系などの天文シミュレーションだけでなく、量子化学計算や古典 MD などのいくつかの重要なアプリケーションが実行可能であることは GRAPE-DR で実証されている。さらに 5 年後を考えると、半導体技術の状況が予測困難だが、16nm 程度までは微細化が進むと最近はいわれており、さらに 20-30 倍の性能向上が可能であろう。すなわち、Exaflops が実現可能となる。
 2. については、利用可能になりつつある構造化 ASIC と言われる技術を用いると、トランジスタ利用効率の面では 1/10 程度だが、初期コストは数千万円と、カスタムチップに比べて 1 桁以上小さくて済む。そこでこれを用いて GRAPE 的な専用計算機の開発を継続する。この場合、上のプログラム可能なアーキテクチャと同程度の性能を、ずっと小さい初期コストで実現でき、また消費電力も小さくなる。このアプローチでは、1 億円程度の中規模プロジェクトで、世界最高速度が実現できる。
 3. については、実際に実用になるかどうかは現状では疑わしいが、技術動向に常に留意しておく必要はある。

シミュレーションソフトウェアの継続的開発については、京速コンピュータプロジェクトの中でそのようなことを進める開発グループをもつ計画もあり、宇宙は素粒子・原子核の研究と合わせ、そのための重点分野の候補にもなっている。このような制度的なサポートを有効に活用すると同時に、国立天文台、筑波大学計算科学センター、高エネルギー加速器研究機構などの計算科学・シミュレーション天文学の研究拠点において、継続的開発を行う体制を整備することが急務である。

第4章 国家レベルで推進すべき特に重要な大型計画

4.1 天文学・宇宙物理学分野で早急に実現すべき特に重要な大型計画の検討

我が国の天文学・宇宙物理学の観測装置は、地上観測装置については、1970年代以降、野辺山宇宙電波観測所45mミリ波望遠鏡+ミリ波干渉計、スーパーカミオカンデ、ハワイの口径8.2mすばる望遠鏡、現在チリで建設中のアルマ望遠鏡、また関連の深い分野ではスーパーカミオカンデ等、100億円を超える大型計画を関係コミュニティ支持の元に推進・完成させてきた。その結果、どの計画も国際的に輝かしい研究成果を達成し、日本の天文学・宇宙物理学のレベルを大きく向上させるとともに、国際共同を広め、社会の関心も強く惹きつけてきた。

同様に、宇宙空間（スペース）からの天文学及び宇宙物理学の推進についても、宇宙航空研究開発機構（JAXA）の宇宙科学本部（ISAS）を中心に、大学及び研究機関（国立天文台等）の協力のもとに、ボトムアップの形で計画立案と適切な評価が実施され、X線天文衛星、赤外線天文衛星、並びに、スペースVLBI衛星や太陽観測衛星が実現した。その結果はそれぞれに優れた科学的成果を達成し、日本と世界の天文学の推進に大きく貢献した。

またこれらの計画においては、科学的・技術的成果の実績もさることながら、大型計画といえども研究者のボトムアップで計画立案され、それぞれに成功裏に完成に導かれたことは特筆に値する。日本学術会議を含めた広くオープンな場で、計画の推進体制、科学的価値、予算的妥当性など、科学者の立場から事前評価が厳しくなされ、その推進が支持された結果であったといえよう。

このような我が国における天文学・宇宙物理学分野の大型計画推進の高く大きな実績の上に立って、本分科会及び小委員会は我が国の天文学・宇宙物理学分野の10～20年を見通す展望と長期計画の新たなとりまとめを進めてきた。2回にわたるシンポジウム（末尾の資料参照）において提案された計画のうち主なものは、すでに第3章に取りまとめている。多岐にわたるこれら意欲的提案を踏まえて、わが国として最優先で実現すべき大型計画をさらに絞り込むため、候補となり得る数件の課題に絞って提案グループからのヒアリングを実施し、慎重に検討を行った。その結果、以下の3計画について、日本の天文学・宇宙物理学コミュニティが一丸となって早急に実現すべき特に重要度の高い大型計画であると結論した（順不同）。

- 大型低温重力波望遠鏡 **LCGT: Large scale Cryogenic Gravitational wave Telescope**、
- 30m大型光学赤外線望遠鏡計画 **TMT: Thirty Meter Telescope**
- 次世代赤外線天文衛星計画 **SPICA: Space Infrared Telescope for Cosmology and Astrophysics**

これら大型計画はいずれも、日本および世界の研究をリードし、コミュニティーに対して、大きな責任を持つ計画となる。また、大型の予算を必要とするだけでなく、長期間の建設計画を必要とすることから、当該分野の研究動向や、研究者コミュニティー、並びに若手研究者の養成に関しても、大きな影響を及ぼすものである。そのため第 3 章とは別にこの第 4 章を設け、3 計画についてそれぞれ詳しく内容を取りまとめるものである。

4.2 大型低温重力波望遠鏡計画

(LCGT: Large scale Cryogenic Gravitational wave Telescope)

重力波は、その存在は確実と考えられているものの、まだ人類が検出していない波である。アインシュタインが一般相対論で予言した重力の波動＝重力波が検出できるようになれば、人類は宇宙を観測する全く新しい手段を手にすることになる。これまで、宇宙はほとんど電磁波の情報によって解明されてきたが、それとは独立な情報が重力波によって得られる。従って、重力波の直接観測は一般相対論の確証を与えるとともに、新たな天文学を創成することを意味しており、基礎物理分野及び宇宙物理分野の研究者の永年の悲願である。

我が国の重力波検出の研究は、300m 基線の実証的重力波観測実験装置である TAMA、神岡鉱山内という地面雑音の極めて低い環境に設置された長さ 100m の CLIO (低温レーザー干渉計重力波観測装置) などの実験的成果を元に、計画の実証性について極めて大きく進展した。日本独自の極低温 (約 20K) 鏡の実証性や、防振振り子の開発成功などがその例である。従って、実験装置の建設については、十分に準備が完了し、技術的蓄積は大型計画の推進に対して十分なレベルと考えられる。

世界的動向としては、1990 年代にアメリカ合衆国の東部・西部に建設された 2 台の LIGO が、現在世界最高レベルの観測装置であるが、現在の LIGO でも重力波の直接観測に成功していない。このため、LIGO は、高精度化のための改修 (改良型 LIGO) をすでに始めており、2010 年代半ばに完成予定である。

従って、我が国独自の計画としての**大型低温重力波望遠鏡 (LCGT)** は、重力波の世界初観測を目指した競争に勝利する上でも、その後の重力波観測世界的ネットワークの一翼を担う上でも、我が国が責任を持って早急に推進すべき重要計画であると考えられる。

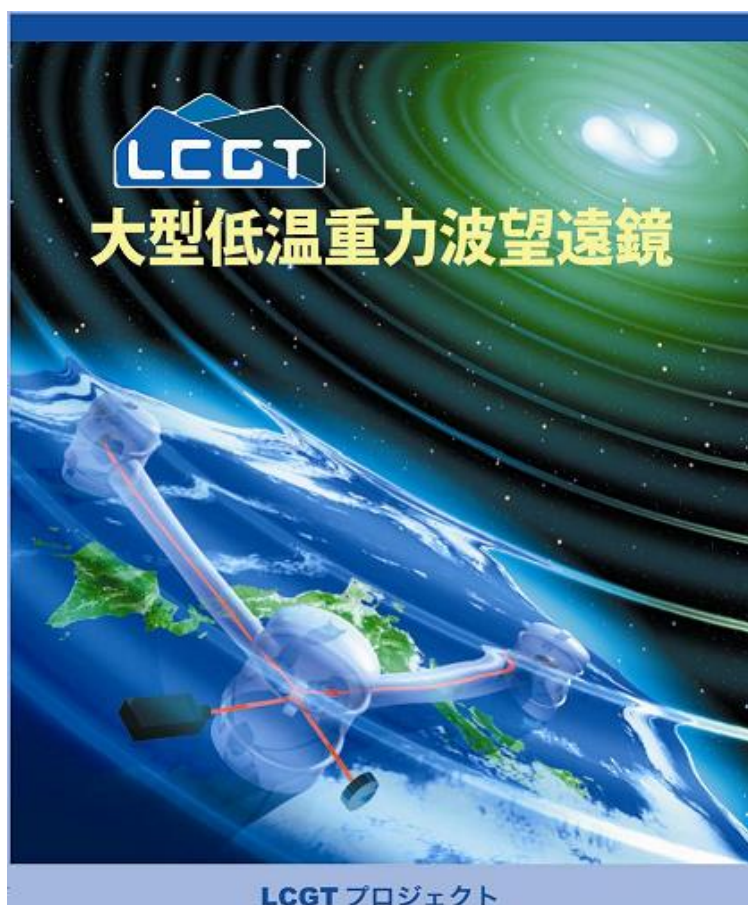


図 1: 新たな重力波天文学を創成する LCGT

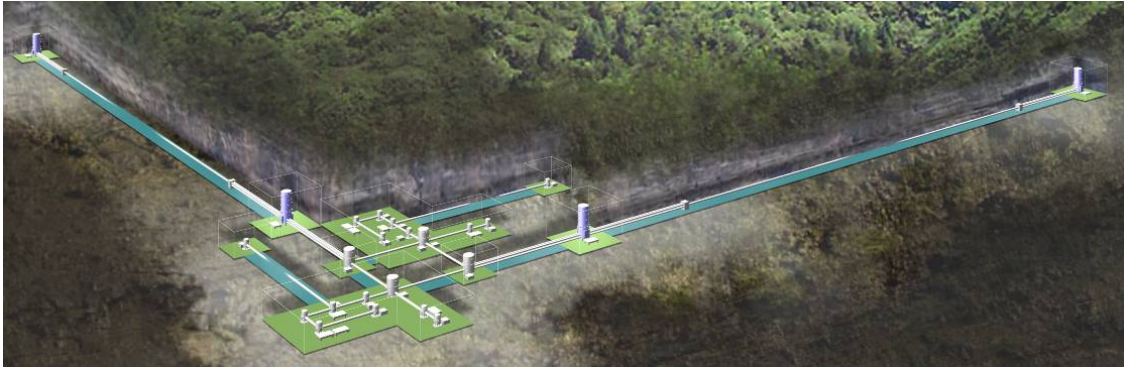


図 2: 神岡地下に設置される LCGT 重力波観測装置 (想像図)

4.2.1 計画の概要

LCGT は、連星中性子星の合体や超新星爆発起源の重力波に対して高い感度を持つように設計された、第 2 世代のファブリペロー方式高感度レーザー干渉計である。予想される信号を考慮して、およそ 20Hz から 1kHz の帯域で感度が最高になるように設計されている。確実に重力波を捉えられるためには、連星中性子星の合体現象を 6 億光年先まで検出できる感度を持つ必要がある。そのため、LCGT は基線長を 3 km とし、地面振動雑音を避けるために地下設置（神岡鉱山跡地）とし、かつ、日本独自の開発技術である世界初の低温鏡（20K）を採用した。それと平行して開発されてきた 100W クラスの大出力レーザーや低周波防振装置も不可欠の要素技術である。これらにより重力波の観測に必要な設計感度が達成できることは、TAMA および CLIO 実験における長年の開発研究で確かめられてきた。

重力波の発見以後は、改良型 LIGO やヨーロッパの次期 Virgo 計画など LCGT と同程度の感度を目指す計画と共同して重力波観測網を構成し、グローバルな重力波天文台の 1 拠点として活躍することが期待される。

本計画は東京大学宇宙線研究所をホスト機関とし、国立天文台および高エネルギー加速器研究機構が協力して 120 名に達する国内外の研究者と共に推進する国際共同計画である。

4.2.2 期待される研究成果

重力波は、中性子星やブラックホールなどが関係する強い重力のもとで発生し、2つの偏波モードを持ち光速で伝播する。重力波が直接検出されれば、中性子星やブラックホールなどの運動が時間を追って観測することができ、アインシュタイン理論の正しさが確認できる。また理論との不一致が発見されれば、新たな物理学の発展の種となる。

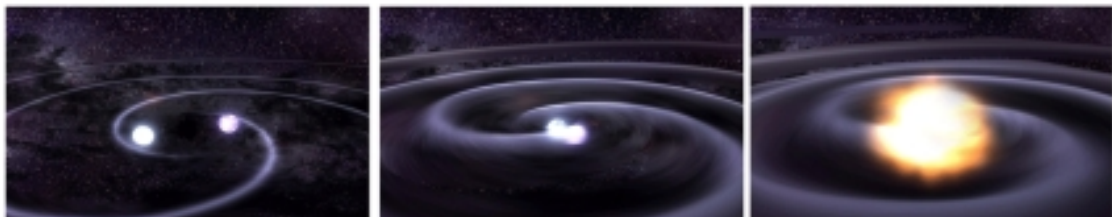


図 3: 重力波放出に伴う連星中性子星の合体過程の想像図 [NASA]

LCGT の主要な観測対象は連星中性子星合体で発生する重力波であるが、1年に数回から数十回の頻度で観測できると予想され、重力波形（チャープ波形）を観測することにより合体した中性子星質量の決定が可能である。また大質量星の最後である超新星爆発では、ニュートリノでも見えない中性子星コアの振動が直接観測されると期待され、超高密度物質の情報から原子核物理学に大きな進展をもたらす。更には、ブラックホールの準固有振動、連星ブラックホールの合体やブラックホールへの星の落下などの事象の観測が期待され、特異天体の物理学に大きな進展が期待される。

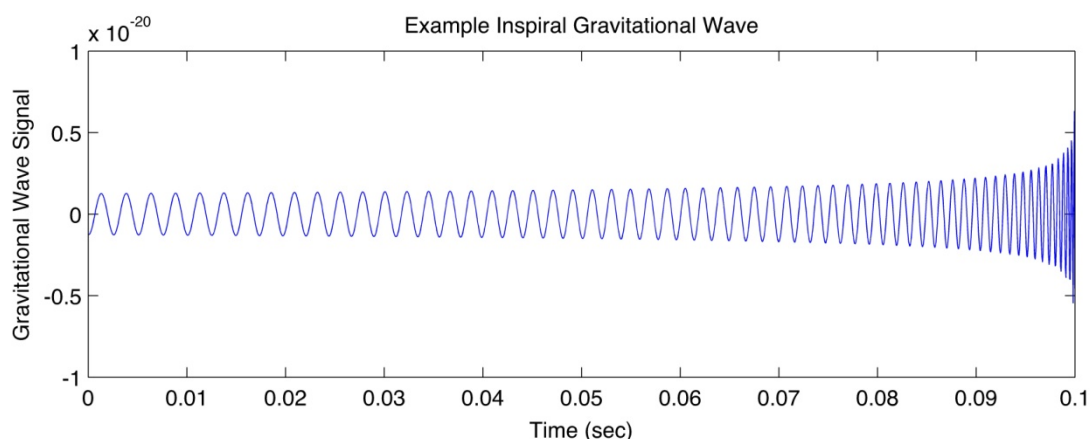


図 4: 連星中性子星の合体過程の重力波形の例（LIGO の HP より）

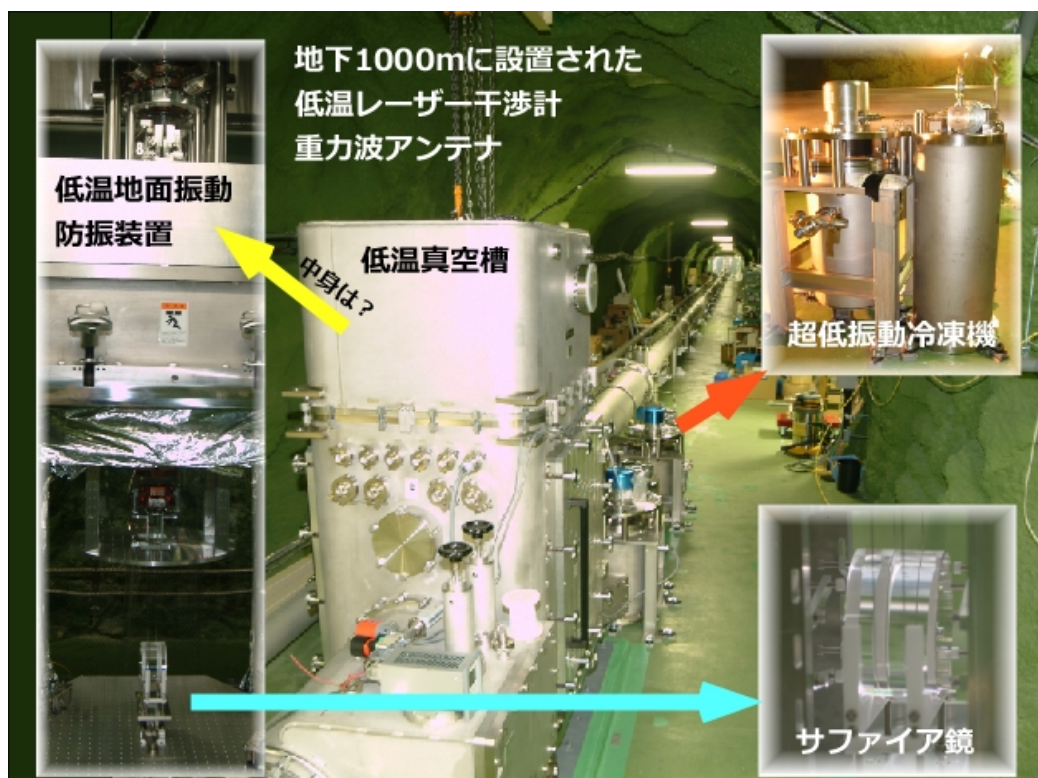


図 5: 神岡鉱山地下 1000m に設置された CLIO

LCGT は、近年大きな関心を呼んでいるダークエネルギーについて、光学的観測とは違った方法での情報を与えることが期待されている。連星系で発生する重力波の観測結果を一般相対論の予測波形と精密に比較することで、連星系までの距離を精密に決定できる。Ia 型超新星とは独立な方法によって、宇宙の加速膨張をとらえることが可能となるのである。また LCGT は、宇宙初期のインフレーションなどを起源とする宇宙背景重力波も観測対象としており、宇宙誕生初期に関するほぼ唯一の観測データとなり得る。

4.2.3 技術的ブレークスルー

TAMA においては、世界最初の高安定・高出力連続波レーザー光源の開発、焼きだし不要の超高真空表面処理技術、超低損失光学薄膜技術、低周波防振技術で卓越した成果を挙げてきた。また CLIO では、世界で初めての試みである低温鏡技術を確立した。LCGT はこれら数多くの技術的ブレークスルーの上に実現されるが、その目標達成にもっとも重要な点は、現在 CLIO で実証試験が行われている「低温鏡による雑音低減法」である。すなわち従来 300 K であった熱振動を 20 K 以下に抑え、かつ、低温による鏡素材の機械的損失改善による熱雑音の低下と合わせて、振動変位で 1 桁以上の雑音低減を実現する。これは基線長を 1 桁以上拡大したのと同じ効果を生む。つまり、極めて効率的に高感度な重力波検出装置となるのである。

なお、LCGT で開発された先端技術は、産業、また自然科学の他の分野にも大きい波及効果が期待される。一例として、重力波で開発された技術を用いて地球内殻コアの振動モードの観測といった地球物理での画期的な成果が期待される。

4.2.4 スケジュールと予算規模

技術開発研究は完了しており、すぐに建設が可能である。建設が認められれば、およそ 3 年でトンネル掘削・整備が行われ、その後 1 年で真空系敷設、レーザー干渉計の組み込みが行われる。建設着手から 5 年でレーザー干渉計として動作する状態を実現し、その後 2 年をめどに感度出し工程を行い、目標感度を達成する計画である。建設にかかる経費は、建設費 155 億円、またその間の研究開発経費は 3 億円と見込まれている。建設終了後には、電気代、装置の点検費などの運転経費と共同利用研究に伴う経費として年間 4 億 3,200 万円が見込まれている。また、本装置による重力波観測は 10 年以上継続される計画である。

4.2.5 国際協力

LCGT は、重力波の最初の直接観測にチャレンジする装置であると同時に、重力波天文学の構築に必須の観測装置となる。天文学となりうりうするためには、重力波源の位置測定が必要であるが、このためには世界中で最低 3 台の観測装置が必要である。この意味で、国際的観測ネットワークを構築する上で、アジアの日本に建設することは大きな意味がある。このように、重力波天文学の発展のためには、世界的レベルの国際協力が不可欠であり、日本への世界からの期待が大きいと共に、従来の実績に基づけば責任も大きい。

4.3 30m 大型光学赤外線望遠鏡計画 (TMT: Thirty Meter Telescope)

TMT (30m望遠鏡) は、すばる望遠鏡の約 4 倍の直径をもつ次世代超大型望遠鏡計画である。すばる望遠鏡の 200 倍の効率で観測できる TMT は、2010 年代における天文学の最重要装置と国際的に期待されている。日本の天文学コミュニティは、すばる望遠鏡およびハワイ観測所の自然な拡張として TMT 計画に参加し、ハワイ島のマウナケア山頂に早期実現されることを切望している。

TMT は、ダークエネルギーやダークマターといったさまざまな宇宙の謎の探求に挑み、最初の星や銀河が生まれた時代を直接目撃し、宇宙史の中での星の誕生と死の過程を明らかにする。また、太陽系外惑星の探査はもう一つの大きなテーマである。銀河中心の巨大ブラックホールや、さらには予見さえもされていない新しい謎との遭遇が期待される。

すばる望遠鏡の超広視野観測装置や広視野多天体分光装置によるサーベイ観測と、それに基づいたピンポイント観測を TMT で実施するなど、両者の特長を生かした科学的成果が生まれる。すばる望遠鏡で認められた高い日本の技術力と科学的成果を基盤として、地上の大型計画として早急に推進すべき計画と位置づけることが適切である。

4.3.1 計画の概要

地上からでも観測ができる可視光および近・中間赤外線の天文学では、すばる望遠鏡を初めとする 8m 級の大型望遠鏡がこの 10 年余り大きな役割を果たしてきた。次世代超大型望遠鏡である TMT は、直径 8.2m のすばる望遠鏡の 13 倍、ハッブル宇宙望遠鏡の 156 倍もの集光力を持ち、これまで見ることができなかった微かな天体からの光を捕らえ、詳しく分析することができる

(8m 級望遠鏡から次世代超大型望遠鏡への展開)。TMT の顔となる直径 30 m もの鏡は、さしわたし 1.44m の六角形の部分鏡を 492 枚も敷き詰めて、全体をまるで一枚の鏡のように整える。

地球大気には乱流や温度のムラがあるため、星からの光は乱れ、瞬いてみえる。「補償光学」はこの瞬きを瞬時に補正する高度な技術であり、毎秒数百回も反射面の形を微妙に変えることができる特殊な鏡を用いることにより、TMT は星や銀河をまるで宇宙空間から見ているような高解像画像として写し出すことが可能となる。

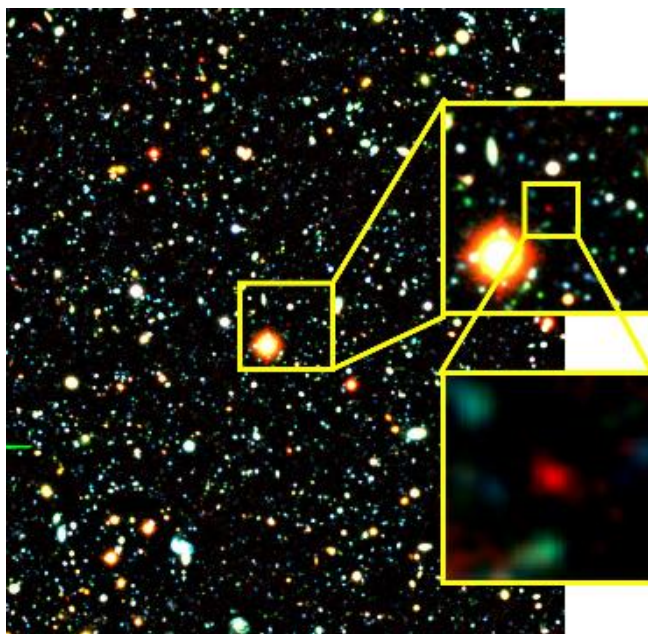


図 1: すばるが発見した距離 129 億光年の最遠銀河

この補償光学技術の活用により、ハッブル宇宙望遠鏡の 13 倍もの解像力で、天体の構造をよりシャープに撮影できるので、点光源の観測ではすばる望遠鏡の 200 倍の感度を実現することができる。

4.3.2 得られるサイエンス

すばる望遠鏡は 129 億年前の宇宙をやっと覗き見ることができはじめているが、これはビッグバンから約 8 億年後の時代に相当する。ビッグバンから 2~3 億年後までには、最初の星や銀河が生まれたと考えられている。それ以前には、宇宙には光る天体が無かった。そのため、宇宙の**暗黒時代**と呼ばれている。TMT は宇宙誕生後 2~3 億年頃の初代天体形成期にさかのぼって、遠方の銀河やクエーサー、ガンマ線バースト天体を検出できるため、宇宙の夜明けの様子を観測的に明らかにできる。

TMT のシャープな解像力で銀河中心付近の星の運動を精度よく測り、銀河中心の超巨大**ブラックホール**の性質を解明する。銀河系の周辺で次々と発見されている非常に微かな矮小銀河は、宇宙の化石的存在であり、その星々の化学組成や運動を調べて銀河の生い立ち（**銀河形成史**）を解明する。

TMT の高い観測性能をもってすれば、生命誕生の可能性のある地球型惑星（**第二の地球**）の探査に挑戦できる。惑星探しにはさまざまな手法が提案されているが、巨大惑星や惑星の元となるガス円盤の観測では進展が期待される。新しい観測技術を駆使することで地球型惑星の直接検出も可能かもしれない。

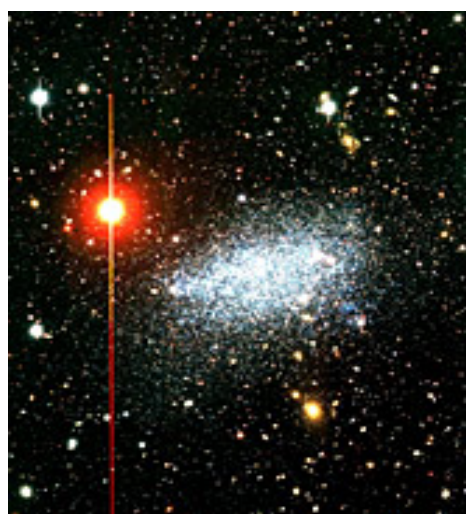


図 2: 矮小銀河は宇宙の化石



図 3: 原始惑星系円盤の渦巻き

4.3.3 技術的ブレークスルー

すばる望遠鏡の主鏡は直径 8.3m の単一薄型ガラスで製作されたが、直径 30m もの TMT をこの方式でつくることはできない。ケック望遠鏡で実証された、分割鏡方式で実現することで建設経費を大幅に縮減する計画である。それにしても 492 枚の部分セグメント鏡を精度良く安価に製作し、あたかも一枚の鏡となるように精密に配置し駆動制御することは、技術的には十分可能であるが大きい挑戦である。

TMT の能力を最大限発揮するためには補償光学の高度化が必要である。すばる望遠鏡

に実装して 2010 年度から運用開始予定のレーザーガイド補償光学システムでは、波面曲率センサー、バイモルフ可変鏡、全固体和周波ナトリウムレーザー、フォトニック結晶光ファイバーなどに、国内外の最先端の独創的な新技術を開発し導入した。TMT 用の補償光学系とレーザーガイド星生成システムはさらに高度なものとする必要があるが、これらの実績をベースに開発する計画である。

光を実時間制御する補償光学技術は、天文学だけでなく、眼科医療、光通信、レーザー加工、レーザー核融合、ウラン濃縮、レーザー誘雷などへの応用も広がりつつあり、産業界へのさまざまな展開も期待できる。

4.3.4 スケジュールと予算規模

TMT の建設地は 2009 年 7 月に、ハワイ島マウナケア山頂に決定した。気象条件が適していることは既に証明済みで、候補地での建設許可申請の手続きが進められている。

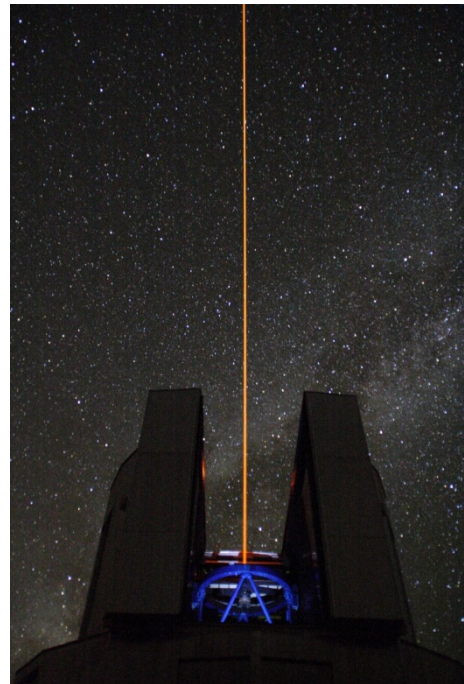


図 4: レーザーガイド星補償光学系試験

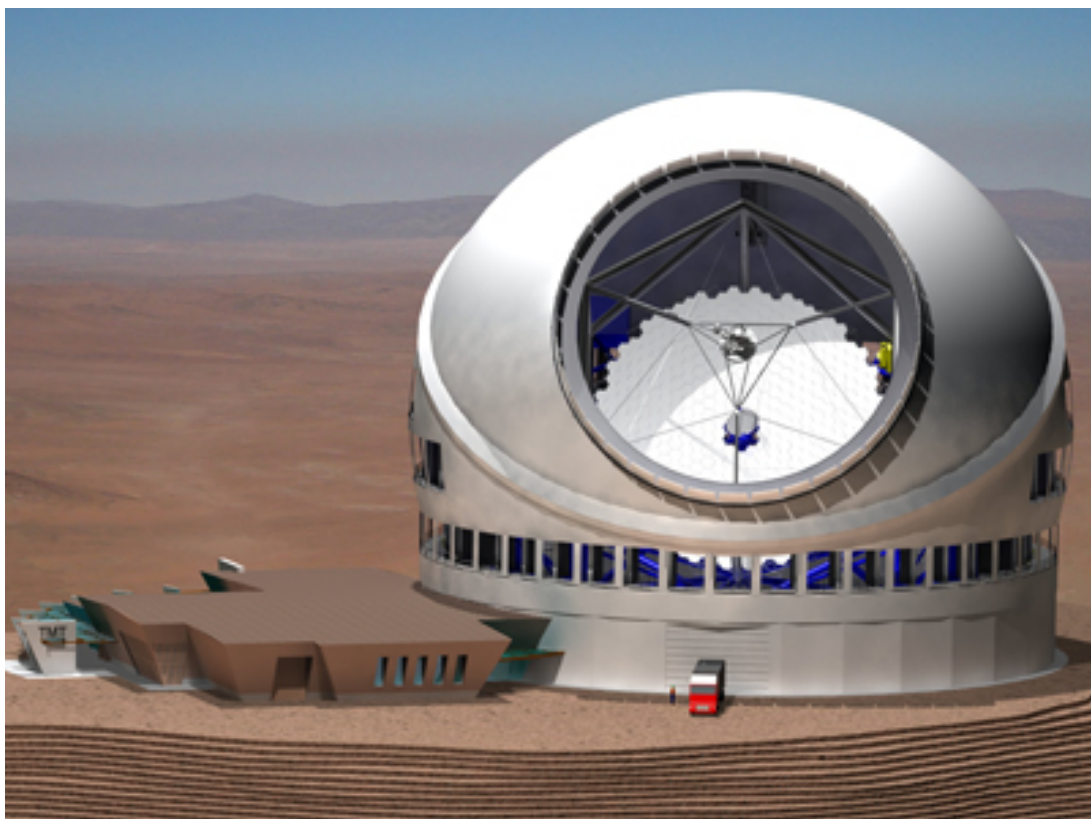


図 5: 直径 30m の次世代望遠鏡 TMT とそのドームの完成予想図

TMT の建設費は約 10 億ドル程度、運用経費は毎年約 4,900 万ドル程度と見積もられていて、建設費についてはムーア財団の寄付などで合計 3 億ドルがすでに確保されている、残り 7 億ドルを NSF（米国）、ACURA（カナダ）、国立天文台（日本）の政府からの予算交付を得て、2011 年頃から建設開始することを目指している。

我が国は国立天文台を中心に TMT の主鏡の製作と観測装置や補償光学装置等の開発・製作で計画に貢献することを検討している。

4.3.5 国際協力

日本の天文学コミュニティは、日本独自の 30m 望遠鏡構想（JELT）を 2002 年頃より検討してきたが、建設予算が大きくなりすぎるため、日本単独でなく国際協力によって早期に建設を実現する方針を 2006 年に決めた。TMT（Thirty Meter Telescope）計画は、カリフォルニア工科大学（カルテク）、カリフォルニア大学（UC）、カナダ大学連合（ACURA）が検討を進めてきたものである。中国、台湾やインドも参加に大きな興味を示している。日本は TMT 計画に対等なパートナーとして参加することを目指している。すばる望遠鏡の隣に TMT を建設できれば、すばる望遠鏡の探査機能を強化する計画と整合性が大変良い。2008 年 11 月には、国立天文台長と TMT ボード議長（カリフォルニア大学サンタバーバラ校学長）が、TMT の実現に向けて努力する旨の覚書きに署名し、日本の参加に一層の期待が寄せられている。

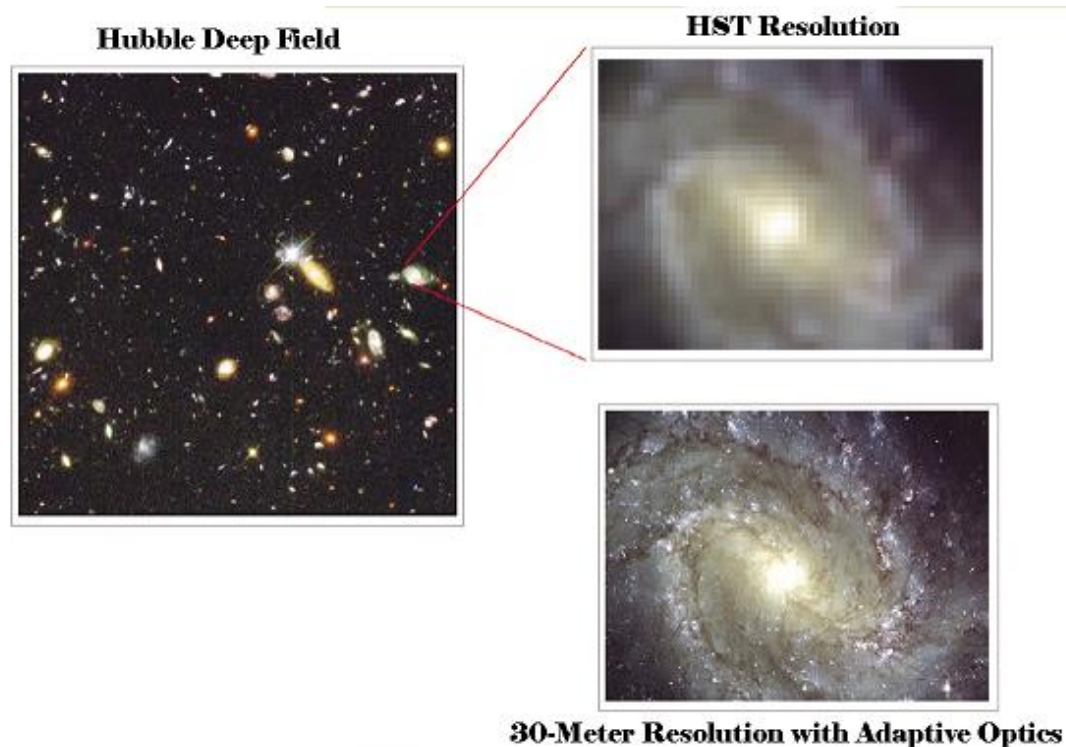


図 6: 補償光学系を備えた TMT は、ハッブル宇宙望遠鏡の 13 倍の解像力を実現する

4.4 次世代赤外線天文衛星計画

(SPICA: Space Infrared Telescope for Cosmology and Astrophysics)

SPICA は我が国が発案・主導し、欧州を中心とする世界の研究者が参加する大型の国際赤外線天文衛星計画である。日本が独自に磨き上げた技術である宇宙用冷却システム等の活用により、圧倒的な高感度・高空間分解能の観測を達成することが期待されている。2006年に打ち上げられた赤外線天文衛星「あかり」の成功に象徴される我が国のスペース赤外線天文学の成果と実績を踏まえて立案され、宇宙用極低温冷凍機の全面的採用、軽量望遠鏡、及び太陽－地球系の第2ラグランジュ点を周回する軌道を採用する等、極めて高い独創性と確実な実現性とを併せ持つ計画である。SPICA が実現すれば、宇宙論から太陽系外の惑星探査まで、幅広い天文学・宇宙物理分野に大きなインパクトを与えると期待され、我が国のスペースミッションとして重要な計画であると評価する。日欧の国際協力においては、得意分野や実績を踏まえた明確な役割分担が適切になされている。SPICA は我が国の宇宙科学として最も大型の計画の1つであり、学術分野の重要性に加えて、幅広い国民の支持を得ての実現が望まれる。「あかり」衛星等の従来からの実績も踏まえて、我が国の責任において、天文学・宇宙物理分野で積極的に推進すべき計画である。

4.4.1 計画の概要

SPICA (図1) は、ビッグバンから生命の発生にまで至る「バリオン物質が描き出す宇宙構造の形成と進化」を解明することを目指す次世代赤外線天文衛星計画である。ハッブル宇宙望遠鏡をも上回る口径3m級(現在の案は3.5m)の大型望遠鏡を宇宙に打ち上げ、絶対温度6K以下にまで冷却することにより、今までにない圧倒的な高解像度(大口径のため)・高感度観測(大口径+冷却のため)を達成する。2017年の打上げを目指す。



図1：軌道上で観測する SPICA (予想図)

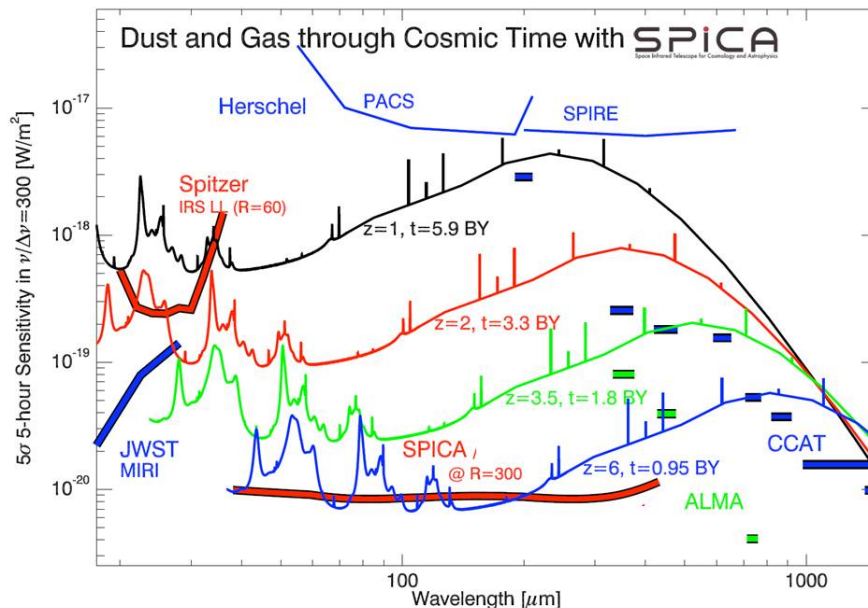


図2：宇宙論的遠方の銀河に対する SPICA の予想検出能力。銀河のエネルギー放射のピーク（100-200 μ m）において、2009年に打ち上げられた最新鋭の Herschel に比べて2桁以上の感度向上が期待され、赤方偏移 $z = 6$ （現在の宇宙の年齢の約7%の年齢という若い銀河）の銀河も観測可能となる。参考のために他波長のミッション、Spitzer、JWST、アルマ、CCAT の性能も示す。

4.4.2 期待されるサイエンス

「バリオン物質が描き出す宇宙構造の形成と進化～ビッグバンから生命の誕生まで～」

約 137 億年前のビッグバン後における宇宙の歴史の中で、現在の宇宙を構成している多種多様な天体が誕生、進化してきた。SPICA は特に天体を構成するバリオン物質の輪廻に着目し、次の3つのサブテーマを通し、バリオンでできた天体の進化過程の解明を目指す。

(1) 銀河誕生のドラマに迫る

我々の宇宙は誕生直後の「単純な宇宙」から、銀河等様々な天体で構成された極めて「複雑な宇宙」へ進化した。SPICA は宇宙初期の誕生・成長過程にある銀河（スターバースト銀河）をとらえ、宇宙の「複雑さ」の起源と進化に迫る。特に SPICA は、赤外線観測の特徴を活かし、星間塵による減光の影響を受けることなく銀河の本質に迫り、かつ熱放射のピークをとらえて全エネルギーを観測できることが大きな特徴である。

(2) 惑星系形成のレシピを探る

SPICA は、図3に示すような赤外線観測の利点を活かし、太陽系外惑星系を直接に撮像するのみならず、その大気組成を分光観測で調べることができる。特に、生命と結び付きの深い「水」「酸素」「二酸化炭素」の存在を探る。地球以外の惑星において、これらの分子が検出されれば、惑星における生命の発生に関して貴重な情報を得ることがで

きる。これは、天体物理学における意義のみならず、我々の宇宙観・生命観そのものを見直す大きな機会となる文化的な意義も大きい。

(3) 宇宙における物質の輪廻

宇宙の多様性は、He よりも重い元素 (O, C, N, Si など、これを天文学では「重元素」と呼ぶ) によるところが多い。しかし、その「重元素」の多くは、固体に取りこまれ、一般には観測が困難である。

SPICA は星・惑星系の形成の現場、さらに恒星末期段階において、ガス相と固体相の両者を総合的に観測できる。これにより、宇宙における物質の輪廻を総合的に明らかにする。

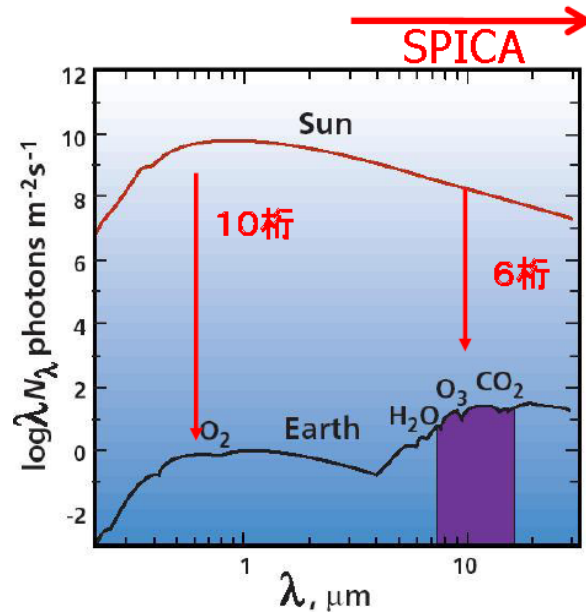


図 3: 太陽系天体のスペクトルエネルギー分布。恒星と惑星とのコントラストの大きさが観測の障害であるが、SPICA が得意とする赤外線領域は、可視光に比べてコントラストが 1 万倍軽減される。さらに、地球大気の影響を逃れ、生命と結び付きの深い「水」「酸素」「二酸化炭素」を観測できる。

4.2.3 技術的ブレークスルー (SPICA ミッションの特徴)

前述の科学的目的を達成するためには、以下の 3 つの点がミッションに要求される。

- (1) 銀河の熱放射のピークを観測するために、波長 5-210 μm の中間・遠赤外線領域を連続的にカバーする。このためには、地球大気の影響を逃れ、宇宙からの観測が必須である。
- (2) 遠赤外線宇宙背景放射を個別天体に分解できる大口径望遠鏡 (3m 級) を搭載する。
- (3) 高感度の赤外線観測を可能とするため、搭載望遠鏡を極低温 (6K 以下) に冷却し、望遠鏡からの熱放射を抑える。このためにも宇宙からの観測が絶対条件となる。

上記のミッション要求を満たすための SPICA の仕様を表 1 に示す。

SPICA は、液体ヘリウムを搭載せずに常温で望遠鏡を打ち上げて上空で望遠鏡を冷却 (放射冷却+冷凍機) する画期的な冷却システムを採用する (図 4)。これは日本が戦略的に開発してきた宇宙用冷凍機の実現により可能となった。このシステムにより、従来よりも格段に大型の望遠鏡の搭載が可

特徴	中間・遠赤外線波長域での、超高感度、高空間分解能観測
望遠鏡	口径 : 3.5m、温度 6K 以下 (観測時)
観測波長	コア波長域 : 5-210 μm
総重量	約 3.6 t
軌道	太陽-地球系 L2 周りのハロー軌道
打上げ	2017 年 (予定)

表 1 : SPICA の仕様

能となると同時に、ミッションの長寿命化を図ることができる。

SPICA は、特に中間-遠赤外線領域での高い感度を持つ。21 世紀初頭には、JWST (NASA、2014 年打上げ予定、主に近赤外線)、Herschel (ESA、2009 年打上げ、主にサブミリ波) という大型の赤外線-サブミリ波ミッションが実現される。これらと比べも、SPICA は冷却望遠鏡を搭載する

ため、中間-遠赤外線領域においては圧倒的 (100 倍以上) に優れた感度を持つ (図 2)。

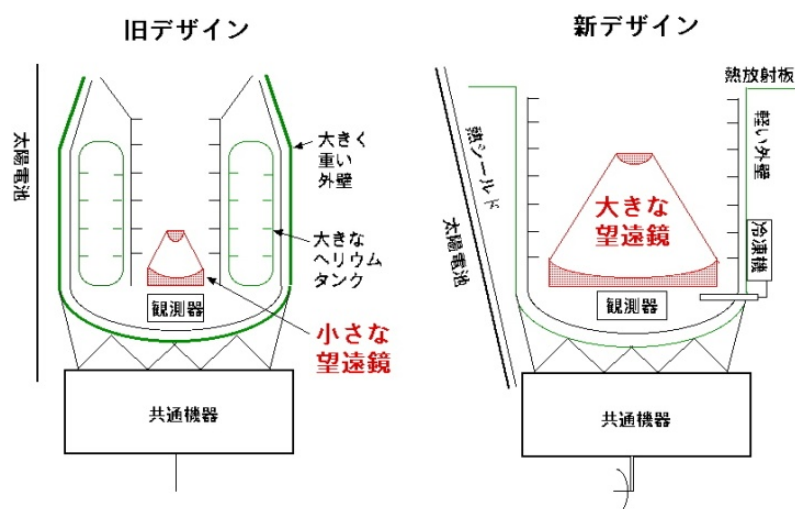


図 4：冷却方式の革命。旧デザイン（左図）に比べて、寒剤を用いない SPICA 方式（新デザイン、右図）では、はるかに大口径の望遠鏡の搭載が可能となる。

4.2.4 スケジュール、予算規模

SPICA は 200 名を超える研究者が参加するワーキンググループにより、ミッションの位置付け、ミッション構成の検討、さらに必要となる技術開発について、約 10 年にわたり戦略的に取り組んできた。2005 年に光赤外線天文学研究者コミュニティがまとめた将来計画「2010 年代の光赤外線天文学」の中でも、「次世代スペースミッションとしては SPICA 計画を最重点計画」としている。これらを受け、2007 年 9 月に JAXA 宇宙科学研究本部にミッション提案が行われた。審査の結果、2008 年 7 月に「プリ・プロジェクト」（概念設計、計画決定フェーズの承認）として JAXA 内にチームが正式に設置された。今後は 2011 年度に「プロジェクト化」（計画全体の承認）を行い、2017 年の打上げを目指している。SPICA 衛星を製作する日本側の予算は約 320 億円程度である。

4.2.5 国際協力

SPICA は世界的にユニークなミッションであり、世界の関連研究者から注目されている。特にヨーロッパでは科学衛星の長期計画 ESA Cosmic Vision 2015-2025 において、SPICA にヨーロッパが参加するプロポーザルが、高い競争率を勝ち抜いて Assessment Phase に進む計画の 1 つとして採択された。これを受けて ESA が主導する望遠鏡等の検討と、10 カ国以上が参加する SAFARI (SPICA Far-Infrared Instrument) コンソーシアムによる遠赤外線焦点面観測機器の検討・開発が進んでいる。

また韓国および米国との国際協力についても協議中である。

第5章 天文学・宇宙物理学の長期的発展のために

これまでの章では、具体的な長期計画をもとに天文学・宇宙物理学の展望を述べてきた。長期計画の実現には、それをになう人材の継続的育成が不可欠であることはいうまでもない。本章では、具体的な計画ではなく、それを支える人材と社会基盤の面から天文学・宇宙物理学の長期的発展のために、現状を分析し進むべき方向を展望する。

まず5.1節で、人材育成の中心である大学を取り上げる。大学の役割及び大学における教育研究の特性を考察した後、規模と形態の異なるいくつかの大学の研究者に対する意見照会の結果に基づいて、現状の問題点とその改善策を提示する。続いて5.2節で、過去9年間における天文学・宇宙物理学分野の全国の大学院修了者の追跡調査から浮かび上がった人材育成の現状と問題点およびその解決へ向けての展望を述べる。5.3節では、隣接他分野との連携によってこの分野の発展に繋がると考えられる研究課題をあげる。最後に、5.4節で産業界との連携、基礎科学と社会の関わり、国策的開発研究と基礎的研究の関連など多様な側面から、宇宙研究と社会の関係を論じる。

5.1 大学における天文学・宇宙物理学

5.1.1 基本的認識

教育研究を行う大学等は、(a) 人類の知の先端を切り拓く研究を推進すると同時に次世代をになう研究者を養成する、(b) 国民の知識・文化レベルの向上を図り活力のある社会を作ること貢献する、(c) 高度な職業的能力を持つ人材を養成して地域に貢献する、など多様な使命を背負っている。これらの使命のうち、どれにどのくらい注力するかは、当該機関の設置形態、規模、立地条件によって自ずと変わるであろう。一般的に言って、全国共同利用研や大規模な基幹大学では地域というより世界的な視野が、また、それ以外の大学では地域的な視野が相対的に高い重要度を持つことになるだろう。

さまざまな役割を持つこれら大学等は、それぞれの役割を認識し、それに相応しい活動を行ってゆかなければならない。天文学・宇宙物理学の長期的発展のためには、このような教育研究機関の役割の多様性こそが大切であり、お互いに助け合って、コミュニティ全体として豊かな人材育成に取り組まなければならない。

天文学は最も古い学問の一つであり、人類の根源的な知的要求に答えてきた学問である。現代においても、自然科学のなかで天文・宇宙分野への社会的関心は極めて高い。一方、若者の間には深刻な「理科離れ」現象が指摘されている。高校における理科の科目別平均履修率は、天文・宇宙に最も関係の深い地学Ⅰは約5%に過ぎず、物理学Ⅰも約20%にまで低下しており、きわめて憂慮すべき状況にある。天文学の内容は理科の他の科目ともさまざまな形で関連している。社会的関心の高い「天文学・宇宙物理学」の発展は、「理科離れ」現象を改善する切り札の一つになりうると期待されるので、天文・宇宙物理のコミュニティーは、そのための有効な対策を先導して提唱・実践するべきである。

5.1.2 大学における教育研究の特性

(1) 大学独自の装置

大学において、専門的な研究をほとんど知らない学生を、学部と大学院を通じた系統的な教育により研究の面白さのわかる若手人材へと育成するためには、特長のある観測装置の開発運用や萌芽的なプロジェクトの遂行が極めて重要である。大学独自の装置を保有すれば、観測時間を豊富に確保できる利点を生かして、テーマを特化した研究、時間軸（長期時間変化、突発現象）に着目した研究、多数の天体に対して均一なデータを取得する統計的な研究など、共同利用研の装置ではやりにくい研究が可能となる。実際、独自装置を有している大学では、「何度も失敗を繰り返しながらも学生が観測というものに慣れ、装置の限界に挑むような観測ができるようになる」という優れた教育効果が醸し出されている。

(2) 他分野との連携

また、大学においては、物理学の他分野（素粒子論から物性物理まで）のみならず、地学、化学、情報、生物、数学など他分野の研究内容や方法などを様々な形で学ぶ機会を作ることが容易にでき、研究の思わぬ展開や、学生の視野が広がる可能性が高い。他分野との交流がしやすい環境で、ちょっとした実験、基礎的な研究、一風変わった研究など、新しい研究の開拓が出来る。これはプロジェクト推進を主要な使命とする共同利用研では難しい。巨大科学化した天文学で新たな研究課題を作り出すことは重要である。大学における素朴な研究スタイルが多くが発想をもたらし、やがて新しい研究の芽につながる可能性を秘めている。

(3) 科学（天文学）を裾野から社会に広める役割

大部分の大学にあっては、学生の多くは研究者になることを目的としていないため、学部修了か、大学院に進んでも修士課程で修了し、天文学や物理学に直接関係しない企業などに就職する。このような場合、学生も保護者も、大学院教育においても、即戦力となる実学的な教育を期待している。特に地域拠点大学にあっては、研究者の養成よりも、高度な職業的能力を持つ人材を養成して地域に貢献することが重要な使命と見なされている。しかし、一方で、天文・宇宙に接近したいという社会全体としての要望（学生の教育、成果の公開、普及活動など）は強く、それに応えることも大学の重要な使命である。「天文学が学べるから、この大学に入学した」という学生が毎年何人もいるという地域拠点大学からの報告や、天文・宇宙教育の充実が、入試志願者の増加につながったとの報告もある。このように天文・宇宙の教育は、今や学生確保の有効な手段の一つとなっている場合もあり、その教育を通じて科学（天文学）という文化を地域という裾野から社会に広める役割を地域拠点大学が果たしていることに注目する必要がある。さらに地域拠点大学における教育を通じて興味を広げ、天文研究者への道を歩み始めた学生がいることも忘れてはなら

ない。

5.1.3 大学の研究者が直面する問題

(1) 継続的予算確保の困難

近年、国立大学法人の運営費交付金が漸減し、競争的資金が重視されるなど、研究現場では継続的・経常的な予算の確保が、きわめて困難になりつつある。国立大学法人では、運営費交付金のほとんどは教育経費に当てられているが、それでも教育用設備の充実はますます困難になってきている。基幹大学においてすら、特長のある観測装置の開発運用や萌芽的なプロジェクトの遂行はなかなか実現が困難な現状にある。大学の研究者は外部資金の獲得に努力をしているが、競争的資金の採択率は定常的な研究活動を安定して支えられるほどまだ高くない。大学での開発的研究の場合は、一度中断すると学生・大学院生の継続性がとぎれ、再開するには多大の労力が必要となる。共同利用研などによる大プロジェクトにおいて、大学が装置開発によって貢献するには継続的な予算が必要である。

(2) 少数グループ特有の諸問題

大学相互や大学と共同利用研の間の人事交流は活発とは言えない。ある程度の規模がある基幹大学においても、10年も20年も同じようなメンバーで同じような研究をしていては、研究にも教育にも活力が失われる。天文・宇宙物理の分野は、一人ないしごく少数のグループしかいない大学を多く抱えており、そのような大学でこの問題は特に顕著である。少数グループであるが故に自由闊達な研究を展開できるという側面もあるが、孤立している研究者は視野が狭くなりがちである。自らの視野を広げたり、それをもとに新しい研究テーマを開拓するために必要な、インフォーマルで広範囲の情報収集と情報交換の場が不足している。最近では学会の年会においても多数のパラレルセッションで発表が行われ、視野を広げるという年会の役割が以前に比べて減ってきている。

少数グループで天文の教育研究を行っている大学では、大学院教育に次のような問題を抱えている。少数の院生のみ受け入れた場合は、いわば「ひとりっ子」に近い状態になり、緊密な指導ができるという利点もあるが、課題の幅が狭く、学生の視野が広がらないことが多い。逆に、多数の院生を受け入れた場合は、よほど能力のある学生が揃わない限り、一人ないし少数のスタッフの負担が非常に重くなる。さらに、前述したように、学生もその保護者も、大学院教育でも実学的即戦力を期待しているという背景があるので、高いレベルの天文の教育研究を提供するのが困難である。

基幹大学以外の大学においては、学内に天文学という一分野だけでグループを作るのは容易ではない。地域拠点大学においては、学内で共同研究を実施する場合も、「地域における貢献」が特に求められる。したがって、狭い分野に留まらず、意識的に他の分野との幅広い連携が大変重要である。たとえば、理系においては科学教育、工学教育の一環として、文系においては文化や歴史における接点があると手がかりになる。その点で教育普及活

動や文化としての天文学をもっと全面に出すことが必要で、コミュニティー全体としての広報活動がきわめて重要であろう。

(3) 大学院生数の減少

大学院重点化に伴う基幹大学の大学院の規模拡大や、若年人口の減少に伴い、基幹大学以外では、修士課程の志願者数が減少している。さらに基幹大学を含めてどの大学においても近年、博士課程への進学希望者は明らかな減少傾向にあり、看過できない問題となっている。これは天文に限らず、博士学位を取得して大学や研究機関（以下「アカデミア」と呼ぶ）への就職を志望しても、ポスドク過剰問題に象徴されるように見通しが不安なこと、学部や修士卒に比べて、非アカデミアの就職先の選択肢が狭くなること、博士課程院生への経済支援が薄いこと、ものごとを理詰めで探究するという態度を嫌う社会風潮が強まっていること、などの複合効果によるものと思われる。このような背景から、とくに少数グループで天文の教育研究を行っている大学では大学院生がきわめて少なく、教育研究の活力を維持するのが困難な状況に置かれているケースが少なくない。

5.1.4 大学とコミュニティーの発展のために

多様な役割を持つ教育研究機関がお互いに助け合って、コミュニティー全体として発展するために、以下の方策を実行することが有効であると考ええる。なお、「複数大学による共同学科等」のあらたな仕組みを活用することは極めて重要であるので、節を改めて記述する。

(1) 情報格差の解消

孤立している研究者に視野を広げる多様な場をコミュニティーとして提供し、情報格差を解消する。インターネットなどの IT 技術を活用すれば、比較的早急に、それほど莫大な費用をかけずにスタート出来ると思われる。たとえば、主要な講演会を継続的にインターネットで見られるようにする、研究上の非公開事項には配慮しつつも、研究会の発表に使ったパワーポイントをウェブに載せるのを慣例とする、などが当面の取り組みになろう。国立天文台（あるいは天文学会）のウェブサイト、「最近の研究動向」のようなページを設けて、そこに行くと 1・2 年間の主要な講演や研究会の情報が全て得られるようにする。これらの取り組みを進めるに当たって、セキュリティポリシーに留意することはもちろんである。

(2) 講義への支援

基幹大学以外の大学における天文・宇宙物理の講義を支援し、そこで行われている教員などの人材養成、それに関連する教材開発、および普及活動などをコミュニティーとしてきちんと評価する。よい教科書や教材の情報を提供するウェブサイトを立ち上げるのは有効であろう。IT 技術を活用して基幹大学における基礎的な講義を配信する可能性も追求

する。非常勤講師として、当該大学の教員の専門分野以外の講義を行って、広く天文学の魅力を訴える活動をコミュニティーとして推進する。維持が比較的容易で基礎的な天体観測装置を広く配布して、教育と研究の一助にすることも有効であろう。国立天文台広報普及室と地域拠点大学などの連携を一層強めることが望まれる。

(3) 人事交流

教育研究の活力を失わないために、共同利用研と大学、及び大学同士の間で比較的頻繁な人的交流をおこなう。このためには、それを支える制度的仕組みが必要である。人的な交流を促進するために共同利用研や基幹大学への内地留学のような制度を作ることは有効であろう。共同利用研においては、海外の研究者との定常的な交流を計画的に行う仕組みを作り、それを通じて内地留学した日本の研究者が海外の研究者と交流できるようになればとても有効である。人的交流は双方向性が重要である。共同利用研や基幹大学から地域拠点大学などへの期間を定めた出向のような制度も検討に値するだろう。制度を整えることに加えて、人事交流が教育研究の活力を高めるための極めて重要な要因であるという意識を研究者が強く持つことが必要なことは言うまでもない。

(4) 大学連携の教育支援

東京大学木曽観測所や広島大学東広島天文台で行われている学生教育への支援や、国立天文台が行っている学生向けのさまざまな教育的取り組みを、より充実した大学間連携の取り組みとして発展させる。

(5) 大型計画に関わる共同開発の活性化

第3章及び第4章で述べられている長期計画、中でも大型のものは、共同利用研を中心に展開されることが多い。共同利用研と大学との共同研究・開発を活性化するために、大型計画の立案と準備段階から、中小のグループで担当できる部分を分かりやすく示して、参加意欲が湧くようにする。また、プロジェクトの遂行に当たっては、大きなグループが担当する部分と中小グループが分担する部分が相互に補完的になるような配慮をすれば、科研費の獲得も容易になることが期待される。コミュニティーとして常にこうした配慮を忘れないようにすれば、大学の設備を充実させ、最先端の技術を大学に導入するてこ入れになるであろう。こうして大学で学んだ学生が共同利用研での開発の担い手として成長して行くことも期待できる。このような活動には共同利用研と大学の強い連携が不可欠である。

(6) 社会への発信

理科離れの現状を改善するためには天文学の魅力的な成果を今以上に社会に発信して行くことが重要である。地域で行われる進学ガイダンスやオープンキャンパスなどで受験生

に天文学をアピールする機会が既に設けられているが、この活動をいっそう発展させることが有効であろう。プレスリリースなどの際には、共同利用研や基幹大学以外の大学の貢献があれば、できるだけその参加者の名前が出るよう配慮する。大学院生や若手ポストドクが、地域の中高校や自分の出身校に出向き、あるいはスーパーサイエンスハイスクール授業と連携し、研究の現場の面白さを伝える「出前授業」を行なうなどの活動も、積極的に推進されるべきであろう。

(7) コミュニティーの支持の表明

大学の中での改組再編がある場合には、当該大学の天文・宇宙物理の拠点やグループの活動がコミュニティから支持されていることを積極的に強調する。特に現在、大学の付置研やセンターの置かれている予算的な状況は大変厳しく、コミュニティからの支持があるかないかが、学内外における予算確保に大きく影響する。

(8) 大学院生への経済的支援の拡充

これは天文・宇宙物理の分野に限ったことではないが、科学技術立国を標榜する我が国においては、大学院生の果している役割が大きいにもかかわらず、その事実が社会的に十分に認識されていない。そのため大学院生に対する経済的支援が非常に貧弱で、その強化が極めて重要であることを強調しておく。近年 21 世紀 COE とそれに続くグローバル COE など、大学院生の支援を視野に入れた競争的資金プログラムが実施されて来た。しかし、経済支援の観点から見ると、意欲のある優秀な院生をすべて支援できる状況からはほど遠い現状であり、最近では支援拠点の数が少数に絞られることで、不公平感を生み出すという側面も無視できない。日本学生支援機構による大学院生への奨学金は、現状の貸与型から給付型へ次第にウエイトを移すのが理想であるが、返還免除制度はその移行過程における一段階とも考えられる。日本学生支援機構の奨学金返還免除の制度が大きく変わり、免除職制度がなくなって、返還免除を受けられるかどうかは貸与期間終了直後に、貸与期間の活動のみに基づいて判断される仕組みとなった。この不確定要素を含む仕組みが大学院への進学率を低下させる一因になっていると考えられる。大学院、特に博士課程における返還免除枠を拡充する、あるいは徐々に給付型を導入する予算措置が早急に取られるべきである。それと合わせて、貸与型であれば「ある程度の期間社会人としての活動の状況を基に判定する返還免除のロールモデル」、給付型であれば受給資格の基準、を提示できるような新たな仕組みの構築を検討すべきである。そうすれば、大学院入学前に人生の設計がしやすくなり、大学院への入学意欲の増加につながるであろう。

5.1.5 新たな制度の活用

平成 20(2008)年 9 月に文部科学大臣から中央教育課程審議会に出された新たな諮問の中に、「大学における教育課程の共同実施制度に係る大学設置基準等の改正について」が盛り

込まれている。9月25日に行われた中教審大学分科会では、これを受けた議論が開始され、改正の方向が了承された。答申を経た後、11月13日に設置基準の改正が公布された。平成21年から設置認可申請受付が始まり、平成22年4月に共同学科・学部等の開設が可能になる。研究者人口の問題から、少数の基幹大学以外では独自に強力な教育課程を整備しにくい天文・宇宙物理分野にあっては、この新しい制度の活用を真剣に考えるべきであろう。

例えば、装置を自前で保有している大学を中心として、複数の大学が共同で全国にいくつかの共同天文学科を開設することが考えられる。それらの共同学科でカリキュラムの一部を共有し、天文の教員がいる大学なら、日本中どこでも、最低限これだけは教育が出来るという仕組みが出来ると良い。改正の要項については以下のURLを参照されたい。

http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chukyo/chukyo0/toushin/08112007/001.htm

5.2 人材育成の現状と展望

5.2.1 修士・博士の学位取得者数と就職先

過去9年間の全国の天文・天体物理関連の学位取得者数は推定で、修士は113人/年（補正前82人/年）、博士は55人/年（補正前42人/年）である。これは、天文天体物理若手の会事務局によって1998-2006の天文月報に掲載された数（悉皆調査ではない）に対して、東大天文、東大物理、京大、東北大の悉皆調査値をもとにその不完全性を推定し、その補正を施した推定値である。参考までに、本稿を書くに当たって詳しい調査への協力をお願いしたいいくつかの大学ごとの数値を以下に掲げておく。

	修士(人/年)	博士(人/年)
東北大	10.7	4.7
東大天文	17.8	10.2
東大物理	20.1	11.1
名大	16.5	5.1
京大宇物	8.1	5.9
京大天体核	2.9	2.0
阪大	6.3	2.6

計	82.4	41.6

上記5機関で1999-2008の10年間に博士号を取得した416人の2008年時点での就職状況は以下の通りである。天文関連常勤職には、いわゆるアカデミアの研究職だけでなく、公共天文台や科学館などで、天文学・宇宙物理学の知識を直接生かせる職を含めた。

	天文関連常勤	民間	PD	その他	合計
1999.3	18	7	15	4	44
2000.3	18	6	16	1	41
2001.3	16	10	16	3	45
2002.3	5	9	22	3	39
2003.3	12	8	8	2	30
2004.3	10	5	27	0	42
2005.3	10	7	24	1	42
2006.3	4	14	25	6	49
2007.3	1	10	19	2	32
2008.3	4	21	27	0	52

合計	98 (24%)	97 (23%)	199 (48%)	22 (5%)	416

これからわかるように、416 人のうち約半数が常勤職に就職しており、その内訳は、天文関連の常勤職と民間の職がほぼ同数である。全体の残り約半数はポスドクであり、長期間ポスドクを続けている人も相当数に上ることが見て取れる。

5.2.2 人材の活躍する場の拡大

(1) 人事公募の状況

天文学分野の人事公募の状況（大阪教育大学定金晃三氏による調査）は以下のようになっている。2003 年 1 月号～2007 年 12 月号までの計 5 年に、天文月報誌の月報便り欄に掲載された公募記事の内、常勤職と判断される助教（助手）以上の職（研究員も含む）を集計した。国立天文台の上級研究員（任期 5 年）は含めた。職種の分類に当たって、講師は准教授（助教授）とみなし、理化学研究所の主任研究員は准教授、研究員は助教とみなすことにした。公募に教授または准教授とある場合には、教授、准教授それぞれ 0.5 人と数えるなどとした。

上記 5 年間に天文月報に掲載された公募の人数は計 162 名であり、年平均 32.4 人の募集が行われている。この期間中に有意な増加ないし減少の傾向は見られない。職階で分けると、教授 44 名、准教授 56 名、助教 54 名、研究員等 8 名であった。募集主体別のシェアは以下のようになっている。

国立天文台	22%
ISAS	10%
旧帝大（7 大学）	26%
地方国公立大	22%

私立大 9%

その他研究所等 9%

(その他研究所等には、国土地理院、理化学研究所、情報通信研究機構、海洋研究開発機構、ぐんま天文台が含まれている)

学位取得直後のPD等が応募するのに適している助教+研究員等は年間12.4人(全体の約40%)である。博士号取得者が全国で年間約55人であるので、競争率は約4.4倍と考えられる。この数字だけ見ると異常なほど高いとは言えないかもしれないが、この10年間に学位を取得した学生の約半数が、現時点でポスドクであるという現状は、若者を天文・宇宙の分野に引きつけるにはあまりにも不利な状況である。この現状を改善するには、アカデミアにおいて天文関連の安定した職の数を増やすことに加えて、天文関連の博士号取得者の活躍できる常勤職種をアカデミア以外にも開拓することが必要である。さまざまな事情から現在ポスドクの任期が3-5年となっているケースが多いが、これについて7年程度まで1つのポストを継続できるようにすることの是非も検討すべきであろう。

(2) 養成すべき人材の規模

天文学を学びたいと思って努力した若者が長期間ポスドクという不安定な状況におかれる事態を改善するには、安定した職の数を増やさなければならない。調査結果から判断すると、アカデミア内外の広い意味での「天文コミュニティ」の職を現在の2倍程度にするという長期的な目標を立てることは合理的であろう。ちなみに人口100万人当たりの天文学者の人数(IAUメンバー数で代用)の国別統計を見ると興味深いことがわかる。日本におけるこの数は約4.7人であるが、この2倍の9.4人を超える国が、少数統計を除外しても11ヶ国ある。天文学者の割合が多い天文先進国においては社会システムが日本と異なるため、これら多くの天文学者のすべてが日本の「常勤職」と同じポストに就いているというわけではないが、日本のポスドクと比べれば長期間安定な職に就いている。

天文コミュニティをほぼ2倍にするという目標の達成に向けては、繰り返しとなるが、アカデミアにおける天文関連の安定した職の数の増加と、天文・宇宙物理の教育を受けた人の活躍の場をアカデミア以外の分野において開拓することが極めて重要である。アカデミアにおける天文関連の安定した職の数を増加させるためには、コミュニティとして戦略的な息の長い取り組みをする必要がある。ビッグバン直後の宇宙にある銀河探査、太陽系外の惑星探査、地球の起源にせまる太陽系外縁部の探査などで近年飛躍的な進歩を遂げている天文学の魅力は社会に広く知られている。この魅力をさらに広く深く伝えることが、最終的には大学などにおける天文・宇宙物理の教育研究に対する社会的要請を高めることにつながると考えられる。また、大型の国際共同プロジェクトが重要になる中で、国際対応の出来る人材及び大型プロジェクトをマネージする人材が必要になっていることにも目を向けなければならない。アカデミア以外の分野の開拓については次項に述べる。

(3) 中等教育課程教員及び公務員の重要性

アカデミア以外における職種の開拓については 5.4.1 節（産学連携）においても具体的な提案が示されているので、ここでは産学連携の視点以外から重要な指摘をしておきたい。

まず第 1 は中等教育課程教員の重要性である。深刻な理科離れが進んでいる現状を鑑みると、中学、高校の理科教師（数学教師も含めて良い）という職種は重要な役割を担っている。教員養成課程の内容に関する検討も重要であるが、それは本報告の範囲を越えるので、ここでは制度上の問題を指摘するに留める。

「社会総がかりで教育再生」という潮流が高まる中、教員採用の権限を有する各地の教育委員会で、最先端の知識を学校現場に伝えることを目的として、理・工学や教育学などの博士号保有者を対象にした教員採用特別選抜を実施する所も出てきている。

現状では、学部段階から計画的に学習をしないと、大学院になって教員免許の取得を思い立っても取得するのは極めて困難である。学部段階から学生に、理科教師という重要な職種への目を開かせるようにコミュニティとして働きかけることが重要である。それとともに、教職科目として大学院科目を認定し、大学院在学中に教員になろうと考えた院生が教員免許を取りやすいシステムを主要な大学で構築することは、大学院修了者に教職への道を開くために決定的に重要である。また近年、文科省の「特別免許状制度」の活用にも関心が高まっている。この制度は教員免許状を有しないものでも教員として採用する道を開くもので、その活用をコミュニティとしてアピールすることも検討に値する。

参考までに、文部科学省による、「教員免許制度の概要－教員を目指す皆さんへ」のページの URL を以下に掲げる。

http://www.mext.go.jp/a_menu/shotou/kyoin/main13_a2.htm

第 2 は広い意味で学術政策に影響力をもつ公務員の重要性である。我が国では、政策を立案し実行する指導者層に理工系出身者が極めて少ない。このことを考えると、アカデミア以外で開拓すべき重要な分野として公務員、特に国家公務員をあげるべきである。国家公務員の採用のシステムは学部卒を主な対象としており、大学院生特に博士課程修了者には極めて狭き門となっている。理系の博士号を有する人材が国家公務員としてその力を発揮できるような制度の改革が早急になされるべきである。

5.3 宇宙研究の広がり和他分野との連携

5.3.1 素粒子・原子核分野

(1) 素粒子物理学

大型加速器はしばしば宇宙初期の状態を再現すると言われるように、加速器を用いた素粒子実験は、宇宙の創成と初期進化、ダークマターの正体、物質と反物質の(非)対称性、ブラックホールと余剰次元、超新星爆発の機構や中性子星における高密度核物質、太陽ニュートリノ、超高エネルギー宇宙線の加速と伝搬など、宇宙の研究に関連する貴重なデータを供給する。新たなフロンティアを求めてより高いエネルギーの加速器の建設が進み、2008

年 9 月に稼働を始めた欧州原子核研究機構 CERN（セルン）の大型ハドロン衝突型加速器（Large Hadron Collider、略称 LHC）は、14TeV という世界最高エネルギーをめざしている。日本は高エネルギー加速器研究機構(KEK)、東京大学素粒子物理国際研究センターなどを中心に、各地の大学の研究者が LHC のアトラス(ATLAS)実験に参加している。LHC に第一に期待されるのはヒッグス粒子の発見である。素粒子の質量の起源にかかわるヒッグスの発見は素粒子物理学の最重要課題であるが、同時に初期宇宙における進化にかかわる「真空の相転移」を裏付けるものとして宇宙物理学においても重要な意味をもつ。第二に期待されているのは超対称性粒子の発見である。もっとも軽い超対称性粒子がダークマターの正体と考えられており、その発見は大きな謎であるダークマターの正体解明に直接答えるものとなる。

現在、次世代の加速器として、日本人研究者を含む国際チームによって国際線形加速器（International Linear Collider、略称 ILC）の計画が進められている。ILC は電子・陽電子コライダーであり、LHC では実現できないバックグラウンドの少ない精緻な実験が可能であり、ヒッグス粒子と他の基本粒子との結合定数の決定、超対称性理論が標準理論となりうるほどの多種の超対称性粒子の発見が期待されている。これらの発見から得られるデータは宇宙の進化解明に大きく寄与するものであり、ATLAS 日本グループをはじめこの分野の研究者との研究連絡、連携が今後さらに望まれる。

一方、超弦理論に基づく膜理論は、LHC 実験で量子的ブラックホールが生成され、それが蒸発する現象が観測される可能性があることを予言している。実際にこの現象が発見されれば歴史に残るような発見である。この 10 余年、超弦理論に基づく宇宙論は大きく進み、我々の宇宙は高次元空間の中に浮かぶ“膜”だとする膜宇宙論が提唱され、新たな宇宙論の展開となっている。過去 15 年ほど、素粒子論と宇宙論の連携は急速に進んでおり、今後そうした連携が一段と強化されるべきであろう。

日本原子力研究開発機構（JAEA）と高エネルギー加速器研究機構（KEK）が共同で建設、運営を行う J-PARC（Japan Proton Accelerator Research Complex：大強度陽子加速器施設*）が稼働をはじめ、J-PARC よりスーパーカミオカンデにニュートリノビームを送り、ニュートリノ物理学の研究を進める T2K 実験がまもなく本格的に始まろうとしている。この実験により、もっとも大質量のニュートリノと、反対にもっとも小質量のニュートリノ間の混合角 θ_{13} や、3 種類のニュートリノの質量の大小の順序などが決定されると期待されている。これらは宇宙ニュートリノの研究で重要な役割を果たす。これらは、とりわけ超新星内部でのニュートリノ振動・転換を決めるパラメータであり、その地上での検出から源での放出されるニュートリノを決定する重要な役割を持つ。

超高密度の新物質、クォーク・グルーオン・プラズマ(QGP)を生成しその性質を解明する研究が、世界最高エネルギーの原子核衝突型加速器、RHIC（相対論的重イオン衝突型加速器）を用いて、米国ブルックヘブン国立研究所で進んでいる。日本から理化学研究所はじめ多数の大学が参加している。金の原子核衝突により非常に高密度の物質が生成されてい

ることがほぼ確立したと思われるが、今後さらに LHC を用いた実験により QGP の研究はさらに大きく進むと期待されている。温度が 100MeV を越える宇宙初期の状態は QGP であると考えられている。また超新星爆発時に中心領域に高温のクオーク相が形成される可能性もある。宇宙初期や超新星爆発について新たな示唆をもたらす可能性が考えられる。また同時に量子色力学 (QCD) 計算による QGP やクオーク物質の理論的研究も、核力を QCD から導くことに成功するなど大きく進んでいる。初期宇宙の進化、超新星爆発機構解明にこの分野の研究者との連携を一段と強めることが両者の今後の研究に大きく寄与するであろう。

さらに、実験・観測に関する素粒子・宇宙の新たな連携の動きも出てきている。特に、宇宙背景放射偏光の観測によるインフレーション宇宙の検証は、加速器では到達できない超高エネルギー物理を探るユニークな手段として、素粒子実験に従事していた研究者が積極的に参入しはじめている。チリ・アタカマにおける QUIET 実験、PolarBeaR 実験等米国との共同実験を推進し、新たな背景放射観測衛星の提案をおこなうなど我が国における背景放射観測の新たな展開が期待される。

(2) 原子核物理学

原子核物理分野との研究連携では、原子核物理側から、宇宙現象を理解するための基礎物理を天文・宇宙物理分野に提供することが重要となる。なかでも今後 10 年から 20 年を俯瞰した際に重要なのは、元素合成に関与する不安定核の諸性質と反応、及び高密度核物質の状態方程式の 2 点である。

元素合成については、星の進化に大きく影響する不定性の大きな核反応の精密化等が必要であると同時に、 r -過程とよばれる元素合成過程の解明が焦点となる。 r -過程とは、ウランや金など、鉄より重い元素のほぼ半分を合成し、ヒトや生物の生命維持に必須な元素を生み出す重要な物理過程であるが、どこで、どのように起きているのかわかっていない。この r -過程に関与する、極端に中性子過剰な原子核の質量、半減期、核構造、中性子捕獲反応について、理研 RI ビームファクトリー (RIBF**) において世界で初めて実験が敢行される。今後取得が見込まれる原子核データは大量である。

高密度核物質の状態方程式については、RIBF において標準核密度の 2・3 倍程度までの情報が得られる。それ以上の密度については J-PARC において、中性子星中心部に存在が示唆されている中間子凝縮に関わるハイパー核の情報が得られる。これらを統合して、高密度核物質の状態方程式の理解が格段に進むと期待される。状態方程式の理解は、超新星爆発のメカニズムや中性子星の内部構造に密接に関係する。さらに重力波検出計画において第一の重力波源と想定されている、中性子星連星が合体する際の重力波放出にも、直接的な影響をもつ。

核物理分野においては、実験的に未知の物理量が、日本の研究施設において世界で初めて得られるというすばらしい状況が準備されつつある。これらの新しい核物理学上の成果

を活用することによって、今までとは質的に異なる局面への展開、ならびに十分な精緻化など、宇宙・天体现象の理解が飛躍的に進展することが期待される。世界的に優位な環境の下で我が国の研究者がお互いに研究連携し基盤を共有することにより、両分野の研究戦略上、効率的なデータ取得とそれらの活用を目指すべきである。

*) 総工費約 1500 億円。2009 年 1 月に 30GeV の陽子ビームの取り出しに成功。

**) 総工費約 500 億円。不安定核ビーム発生系の建設を終え、基幹実験装置群の建設整備中で、2012 年の完成を目指している。

5.3.2 地球・惑星科学分野

天文学と地球惑星科学は元来、明確な線引きのあるものではなかったが、観測の進展と計算機の発展はしばらくの間、両者にそれぞれ独自の発展の時間を与えてきた。しかし、太陽系外惑星の発見により星形成にともなう惑星形成の普遍性が明らかとなり、天文観測の重要な目標としてハビタブルプラネット（水が液体として存在し得るような温度を持つ惑星）と生命の探査が掲げられた。また初期宇宙において、後の惑星形成に重要な役割を果たす多量のダストが存在することが明らかとなった。よって今後の天文学の発展において、地球惑星科学との連携がますます重要となることは明確である。また、惑星探査の進展は、惑星形成・惑星表層環境などについて新たな知見を与えるが、これらの探査には天文学の手法が重要な役割を果たす。すでに天文学と惑星科学の境界領域では多くの科学的交流と人材交流がおこなわれているが、将来、教育を含めた交流をさらに活発化させる必要があるであろう。とりわけ以下の分野において連携が重要と考えられる。

(1) 星・惑星形成分野

分子雲から惑星形成にいたる過程における、物理と化学の相互作用を理解する。とりわけ、ダストの種類やサイズによる輻射場の変化、磁場の役割の定量的評価、円盤進化などを、モデルと観測の両面からつきつめることが重要である。

(2) 太陽系外惑星・ハビタブルプラネット分野

太陽系外惑星の観測のもっとも重要な目標は、ハビタブルプラネットの探索である。ハビタブルであるか否かは、単に親星からの距離で決まるわけではない。離心率、軌道傾斜角、自転周期などの惑星の軌道特性に加え、惑星サイズ、惑星内部と表層の物理条件および化学条件が大気と水を持ちうるものかどうか、さらに長期にわたる気候安定性がどのようなものかなど、多様なパラメータがかかわる。これらを理論と観測の両面から追求し、宇宙におけるそれらの条件の普遍性と、宇宙の進化におけるハビタブルプラネットの存在可能性を解明することが重要である。

(3) 固体物質分野

宇宙における固体物質の重要性は、星間空間にとどまらない。誕生から数億年以内の初期宇宙にすでに大量のダストが存在することから、超新星におけるダスト形成が注目されている。実際の観測ではダストの種類やサイズを決定することは不可能であり、理論による推定が重要となる。どのようなダストが形成されるかは物理と化学の相互作用により決定されるため、多くの物質科学的データが必要である。理論、観測、実験の緊密な連携により、宇宙におけるダストの形成進化を解明することが重要である。

5.3.3 生物分野 (Astrobiology)

天文学・宇宙物理学は、宇宙に存在する天体諸階層の起源と進化を追求する学問である。歴史的には研究の進展に伴って、天体核物理学や素粒子的宇宙論を代表とする学際的な学問分野の地平が次々と切り拓かれてきた。このような天文学の歴史をふまれば、今後、天文学者がイニシアチブをとりながら宇宙生物学を開拓しておくことの重要さは自明であろう。生命の誕生と進化を科学的に解明するためには、その環境としての宇宙自身の進化、およびその中における惑星系の誕生と進化の理解が不可欠である。今まさに、それらを有機的に融合するための土壌が整いつつあるといえよう。

1995年に初めて太陽系外惑星が発見されて以来、すでに350個を超える系外惑星の存在が報告されている。つまり惑星系はこの宇宙において普遍的な存在であったのだ。我々の太陽系という特殊な存在を説明することが目的であった惑星形成モデルは、今や汎惑星系形成モデルへと一般化されつつある。この文章を書いている時点では地球型の太陽系外惑星は未だ発見されてはいないが、それも単なる時間の問題であろう。それらの中に、ハビタブルプラネットもやがて発見されるに違いない。ここまでは、現在の天文学をそのまま発展させることで確実に成果が期待されるが、宇宙生物学の重要性はまさにその先にある。

いくら数多くのハビタブルプラネットが発見されようとも、それだけではそこに生物がいるかどうかを知ることはできない。そこに生物が存在する兆候（バイオマーカー）を特定するための観測的手法を提供するのはもちろん天文学であるが、何がバイオマーカーとなるのかを教えるのが、宇宙生物学の使命の一つである。そこでは、地球の初期進化における大気中の水や酸素の存在量の時間変化を再現し、生物界の個別性と普遍性を探究し、さらには現在地球が直面している諸問題によって大きな影響を受ける文明の未来を予測する作業が必要とされる。これらを総合的に解明し、宇宙・恒星・惑星と生命の共進化を探る試みを、ここでは宇宙生物学と定義したい。

この学問は必然的に学際的であることは明らかである。一般に研究が過度に細分化され、極めて狭い専門分野を深く掘り下げることが不可避となっている感のある現在、天文学、化学、地球惑星科学、生物学、物理学などの最新の成果を持ち寄ることで初めて可能となる宇宙生物学は、魅力にあふれた21世紀の科学である。これはまた多くの若者を惹き付け、一般社会からの関心にも応える力をもつといえよう。

5.3.4 プラズマ・流体分野

宇宙の通常のバリオンのほとんどは、プラズマ状態にある。すなわち、星の内部や外層大気、星間物質、銀河間ガスなどはすべて多かれ少なかれプラズマ状態にあり、電磁場と強く相互作用する。このことを反映して、プラズマ物理学はその創成期から天文学や宇宙物理学と密接な関係を持ってきた。アルフベーンによる電磁流体力学は宇宙プラズマや太陽黒点の考察がひとつのきっかけだったし、チャンドラセカールやスピッツァーのプラズマ粒子の衝突断面積や電気抵抗の計算は恒星系力学の自然な応用の結果であった。太陽フレアを説明するために、パーカーらによって発展させられた磁気リコネクション機構は、磁気核融合プラズマの閉じ込めを困難にする基本物理過程であるし、地球磁気圏尾部の爆発的エネルギー解放をもたらす基本過程の一つでもある。逆に理論天体物理学者スピッツァーは天体磁気プラズマをヒントに、磁気閉じ込め核融合装置ステラレータを発明し、核融合研究のパイオニアとなった。わが国でも同じころ（1950年代～60年代）、林忠四郎や早川幸男は、宇宙物理学と同時にプラズマ核融合研究も推進していた。

流体力学と天文学とのかかわりはもっと古い。始まりはもちろんニュートンであろう。ラプラスは太陽系の起源を流体力学に基づいて考えた。近年では、乱流と天体現象のつながりが深い。このような密接な関係を反映してフランスのニース天文台は世界的な流体力学研究の拠点の一つとなっているほどである。

近年、プラズマ物理学や流体力学と天文学・宇宙物理学のつながりが、かつてほど強くないのはお互いの発展にとって不幸な事態である。このような状況を改善すべく、我が国では、数年前より物理学会、天文学会、地球惑星連合大会の間に、プラズマ宇宙物理共催セッションが始まり、流体力学会では宇宙流体力学セッションが設けられた。大阪大レーザーエネルギー学研究センターを中心に、高強度レーザーを用いて高温高密度プラズマをつくり実験室で宇宙の現象を再現・実験する実験室宇宙物理学という新しい分野も生まれた。天体爆発現象における無衝突衝撃波や粒子加速、高密度物質の不透明度（オパシティ）、宇宙ジェットの流体不安定性の研究などで、この新しい分野が威力を発揮すると期待されている。一方、核融合の磁気閉じ込め装置（トカマクなど）は、降着円盤の MHD 乱流と共通の物理現象を示すことから、天体物理シミュレーター（astrophysical simulator）と呼ばれることもある。太陽やその他の天体における磁気リコネクションへの応用を目指した、磁気リコネクション実験も始まっている。さらにプラズマでは、電磁場という長距離相互作用が働く結果、さまざまな非線形現象、エネルギーの非等分配、自発的な秩序形成、自己組織化などが発現し、重力に支配された宇宙と、緊密なアナロジーをもつことにもなる。このような研究を契機として、プラズマ・流体分野と天文学・宇宙物理学分野の連携がさらに深まることを期待したい。

5.4 宇宙研究と社会

5.4.1 産学連携

天文学はしばしば基礎研究の中でも、日常生活と無縁な分野の代名詞として使われることが多い。日本の天文学の歴史を見ると、ある時期まで、装置の開発や観測の実施よりも、理論研究を重んじる風潮が強かったことは否めない。その代償として日本は、ハッブル宇宙望遠鏡、COBE 衛星、WMAP 衛星などの新技術により、1980 年代の末頃から爆発的に宇宙の観測的研究が進展した際に、遅れをとってしまった部分もある。しかし、太陽電波観測から野辺山 45m 電波望遠鏡を経てアルマに続く電波天文学の開拓や構築、「はくちょう」から「すざく」に至る X 線衛星や、「ひのとり」「ようこう」「はるか」「あかり」「ひので」などさまざまな波長の天文観測衛星による観測、「すばる」望遠鏡の建設などを通じて、また神岡鉱山でのニュートリノ観測など隣接分野からの刺激もあって、実験や新技術開発への意識が年を追うごとに高まって来たことは、喜ばしいことである。数値的に言うと、たとえば 1988 年秋の日本天文学会年会では、全 245 講演のうち 15.5% に当たる 38 件が「観測機器・情報処理」セッションに含まれていたのに対し、2008 年春の年会では、「地上観測機器」と「飛翔体観測機器」セッションを合計すると 160 件で、これは全 629 講演の 25.4% に達する。

実験観測技術を重視する意識が、もっとも端的に表れる場面が、産業界との連携であろう。なぜなら宇宙の観測に新しい切り口を開拓するさい、産業界がもつ優れた技術を有効に取り込むことは必須であり、研究の成否を左右する大きな鍵の 1 つとなるからである。たとえば「すばる」主鏡の能動制御、カミオカンデの光電子増倍管、2008 年 6 月に米日伊などの協力で打ち上げられたフェルミガンマ線天文台 (GLAST) のシリコンストリップ検出器などは、日本の優れた産業技術をもって初めて可能となったものである。あるいはまた、天文学の世界で開発された技術が企業に吸い上げられ、応用展開される場合もある。GRAPE に代表されるような専用の超高速コンピュータや、宇宙ガンマ線撮像技術の医療診断への応用はその好例と言えよう。隣の分野に目を移せば、素粒子実験における大量で高速なデータ収集や、オンラインの機器制御が、つねにコンピュータの発達をハードとソフトの両面から促し、汎用ワークステーションやインターネットの爆発的発展の基盤となったことは、たいへん教訓的である。

このような産学連携はけっして、大型望遠鏡や科学衛星などの巨大プロジェクトに限った話ではない。中小望遠鏡による突発天体の監視、特色ある掃天観測、公開データを活用したカタログづくりなど、小規模グループで推進できる研究においても、遠隔操作によるロボティクス、安価で高速な計算機、信頼性の高いオンライン制御技術、特殊な光学素子や光学系の開発、専用ソフトウェアの開発と応用展開、高精度の画像処理など、企業との小回りの効いた連携が考えられるのではなかろうか。ひいては、世界最高水準をもつ日本のアマチュア天文家も、こうした連携を支える一角となりうるかもしれない。

重要なのは、研究者と企業が互いにシーズとニーズを提示し、密接に情報を交換しつつ、

互いに一歩すすんだレベルに挑戦することである。とくに天文学者は、遠方の天体や宇宙の情報を少しでも多く手に入れ、誰も見たことがないものを見たいという強い欲求を持つ。研究者が、一見すると無理と思える性能を追求することは、企業にとっては新たな挑戦への動機づけや、自社技術の新たな応用分野を開拓する契機となり、企業技術者のプライドに訴える力となりうる。バブル崩壊後、日本では多くの企業が、長期的な展望にもとづく社内の研究部門を縮小し、短期的開発および生産に集中する傾向が強まった結果、日本の産業そのものの基盤が揺らぎかねない状況にある。そうした中で、基礎科学は企業に対し、長期的な展望にもとづく研究開発の目標を提示する力をもっており、こうした連携は産業界にも重要な牽引力となりうると思われる。また狭義の産学連携からは外れるが、こうした技術開発において、異なる研究分野と積極的に相互作用することも重要である。

産学連携を積極的に進めるには、どうしたら良いだろうか。多くの国立大学では法人化の後、また私立大学ではそれ以前から、企業と研究者の仲介をする「産学連携室」のような組織を設け、連携を推進している。そうした機関ごとの取り組みに加え、天文学の分野でも、学会レベルでの取り組みも可能ではなかろうか。たとえば春秋の年会のさい、より広い企業に声をかけ展示ブースへの出展を誘致する、天文月報に「天文観測を支える産業技術」のような記事を連載するなど、あまり大がかりにならずに可能な、さまざまな取り組みが考えられる。宇宙の研究の強みの1つは、民間企業にも多くの潜在的ファンがいることであり、そうした利点を活用したいものである。

もう1つの方策は、学部・大学院教育に関わる教員の意識の変革である。ここ数年いろいろな理系の分野で、大学院（とくに博士課程）への進学者が減り、修士修了者だけでなく、博士の学位を取得した若手も、積極的に民間に就職する傾向が進んでいる。その一方で天文学分野の一部では、依然としてアカデミア志向が強く後継の研究者養成にばかり目が向く傾向が払拭し切れていない。民間に就職すれば天文学へ貢献する道が閉ざされるかのような教員および学生の意識を変革しないかぎり、天文先進国並みの強力なコミュニティーができないことは明白である（5.2.2 参照）。教育の現場で教員が、基礎研究の後継者を適切な数だけ育成し続けるとともに、基礎科学で教育を受けた人材が、非アカデミア分野でもプラス意識で活躍できる風土を醸成し、そのための環境を整える努力をすることが決定的に重要である。

そのためには、教育現場に産学連携を積極的に導入し、研究者、学生・院生、企業技術者が一体となって技術開発に取り組む場面を設けることが有効であろう。それにより、一方では企業に基礎研究へ目を向けてもらい、他方では学生・院生に具体的な技術開発の現場を体験させ、将来の進路にかかわらず、先端技術に対する意識を高めることが可能となろう。もちろんこうした取り組みは、天文学の分野に限定すべきことではなく、広く物理学、化学などとも協力すべきものである。将来的には、民間の技術系企業に就職した卒業生が、基礎研究で培った技術を応用展開したり、宇宙の観測に向け新しい技術や観測方法を提案したりする事例が増えることを期待したい。

5.4.2 科学コミュニケーションと科学リテラシー

(1) 現代社会と基礎科学、科学コミュニケーションおよび科学リテラシー

現代の基礎科学研究は、社会から独立しては存在できない。基礎科学の研究は応用を直接めざすものではないから、国・社会の支援がなければ組織的に進められないこと、そして社会も基礎科学の進展なくしては成り立ち得ないことが、その基本的な理由である。

ではなぜ、基礎科学を進めることが大事なのか。ここでは、人類がどのように今日の文明を築いてきたか、やや長期的視点で歴史を見れば明らかといえ、十分だろう。しかし、その事実は必ずしも社会に広く認識されているわけではない。それゆえ、人間を取りまく自然の理解を推し進める基礎科学研究の面白さとめざましい成果や、基礎科学の人類社会における長期的な役割が、社会に対して絶えず発信されなければならない。そうした発信は、まず科学者自身、さらに科学研究・教育の組織の責任である。加えて現代社会は、巨大化したその活動が社会自身や自然環境に多大な影響をもたらすから、科学に基づく長期的判断や合理的な施策が強く求められる。それには専門家に加え、広い範囲の市民の科学的な理解力と思考力が重要になることは、言うまでもない。

現在、科学コミュニケーション、科学リテラシーの重要性が叫ばれる要因はここにある。科学コミュニケーションは科学的知識や思考法の伝達であり、主に研究者から市民への伝達、科学の普及手段として、欧米では長い歴史がある。科学リテラシー（以前から教育学で用いられたリテラシーとは、文章・言語を読み解く力のこと）は比較的新しい概念で、市民誰もが持つべき科学を読み解く力であり、市民から大学までさまざまなレベルで、その強化の試みが始まっている。

(2) 日本社会における科学研究と研究者の意識改革

近代科学は、西欧社会の中で発生し、成長した。科学者は常に社会の中で、科学の存在と有意性を宣伝し、理解と援助を得なければならなかったから、科学者の中にはそうした意識や文化が、自然に育てられてきた。その典型は、有名なファラデー・レクチャーなど、英国王立協会における科学の社会教育・普及活動（科学コミュニケーション）に見ることができる。フランスやドイツでも同様であり、米国でも天文台などは早くから一般に公開されてきた。

これに対して日本では、明治政府が科学と技術の急速な輸入を進め、官製の大学・科学研究組織が一気に構築された。もちろん民間からの支援は望めなかったことも加え、国家財政丸抱えでの科学研究が進んだのである。そのため、大学も研究者も社会への働きかけの必要性を感じることなく、「お上」に予算を求め「お上」からの資金で研究を進めることに慣れてきた。こうして、研究者は偉く、研究だけが大事という、「象牙の塔」や「護送船団」とも呼ばれる閉じこもった研究者意識・雰囲気が育成されてきた。このことが、国立大学法人化の際に巻き起こった大学批判を招いた背景の一つであることを、私たちは認識

しなければならない。今や国家予算といえども、いや国家予算であるがゆえに、市民社会の理解と支援が欠かせない。日本の科学も本来あるべき状態に進化したと考えるべきだろう。遅まきながら科学コミュニケーションが叫ばれ、科学リテラシーの講座も誕生していることは評価できる。日本社会では科学の歴史の浅さも反映して、科学リテラシーすなわち科学への一般の理解度が欧米諸国に比べて低いのは、事実である。しかし何よりも、まず科学者・研究者の意識改革が重要ということを、強調したい。

(3) 天文学分野における科学コミュニケーションの状況

天文学分野は、日本の科学研究では社会とのコミュニケーションで大きな成功を収めていると評価されている。それは大きな広がりを持つ社会教育施設（公開天文台、科学館、プラネタリウム）と、国立天文台や宇宙科学研究所など中枢的な研究機関の、努力および相互協力の構築に負うところが大きい。大学でも天文分野の科学コミュニケーションが強化されてきたのは、研究者の中に宇宙の面白さを伝えたいという熱意が比較的高かったからである。国際水準から見れば改善の余地も多いとはいえ、天文学がそれなりに科学コミュニケーションで成功を収めてきた主な要因を、以下にまとめる。

- 1) 天文・宇宙は、人間の好奇心と想像力に直接答える面白さやダイナミズムに満ちた分野であり、また日本での研究も近年活発・先進的であること。かつ、それを活かす工夫が、研究・普及・教育の現場でなされてきたこと。
- 2) 統計的には社会の科学的関心・理解が薄いとされる日本だが、公開天文台の数や活動では世界でも群を抜き、プラネタリウムの数も米国に次ぐなど、社会教育の広がりが大きく、それらを足場に学芸員や地域のアマチュア天文家が活動を展開していること。
- 3) 宇宙科学研究所(現 JAXA)や国立天文台など公的研究機関で早くから公開が進められ、また上記社会教育の場との連携が組織的に進んだこと。国立天文台では、研究者による広報体制の構築や広報普及活動に予算の1%を割くなどの先進的な施策を進めたこと。

こうした天文学分野の特性は2009年の世界天文年でも遺憾なく発揮され、全国的なイベントや共同作業の広がり、反響を引き起こした。とはいえ、満足すべき状態からはまだ遠いことも認めなければならない。とりわけ個々の研究者がこうした活動に割く時間はまだ少なく、偏っている。学会や大学での組織的取り組みも散発的である。研究者の意識改革は、道半ばと言わねばならない。

(4) これからの方向・展望

2009年の世界天文年の活動と同年7月の皆既日食に対する社会の熱気が示すように、根源的で、想像をはるかに超える世界である宇宙に対する社会的関心は大きい。子供や若者の好奇心を呼び起こし、自然と科学への関心を育てる入り口としての天文学の役割は大変重要である。一方で（特に日本で顕著だが）、大人になるにつれて宇宙や基礎科学は現実社会や応用に遠いという感覚が強まり、関心は失われる傾向にある。しかし社会教育の場で

は、仕事の間を離れると再び宇宙への関心がよみがえるという傾向も顕著に見られる。おそらく日本で最も科学コミュニケーションと科学リテラシーを必要としているのは、官・民を問わず、社会の指導層である。社会の指導層に理工系出身者が極度に少ない文系王国という、日本の特殊な状況がこれに輪を掛けていることは、確かであろう。以下、対象に分けて今後の方向を論じたい。

(a) 子供・若者の科学リテラシーの強化

この世代に関しては学校教育が基本的に重要であり、かつ問題である。受験体制が理科教育を衰退させたことは間違いないが、入学者数を増やすために、広い教養や科学力を軽視する流れを結果的に作り出してきた大学の責任も大きいといわねばならない。また、高度な専門知識を持つ大学院生が、初等中等教育の理科教師の免許を取得したいと希望する場合に大きな制度的困難があることは、すでに指摘したとおりである。そうしたシステム上の改革が日本の「理科離れ」離脱には不可欠だが、当面の方策としても長期的にも、大学や研究機関が学校教育に協力する体制作りが必要である。小中学校の現場では、天文分野は教えるににくいという声がある。学習の内容や方法についての検討や、理科教師の研修なども、当然その協力体制に含まれるべきである。

もう一つ、プラネタリウム、科学館、公共天文台など社会教育機関の役割は大きく、その機能と活動を評価すべきである。それとともに、大学や研究所、研究者個人がその現場と協力し科学コミュニケーションに参加する方策を、具体的に推進すべきである。

(b) 社会教育における科学コミュニケーション・科学リテラシーの強化

科学館や社会教育組織は、科学コミュニケーションの実践の場である。ここでは来訪者への科学コミュニケーションに加え、施設側の職員の科学リテラシーの向上強化を継続的に進めることが重要である。これらの施設で活躍する科学インタープリタ、科学コーディネータの養成を援助することも、これからの大学や研究機関が寄与できる重要なテーマである。また大学を含めた社会人教育では、科学コミュニケーションの力を持つ社会人を増やし社会において活動してもらうことも、今後意識的に進めるべきことであろう。

(c) 文系王国からの離脱

より長期的・全体的には、社会の指導層がほとんど文系出身者で占められ、理工学の専門的知見が教育や科学政策を含むさまざまな施策に活かされることが少ないという日本の特殊な状況を将来に向けて変えてゆかなければ、どんな対応もその場しのぎになる恐れが大きい。科学コミュニケーションの対象を現在の指導層にも広げる努力を積極的にすることはもちろんであるが、今後は、理工学の専門的知見を持つ人材が指導層に入る機会が増えるような状況を社会に醸し出すことが必要である。研究者コミュニティとしては、本稿で何度も強調した、アカデミアと非アカデミアに関する意識改革がその第一歩となろう。

理系の博士号取得者が学術政策を企画立案する国家公務員として活躍できる道を開くことは本質的に重要である。明治維新以来長い年月をかけて出来た社会をそろそろ変えていこうという気概を、若い人々に期待したい。

5.4.3 国策的宇宙開発研究と基礎的な宇宙研究

第3期科学技術基本計画によれば、わが国の研究には、「研究者の自由な発想に基づく基礎研究」と「応用を主眼とした政策課題対応型の研究開発」の2種類が定義されている。前者は、研究者の自由な発想、公平な競争・評価、公開の原則などに基づいて、ボトムアップで実施されるもので、萌芽段階からの多様な研究や、時流に流されない普遍的な知の探求を、長期的視点の下で行なうとされる。言うまでもなく、天文学・宇宙物理学の研究の真髄は、こちらに属する。後者については、社会的に緊急なニーズや、経済・社会の変革の展望にもとづいて政策目標を策定し、それに沿ってトップダウン的に重点化を図るものとされている。さて、一般論としての分類はこの通りかもしれないが、ここには重大な問題が内在しており、十分な注意が必要である。それを以下の3つの観点から論じたい。

第1の問題点は、わが国では20世紀末からの行政改革、国立大学法人化、総合科学技術会議の設置といった一連の流れの中で、トップダウン型研究の偏重や過度の集中投資等が急速に進んでいることである。公的研究資金では、国立大学の基盤的研究経費である運営費交付金は減少の一途を辿る一方、「21世紀COE」、「グローバルCOE」、「世界トップレベル国際研究拠点」、「最先端研究開発支援プログラム」など、選択的で巨額な競争的資金の枠組みが続々と打ち出され、結果として基礎的研究分野に疲弊を招きつつある。この背後には、研究資金をトップダウン的に重点配分すれば良い成果が得られるという誤った幻想や、ビッグサイエンスを景気対策の公共投資と見る近視的な発想などがあるように思われる。基礎科学の長期的発展のためには過度な重点投資を抑制し、科学研究費補助金や共同利用など、世界に誇る優れたボトムアップのシステムを強化する必要がある。

第2には天文学が本質的に、「政策課題対応型」に最もなじみにくい分野であると同時に、それが「紙と鉛筆」のみの学問ではなく、大型望遠鏡、ロケットや科学衛星、最先端のコンピュータなど、多くの場面で「ビッグサイエンス」というべき大規模な予算を必要とし、しかも大部分を税金に頼らねばならないという事実である。したがって我々は、基礎学術研究がもつ価値をつねに社会に発信してゆくため(5.4.1参照)、以下の論点を意識する必要がある。

- (1) (天文学・宇宙物理学を含む)学術研究は、人類の特徴である知的活動の本質的な一面であり、その成果は、地域や時間を越えて、人類の共有財産となる。
- (2) 天文学・宇宙物理学は、広く一般市民が関心を持つ題材を提供できる。2009年7月22日の皆既日食や世界天文年がマスコミで広く採り上げられたことも、その例である。
- (3) 日本が基礎研究で優れた研究成果を挙げることは、国際社会への貢献を意味し、世界における日本の地位を向上させ、日本の誇りを高める上で、大きく資するものである。

- (4) 5.4 に述べたように、天文学・宇宙物理学を推進するには、最先端の技術開発が不可欠であり、したがって当該分野の基礎研究は、技術開発の先導役として重要な役割をもつ。
- (5) 5.1 で述べたように、深刻な社会問題である「理科離れ」を食い止める上で、天文学・宇宙物理学は切り札的な存在であり、人材育成の面からも、大きな使命を負っている。
- (6) 今日の豊かな IT 社会の基礎を築いたのは学問としての量子力学である。量子力学は、1920 年代に純粋な学問的課題の探求から始まった、この例に代表されるように、今日の基礎研究は、たとえそれが今日では市民生活とは無縁であっても、50 年後、100 年後に、人類に大きく資する可能性を秘めている。

第 3 の問題として、とくに飛翔体を用いた宇宙科学研究（大気圏外からの宇宙観測、太陽系科学、月惑星探査、宇宙空間利用実験、宇宙の新しい利用を開く工学研究など）は、政策課題対応型の研究開発との重なりを避けられないことが挙げられる。日本では 2003 年 10 月まで、ペンシルロケットからミューシリーズに至る固体ロケットの自主開発、科学衛星の開発製作、およびそれを用いた宇宙研究は、大学共同利用機関である宇宙科学研究所の下で実施されてきた。その間、N ロケットから H ロケットに至る液体ロケットの開発、およびそれを用いた実用衛星の打上げは、宇宙開発事業団で行われていた。しかし 2003 年 10 月、これら両機関に、航空宇宙技術研究所を加えた三機関が統合し、独立行政法人宇宙航空研究開発機構（JAXA）が設立され、宇宙科学研究所は、JAXA 宇宙科学研究本部に改組された。これにより 2 つのタイプの研究開発が、同じ傘の下で遂行されるようになったのである。さらに 2008 年には宇宙基本法が施行された結果、それまでの研究開発に軸足を置いた体制を改め、国として宇宙空間利用のニーズに応える体制に重心を移すことが決定された。ここには単に実用衛星だけでなく、国防的な宇宙利用や、将来的には有人活動までが視野に含められる。2009 年 6 月、今後 5～10 年の我が国の宇宙開発利用の方向付けを行う宇宙基本計画が策定されたが、その中には、「大学等の優れた研究者の参画の促進による体制の強化も踏まえて宇宙科学を推進し、世界最先端の成果を継続的に創出することを目指す」宇宙科学プログラムが置かれ、ボトムアップの宇宙科学研究を継続・発展することの重要性が書き込まれている。しかし、これら宇宙基本法・宇宙基本計画を実施していく国としての体制は、2009 年末現在、これから新しく作られて行こうとする段階であり、その形によっては、飛翔体を用いた自由な発想に基づく基礎研究の実施に大きな支障を来す恐れがある。新体制の下でも、宇宙空間を利用した各種の宇宙科学プロジェクトを実施する、我が国を代表する形の研究組織が置かれ、国内外の大学・研究機関と広く連携し、自主・自律・公開の原則の下で、自由な発想に基づく宇宙科学研究が実施できる体制をしっかりと築くことが必要である。

略語について：主に繰り返し引用される用語について列挙した。

AO	Adaptive Optics、補償光学
ASTE	アタカマ・サブミリ波望遠鏡実験、Atacama Submillimeter Telescope Experiment
Astro-G	電波天文衛星、VSOP-2 とこれまで呼ばれていた。
ASTRO-H	X線天文衛星
CLIO	Cryogenic Laser Interferometer Observatory、低温レーザー干渉計 重力波観測装置
CMB	Cosmic microwave background radiation、宇宙マイクロ波背景放射
DB	データベース
ELT	Extremely Large Telescope、次世代超大型望遠鏡
ESA	The European Space Agency、欧州宇宙局
GZK 効果	Greisen-Zatsepin-Kuz'min 効果
HSC	Hyper Suprime Cam、(すばる搭載) 次世代超広視野光赤外線カメラ
IAU	International Astronomical Union、国際天文連合
ISAS	JAXA 宇宙科学研究本部、宇宙研とも略することがある
IXO	International X-ray Observatory、次期エックス線国際天文衛星
JAXA	宇宙航空開発機構
JWST	ジェームズ・ウェブ宇宙望遠鏡、James Web Space Telescope
LCGT	Large Cryogenic Gravitational Telescope、大型低温重力波望遠鏡計画
NASA	The National Aeronautics and Space Administration、アメリカ航空宇宙局
NINS	National Institute for Natural Science、自然科学研究機構
Planet-C	金星気象衛星
SKA	Square Kilometer Array
SMBH	Super Massive Black Hole、超巨大質量ブラックホール
SPICA	Space Infrared Telescope for Cosmology and Astrophysics、次世代 赤外線天文衛星計画
TAMA300	300m 干渉計型重力波アンテナ
TES	Transition Edge Sensor、超伝導転移端センサー
TMT	Thirty Meter Telescope, 30m 大型光学赤外線望遠鏡計画
VERA	VLBI Exploration of Radio Astrometry、VLBI 技術による電波位置 天文学の探究

VLBI	Very Long Baseline Interferometry、超長基線電波干渉計
VLT	Very Large Telescope
VO	Vartial Observatory、ヴァーチャル天文台
あかり	AKARI、赤外線天文衛星
アルマ	Atacama Large Millimeter/submillimeter Array、ALMA、アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計
かぐや	月周回衛星
すざく	Suzaku、X天文衛星
はやぶさ	小惑星探査機
はるか	スペース VLBI 衛星、HALCA
ひので	Hinode、太陽観測衛星

シンポジウム

天文学・宇宙物理学の展望－長期計画の策定へ向けて－

主 催 日本学術会議物理学委員会天文学・宇宙物理学分科会

後 援 日本天文学会、日本物理学会、日本惑星科学会

日 時 平成19年12月28日（金） 9：30 ～18：30

場 所 日本学術会議講堂 地下鉄千代田線乃木坂駅徒歩2分

開催趣旨

第20期天文学・宇宙物理学委員会では、関連分野のコミュニティーとともに20年を見通した天文学・宇宙物理学の動向の議論と長期計画の策定のための活動が続けている。今回の公開講演会ではこれからの天文学・宇宙物理学がどのように展開していくのか、気鋭の若手研究者を講演者に招いてビジョンを提示してもらうとともに、公開討論を通じて今後の長期計画に向けたコミュニティー及びその周辺の共通理解を深めることを目的とする。

プログラム

9:30-9:40 開会あいさつ 佐藤勝彦（学術会議天文学・宇宙物理学分科会長期計画小委員会委員長、東京大学）

9:40-10:00：長期計画策定の考え方と学術会議の状況 海部宣男（学術会議第三部長、放送大学）

講 演（10:00～17:15）

時間	講演者	所属	テーマ
10:00-10:45	小松英一郎	テキサス大学	宇宙論
10:45-11:30	山田 亨	東北大学	銀河
11:30-12:15	上田佳宏	京都大学	ブラックホール、降着円盤
12:15-13:15	昼休み		
13:15-14:00	田村元秀	国立天文台	系外惑星、星間物質
14:00-14:45	中村正人	JAXA	惑星探査
14:45-15:30	関井隆	国立天文台	太陽
15:30-15:50	Break		
15:50-16:35	戸谷友則	京都大学	宇宙粒子
16:35-16:55	安東正樹	東京大学	重力波天文学
16:55-17:15	森山茂栄	東京大学	ダークマター探査

討論（17:15-18:15）

閉会あいさつ（18:15-18:30）：佐藤勝彦

シンポジウム

第二回天文学・宇宙物理学の展望－長期計画の策定へ向けて－

主 催 日本学術会議物理学委員会天文学・宇宙物理学分科会

後 援 日本天文学会、日本物理学会、日本惑星科学会

日 時 平成20年5月31日、6月1日

場 所 東京大学理学部小柴ホール

5/31		講演題目	講演者
10:00	10	挨拶	海部宣男(天文学宇宙分科会委員長)
		電波	
10:10	15	256素子ナイキストレート電波干渉計	大師堂経明(早稲田大)
10:25	15	10k pixel ミリ波サブミリ波検出器の開発	関本裕太郎(NAOJ)
10:40	15	サブミリ波 VLBI によるブラックホール解像望遠鏡	三好真(NAOJ)
10:55	20	Square Kilometer Array	中西裕之(鹿児島大)
11:15	15	Fast-track CMB polarization satellite	羽澄昌史(KEK)
11:30	15	宇宙マイクロ波背景放射偏光観測：マイケルソン型ボロメトリック天体干渉計の応用	服部誠(東北大)
11:45	15	スペーステラヘルツ干渉計	松尾宏(NAOJ)
12:00	20	南極からの天文学	中井直正(筑波大)
12:20	70	<昼食>	
		光・赤外	
13:30	25	ELT プロジェクト(TMT@ハワイへの参加)	戸谷友則(京大)/高見英樹(NAOJ)
13:55	15	「岡山新技術望遠鏡計画」	長田哲也(京大)
14:10	20	東京大学アタカマ天文台(TAO) プロジェクト	吉井譲(東大)
14:30	15	WF MOS	須藤靖(東大)
14:45	30	議論 1	
15:15	25	次期赤外線天文衛星計画 SPICA	中川貴雄(JAXA)
15:40	20	JASMINE(赤外線位置天文観測衛星)	郷田直輝(NAOJ)
16:00	20	<休憩>	
16:20	15	赤外線宇宙背景放射探査機 - 黄道面脱出ミッション	松浦周二(JAXA)

		EXZIT	
16:35	15	超広視野近赤外スペースミッション	岩田 生(NAOJ)
16:50	20	JTPF	芝井広(阪大)
		理論シミュレーション	
17:10	15	大規模数値計算による天体現象の研究	牧野淳一郎 (NAOJ)
		x 線、ガンマ線	
17:25	25	次期 X 線国際天文衛星 NEXT	高橋忠幸(JAXA)
17:50	15	XEUS	國枝秀世(名大)
18:05	15	ダークバリオン探査衛星 DIOS (小型科学衛星)	大橋隆哉(首都大)
18:20	15	X線ガンマ線偏光観測小型衛星 PolariS	林田清(阪大)
18:35	30	議論 2	
19:05		< 1 日目 終了 >	
6/1			
9:30	15	高エネルギー分解能 GeV ガンマ線検出器	大曾根聡子(産業技術総合研究所)
9:45	15	MeV 領域ガンマ線天体探査	窪秀利(京大)
10:00	15	高感度ガンマ線望遠鏡 CAST (Compton telescope for Astro and Solar Terrestrial)	中澤知洋(東大)
10:15	15	100TeV 領域(10-1000TeV)ガンマ線天文学の開拓と Knee エネルギー領域宇宙線化学組成の研究	瀧田正人(東大宇宙線研)
		ニュートリノ・宇宙線	
10:30	15	超高エネルギー G Z K ニュートリノ検出のための岩塩 ニュートリノ検出器	千葉雅美(首都大)
10:45	15	Ashra による大気発光高精度監視による超高エネルギー ニュートリノ天文学	佐々木真人/野田浩司(東大宇宙線研)
11:00	20	JEM-EUSO ミッション	戎崎俊一(理研)
11:20	15	地上における極高エネルギー宇宙素粒子検出器による 粒子天文学	佐川宏行(東大宇宙線研)
11:35	10	CALET	鳥居祥二 (早大)
		暗黒物質探査	

11:45	15	XMASS-II 実験（暗黒物質探索実験）	森山茂栄（東大宇宙線研）
12:00	15	NEWAGE 実験	身内賢太朗（京大）
12:15	65	<昼食>	
		重力波	
13:20	25	大型重力波望遠鏡（LCGT）計画	黒田和明(宇宙線研)
13:45	15	スペース重力波アンテナ DECIGO	川村静児(NAOJ)
14:00	30	議論 3	
		太陽・太陽系・磁気圏・地球観測	
14:30	20	SOLAR-C	原弘久（NAOJ）
14:50	10	次期地上太陽観測(コメント)	末松芳法(NAOJ)
15:00	20	始原天体探査	吉川真(JAXA)
15:20	20	<休憩>	
15:40	15	小型科学衛星シリーズ初号機候補 TOPS	上野宗孝(東大総合文化)
15:55	15	火星大気オービター計画	佐藤毅彦（JAXA）
16:10	15	国際共同木星探査計画	佐々木晶(NAOJ)
16:25	20	SCOPE	前澤洌(JAXA)
16:45	15	Global Lightning and Sprite Measurements (GLISM) from ISS	牛尾知雄(阪大)
17:00	15	太陽地球環境に関する研究プロジェクトと将来計画	塩川和夫(名大 STE)
		元素合成・核物理	
17:15	20	RI ビームファクトリー	櫻井博儀(理研)
17:35	15	南極氷床—超新星・太陽周期探索プロジェクト	望月優子(理研)
17:50	30	議論 4	
18:20	10	まとめ	佐藤勝彦（長期将来計画・座長）
18:30		<終了>	