

記 録

文書番号	S C J 第 22 期 260912-22610500-050
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・宇宙物理学中規模計画の展望
作成日	平成26年（2014年）9月12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。

天文学・宇宙物理学中規模計画の展望

第 22 期 日本学術会議
物理学委員会
天文学・宇宙物理学分科会

2014 年 9 月 12 日

はじめに

天文学・宇宙物理学中規模計画の展望

第 22 期日本学術会議は、我が国の大型施設計画・大規模研究計画に関するマスタープランを、「第 22 期学術の大型研究計画に関するマスタープラン」(マスタープラン 2014) としてまとめました。これは、我が国の数十億円以上の規模の大型計画に関して、学術分野全体を見通してリストアップして、科学者コミュニティが主体的に寄与するものであり、学術全般を展望・体系化しつつ、各学術分野が必要とする大型研究計画を網羅するとともに、我が国の大型計画のあり方について、一定の指針を与えることを目的として、日本学術会議が公平かつ公正な審査にもとづき策定されたものです。

天文学・宇宙物理学分科会は、上記のマスタープラン作成に対応してシンポジウムを開催し、コミュニティでの議論を経て、当分科会として 8 件^{*1}大型計画を選定し、物理学分野の将来計画を検討する選考委員会に推薦いたしました。

一方、当分科会としては、以前の期より、将来計画を、「大規模計画」(100 億円以上のプロジェクト)、「中規模計画」(100 億円以下で科学研究費など競争的経費では難しいプロジェクト)とに区分し^{*2}、各分野から計画を提出し、シンポジウムを開催して、活発な議論を行ってきました。各分野では、それぞれの分野のプロジェクトについて、ピアレビューが実施され、また、プロジェクト間の協力も始まった分野もあり、有意義な活動でした。

以前の期の当分科会では、上記のうち、まず「大規模計画」について議論を行ってきました。これに続き、第 22 期の当分科会では、上記のうち特に「中規模計画」について重点的に議論を行いました。そこで、この将来計画検討の状況を、「天文学・宇宙物理学中規模計画の展望」として、記録にまとめることとしました。本記録の構成としては、それぞれの分野単位に、1. 分野の議論のまとめ、2. プロジェクトとしました。そして、それぞれのプロジェクトについては、天文学・宇宙物理学分科会の責任で、現時点としてのプロジェクト毎のコメントを付記しました。

本記録が、今後の天文学・宇宙物理学分野の将来計画の推進の一助になればと考えます。各プロジェクト代表者、関係者のますますの努力を期待すると共に、本記録の作成について協力いただいた皆さまに感謝いたします。

2014 年 9 月 12 日

日本学術会議 物理学委員会
天文学・宇宙物理学分科会
委員長 観山正見

^{*1} このうち 5 件が、本分科会で定義する「中規模計画」にあたり、本書で議論されています。残りの 3 件が、本分科会で定義する「大規模計画」となります。

^{*2} この両者を合わせて、学術会議全体で定義された「大型研究計画」と重なる点もありますが、経費区分が異なります。

目次

はじめに	i
第 1 章 天文学・宇宙物理学分野における中規模将来計画の検討	1
1.1 現代天文学の課題	1
1.2 課題解決のための大規模計画	2
1.3 「22 期学術の大型研究計画に関するマスタープラン」と「中規模計画」	2
1.4 中規模計画の議論の経緯	2
1.5 本冊子の目的	3
1.6 各分野のまとめ	4
1.7 本分科会における総合評価	7
第 2 章 宇宙電波懇談会からの提案	9
2.1 議論のまとめ	9
2.2 ALMA Extended Array (アルマ拡張アレイ)	11
2.3 きゃらばん-サブミリ、銀河中心ブラックホール撮像装置 (CARAVAN-submm)	15
2.4 南極 10m テラヘルツ望遠鏡計画	19
2.5 CMB 偏光観測衛星 LiteBIRD	24
2.6 超広視野・広帯域の大口径ミリ波サブミリ波単一望遠鏡による暗黒宇宙の大規模構造の探査	28
第 3 章 光学赤外線天文連絡会からの提案	33
3.1 議論のまとめ	33
3.2 京都大学 3.8m 新技術望遠鏡	37
3.3 南極赤外線望遠鏡計画	41
3.4 すばる望遠鏡 次世代広視野補償光学システム	44
3.5 位置天文衛星・小型 JASMINE	48
3.6 東京大学アタカマ天文台 (TAO) 計画	53
3.7 超広視野分光器 Prime Focus Spectrograph (PFS)	57
第 4 章 CRC (宇宙線研究者会議) からの提案	61
4.1 議論のまとめ	61
4.2 ニュートリノレス二重ベータ崩壊探索 KamLAND2-Zen	63
4.3 ダークマター探索 XMASS	68
4.4 JEM-EUSO: 国際宇宙ステーション日本実験棟に設置する極限エネルギー宇宙天文台	72
4.5 CTA 国際宇宙ガンマ線天文台	77

4.6	超高エネルギー宇宙線望遠鏡 TA2	82
第 5 章	高エネルギー宇宙物理連絡会からの提案	87
5.1	議論のまとめ	87
5.2	広天域突発 X 線天体監視 WF-MAXI	89
5.3	ダークバリオン探査衛星 DIOS	93
5.4	ガンマ線バーストを用いた初期宇宙探査計画 HiZ-GUNDAM	97
5.5	X 線ガンマ線偏光観測計画 PolariS	101
5.6	MeV/sub-MeV 全天サーベイ CAST 計画	105
5.7	硬 X 線サーベイ計画 FFAST	109
第 6 章	太陽研究者連絡会からの提案	113
6.1	議論のまとめ	113
6.2	次世代太陽圏環境変動ネットワーク観測計画	115
6.3	次期地上太陽望遠鏡計画	119
付録 A	著者	123
A.1	第 22 期日本学術会議 物理学委員会 天文学・宇宙物理学分科会メンバー	123
A.2	各プロジェクトの紹介	124

第 1 章

天文学・宇宙物理学分野における中規模将来計画の検討

1.1 現代天文学の課題

加速的膨張宇宙の発見、多数の太陽系外惑星の発見、宇宙最大の爆発であるガンマ線バーストの観測など、今世紀になり天文学・宇宙物理学の学術的研究は、より興味深く、かつ、幅広い科学に影響を与える展開がなされている。学術分野総体の中で、点や線であった天文学や宇宙物理学は、今や、素粒子論を始めとする物理学、惑星科学などの地球科学、生物学などの自然科学分野に留まらず、社会学や哲学にも影響を与え、学術の中で大きな面や空間を占めるに至ってきた。

新たな発見は、更なる本質的疑問の解決に向けての原動力となる。例えば、加速的宇宙膨張の発見は、ダークエネルギーの存在を示唆し、その真空エネルギー的振る舞いは、物理学の常識を破るようである。ダークエネルギーの実態解明は、新たな物理学の創成につながるやも知れない。さらに、系外惑星の発見は、その先に系外の生命の探求へと続く。生命の存在を示すバイオマーカーの発見は、人類の大きな目標と言っても過言ではない。今や、宇宙に於ける生命のなぞを探る研究分野「アストロバイオロジー」は、世界的な研究テーマである。

一方、最先端の研究は、多くの場合、大型化し、建設経費の増大、建設期間の長時間化、運営コストの増大、建設期間に於ける研究の推進や大学院生・若手研究者の教育など、様々な課題が浮き彫りになっている。この点は、研究上の課題という訳ではないかも知れないが、従事している研究者、研究者コミュニティ、支援者、ステークホルダーに関連する課題で、今後の分野の発展のためには必ず適切な対応が必要な周辺課題である。また、天文学・宇宙物理学に固有と思われる問題もあるが、一方で、大型計画の推進など広い分野に共通する問題も見受けられる。第 22 期の当該分科会としては、様々な周辺課題を洗い出し、議論を整理して、個別課題毎に次期学術会議会員及び連携会委員に検討を申し送る予定である。

日本学術会議 物理学委員会 天文学・宇宙物理学分科会（以下当分科会）に於いては、研究者コミュニティのボトムアップの計画立案に根ざした新たな大型計画や中規模計画の推進に向けて、当該研究者コミュニティを代表する立場として自ら適切な勧告や評価を実施し、その結果、それぞれのプロジェクトが対応策の検討を加えられ、適正な形で推進されることは、重要と考える。

さらに、今後は、実現した計画の成果の評価も重要である。

また、今後、益々、天文学・宇宙物理学がグローバル化している方向性を考えると、将来的には、適切な形で海外の研究者からの評価やコメントも受けて、分科会が評価及び勧告することも必要となろう。

1.2 課題解決のための大規模計画

既に述べた最先端の研究推進のために、多くの分野で大規模計画の推進が図られてきた。大規模計画とは、我々の分野では、総建設経費百億円以上の計画と定義するが、すばる望遠鏡、ALMA 計画、X 線宇宙望遠鏡、太陽宇宙望遠鏡などがその例である。それらの望遠鏡の建設、運用、科学的成果は、日本の天文学・宇宙物理学を世界最先端に押し上げてきた。学術的成果は当然ながら、技術的先端性や、大型計画の推進の能力についても、世界的最先端レベルに達したと言って過言ではない。

そして、これまでの大規模計画の実績と評価を下地に、数々の分野で次期の大規模計画が立案され、既に建設を始めたプロジェクトや、計画を立案して経費要求をしている計画もある。例えば、次世代超大型望遠鏡である TMT(Thirty Meter Telescope) や、重力波観測装置 (KAGRA) などは既に着工した大規模計画である。一方、SPICA(次期赤外線天文衛星)、SKA (Square Kilometer Array) などは、計画立案中の大規模計画である。

提示された現代天文学の課題解決のためには、これらの大規模計画の達成は、必須の要件であると同時に、国際協力の面で我が国の科学・技術・マネジメントの能力の実力を世界に示す良いステージである。大規模計画は、経費の大きさや、建設期間の長さ、並びに、携わる人員の大きさから考えて、国家プロジェクトの色彩が濃くなる。そのため、その立案と建設達成のためには、大きな責任が当該グループに発生する。また、国際協力によって達成されることが、資金面でも、人材面でも、それぞれに関して各国の強みを引き出して弱みをカバーすることから肝要である。現代天文学の大きな研究課題達成のためには、今や国際協力が必至の事柄である。従って、当該グループには、ある意味で我が国の代表としての責任も生まれる。従って、大規模計画の推進には、当該グループやそのホスト機関だけでなく、我が国のコミュニティの適切な理解とサポートが重要で、この面でも、当分科会の役割は大きい。

以上の点を鑑み、当分科会としては、日本の関連分野のコミュニティの代表として、それら大規模計画立案や推進に向けては、適切にアドバイスし、評価することが大きな責務と考えている。

1.3 「22 期学術の大型研究計画に関するマスタープラン」と「中規模計画」

日本学術会議は、全分野を対象として、我が国の学術的大型計画（数十億円を超える学術的大型計画）立案に向け、「22 期学術の大型研究計画に関するマスタープラン」(マスタープラン 2014) を策定した。当分科会は、これまでの議論として、将来計画を、大規模計画（百億円以上）と中規模計画（科研費で達成できない百億円未満の計画）に分けて議論してきた経緯から、学術会議が立案を計画している大型研究計画（数十億円以上の計画）とは、経費面で完全に対応するものではなかったが、これまでの検討の成果を踏まえて以下のように対応した。

当分科会は、コミュニティでの議論を経たのち、それぞれの分野から大型計画の推薦と各分野での議論の習熟度について代表から報告を受け、シンポジウムを開催した。そこでの公開のヒヤリングから、学術的価値、推進体制や経費の妥当性などを審査した。その結果、物理学分野の将来計画を検討する選考委員会に 8 件の大型計画を推薦した。これについては、日本学術会議で、議論が継続中である。

一方、当分科会では、2012 年夏より、中規模計画（科研費では実行できないが、百億円以下の計画）について各分野で議論を行ってきた。我々の定義の中規模計画は、上に述べたとおり、マスタープラン 2014 に一部重複するところがあるが、当分科会としては、当初の予定通り、中規模計画について、討議と議論を進めて、天文学・宇宙物理学分野の適切な中規模将来計画を立案することの一助となることを目指す。

1.4 中規模計画の議論の経緯

天文学・宇宙物理学分野の中規模計画については、以下のような方針や経緯で当分科会として検討を続けてきた。

将来計画を検討する過程で、科学研究費だけでは実現不可能な規模であるが、総経費百億円未満の計画（大規模計画とはならない）がいくつか存在することが認識された。当分科会はそれらを、「天文学・宇宙物理学分野における中規模計画」として定義し、主要なものを列挙して、大規模計画と合わせてこの分野の将来計画を概観することとした。

本議論は、天文・宇宙物理学に含まれる、下記の各コミュニティでの議論が出発点である。

- 宇宙電波懇談会
- 光赤外線天文連絡会
- 宇宙線研究者会議 (CRC)
- 高エネルギー宇宙物理学連絡会
- 太陽研究者連絡会
- 理論天文学宇宙物理学懇談会

ただし、今回は、上記のうち理論天文学宇宙物理学懇談会からは、具体的な計画の提案はなかった。下表に、議論の経緯を示した。

図 1.1 中規模計画、議論の経緯

時期	事象
2012年8月	中規模計画の公募発出
2012年8-12月	各コミュニティでの議論
2012年12月	各コミュニティからの中規模計画の推薦
2013年2月	「22期 学術の大型研究計画に関するマスタープラン策定の方針」に対応したシンポジウムを開催
2013年5月	中規模計画シンポジウム開催
2014年8月	本冊子作成

1.5 本冊子の目的

上記の経緯を踏まえて、現時点の中規模計画について、「天文学・宇宙物理学中規模計画の展望」として、冊子にまとめることとした。冊子をまとめることの目的は以下の通りである。

- 各コミュニティによるボトムアップの議論にもとづいて、2013年段階での中規模計画を列挙する。
- それぞれのプロジェクトが推進しやすい環境を当分科会として整える。
- このため、極めて高い学術的価値を有し、様々な準備も十分に整っている計画を提示して、それらの推進を明示的にサポートする。
- 当分科会は、必要な場合には、個々の計画に当面の課題をコメントの形で指摘する。その課題を克服する事の客観的判断により、当該グループが推進しやすい環境を整える。当該グループには、当分科会からのコメントと課題克服の事実にもとづいて、今後の計画推進のためのプラス材料となることを期待する。

それぞれのプロジェクトについては、当分科会の責任で、コメントを示した。当分科会によるコメントは、

1. 計画の学術的意義
2. 経費、スケジュールの妥当性
3. 計画の実施主体。マネージメント体制の妥当性
4. 宇宙コミュニティの合意形成

5. 共同利用方針の妥当性
6. 総合評価

の観点からそれぞれのプロジェクトについて検討した結果である。

検討の結果、2013年12月の段階で、「学術的に意義が高く、準備面からみて、推進すべき計画」、「学術的意義が高いが、若干の課題がある計画」を、それぞれ数プロジェクト選択した。また、「既に予算化された計画」についても列挙した。

全般的に、学術的意義が高いプロジェクトが多数であった。ただし、2013年12月の段階で、計画推進のためには課題があると当分科会として判断した計画もあった。

上の目的にあげたように、問題点の指摘や、課題が提示された計画については、その計画を否定したわけではなく、今後それらの課題を克服することをアドバイスしたものである。その結果、指摘事項を克服し、その事実をプラス材料として、各方面に経費の獲得や計画推進のための材料となることを期待する。

今回の当分科会のコメントは、2013年12月時点のものであり、将来的に当分科会で、新たな中規模計画の検討や、検討を指摘されたプロジェクトの検討課題の克服の確認などは、実施していく予定である。それらは、当分科会の議事録等で適切に公表していきたいと考えている。

本冊子の構成としては、それぞれの分野単位に、1. 分野の議論のまとめ、2. 各プロジェクトの紹介としている。さらに、5月に開催した学術会議シンポジウムでの議論も参考にして、プロジェクト毎に当分科会としてのコメントを付記している。

本文書が、将来の中規模計画の健全な発展に役立つことを願っている。

1.6 各分野のまとめ

この節では、各分野ごとの検討のまとめを記す。

1.6.1 宇宙電波懇談会

電波天文コミュニティでは、中規模計画として、「ALMA 拡張アレイ」、「きやらばん・サブミリ」、「南極天文学の推進: 10m テラヘルツ望遠鏡」、LiteBIRD、「大口径ミリ波サブミリ波単一望遠鏡」の5件が提案された。また、大規模計画としてSKA (Square Kilometer Array) への参加が第21期から引き続いて検討課題となっている。

中規模計画のLiteBIRDについては、宇宙マイクロ波背景放射のBモード偏光を観測して、インフレーションモデルが予言する原始重力波の検出をめざすものであり、学問的意義は大きい。また実施体制も具体的であって技術的成熟度も高く、コミュニティでの合意形成も進んでいることから、総合的に高く評価された。以上より『学術的に意義が高く、準備面からみて、推進すべき計画』と評価した。ただしLiteBIRDの現実的な経費を見積もると、現状のイブシロンによる小型科学衛星シリーズの打ち上げには収まらないため、今後JAXAとの協議をさらに進めて経費やスケジュールを明確化し、早期打ち上げをめざして適切に対処していくことが望まれる。

「南極天文学の推進」については、サブミリ波から赤外線にかけて地上最高の大気条件を有する南極高地の特徴を活かして、10m テラヘルツ (広視野) 電波望遠鏡と2.5m 赤外線望遠鏡 (光赤外コミュニティから提案) を設置する計画である。10m 電波望遠鏡は筑波大学が、2.5m 赤外線望遠鏡は東北大学が母体となって推進することに加えて、国立極地研究所では「南極における赤外線・テラヘルツ天文学の推進」が第8期観測事業として採択され、南極天文学の推進が正式に謳われている。電波・赤外線とも最高条件の地上観測が期待できるなど学術的意義は高く、コミュニティでの合意も形成されており、経費、スケジュールとも概ね妥当と言えることから、高い評価を受けた。ただ、国立極地研究所との共同で行う基地建設の安全性、及び、筑波大学・東北大学・国立極地研究所3者で構成される体制作りが今後の課題であろう。『学術的意義が高いが、若干の課題がある計画』と評価する。

大型計画である SKA は、宇宙の暗黒時代の解明、強い重力場における重力理論の検証、生命起源物質の探査、宇宙磁場の起源と進化等、高い学術的意義を有する大型国際計画である。2012 年には、低周波用アレイ (50—350MHz / 65—1670 MHz) をオーストラリアに、高周波用アレイ (350 MHz—14 GHz) を南アフリカ共和国に分けて設置することが決まった。日本は国立天文台が SKA 評議会にオブザーバを送り、国際状況を把握すると同時に日本の状況を伝えてきた。日本の電波天文コミュニティでは、ALMA の次に来るべき大型将来計画の検討を初めており、その動向を受けて国立天文台が対処する予定である。

1.6.2 光赤外線天文連絡会

光赤外線天文学の分野では、地上望遠鏡計画とスペース観測計画で合計 10 件の中規模計画が検討・推進されてきた (§ 3.1.1)。可視光天文観測の歴史の上に、宇宙望遠鏡、赤外線観測、大規模センサー、高度光学制御などの先端技術がもたらした多様な研究分野としての特性を反映して、多様な計画が並んでいる。

中でも特に学術的に意義が高く準備が進んでいる計画として、「京大 3.8 m 新技術望遠鏡」*1 と、すばる望遠鏡に装着する「超広視野分光器 (PFS: Prime Focus Spectrograph)」があげられる。前者の特長は、多くの新技術を取り入れることにある。これら新技術は将来のより大型の望遠鏡、あるいは高性能の観測装置を実現するための確固たる基盤になるとともに、観測技術開発分野の研究成果・技術を持つ研究者育成の場としても重要である。また国内の光赤外望遠鏡として最大であり、突発現象、系外惑星トランジットなどの価値の高い研究成果も期待される。一方、後者の PFS はすばる望遠鏡で極めて高効率の分光サーベイを行う計画である。すばる望遠鏡の最大の特長である主焦点を活かし、すでに完成している HSC (Hyper Suprime-Cam) の広視野撮像と組み合わせることで、日本が一翼を担う次期巨大望遠鏡 TMT (Thirty Meter Telescope:すでに予算化) への観測ターゲット提供という点で最適な装置群であり、極めて学術的価値が高い。以上から、両者は、『学術的に意義が高く、準備面からみて、推進すべき計画』と評価した。また、すばる望遠鏡に装着する次世代の基幹装置として、近赤外線で広い視野にわたる高解像撮像が可能な「広視野補償光学システム GLAO (地表層補償光学)」が提案されている。

また、地上のさらなる適地を目指す計画として、東京大学アタカマ天文台および南極天文台がある。前者はすでに予算化され、実行段階であるので、『既に予算化されている計画』と位置づける。完成後は多くの研究者がその成果を享受できる運用体制の確立が望まれる。後者へのコメントは、2.4.9 章に「南極天文学の推進」として、まとめて掲載した。

スペースでは大型計画として SPICA が推進されており、さらには WISH、JTPF、WFIRST など多数の計画が目白押しであり、経費・マンパワーの両面から、長期的な取組みにならざるを得ない。一方、新開発のイプシロンロケットで打ち上げる小型衛星計画として、「小型 JASMINE」が提案されており、近赤外アストロメトリというユニークな分野の先陣を切ることが期待される。

1.6.3 宇宙線研究者会議 (CRC)

宇宙線研究分野では、大きな研究の流れとして、(1) ガンマ線、ニュートリノ、重力波、宇宙線など様々な粒子を観測して宇宙の高エネルギー現象を解明する方向と、(2) ニュートリノやダークマターなど宇宙から飛来する粒子の解明を通して素粒子的な知見を得る方向が存在する。現在 (1) に関連して、大型計画である重力波望遠鏡の KAGRA の建設が進行している。(1) と (2) にまたがる大型の研究としては Super-Kamiokande があり、大型の将来計画として Hyper-Kamiokande が提案されている。上記のような大型計画以外に加え、中規模で様々な重要な研究が遂行可能なのが宇宙線研究分野の特徴である。また近年世界的にも中・大型の研究施設などから得られるデータをもとにした宇宙線研究分野の研究の進展は目覚ましいものがある。

このような現状において、日本の宇宙線コミュニティから中規模計画として、ガンマ線天文学を推進する CTA、

*1 平成 25 年度補正予算政府原案に採択

ニュートリノレス2重ベータ崩壊等の研究を行う KamLAND2-Zen, ダークマターを探索する XMASS-1.5, 最高エネルギー宇宙線研究を進める JEM-EUSO と TA2 の5計画が推薦された。

このなかで特に強く推すべき中規模計画として CTA 計画への参加があげられる。この計画は近年急速に研究が進む TeV のエネルギー領域でのガンマ線の観測を通して、様々な宇宙の高エネルギー現象を研究する計画である。全世界からの1000名を超える研究者の協力で南半球・北半球それぞれに大型の観測施設を1施設ずつ建設して全天のガンマ線観測を行う計画である。主な観測対象は超新星残骸、ガンマ線バースト、活動銀河核など様々であり、宇宙線の起源の解明など多種多様な科学的成果が期待されており、『学術的に意義が高く、準備面からみて、推進すべき計画』と評価した。

また KamLAND2-Zen も重要な計画である。この計画はキセノン原子核のニュートリノレス2重ベータ崩壊を探索する計画で、また地球ニュートリノの精密観測、太陽ニュートリノの観測なども期待され、素粒子、地球物理、天文学、更には原子核物理学にまたがる計画である。KamLAND2-Zen については素粒子分野での学術的視点からの評価が重要と考えられるが、本報告書では宇宙線コミュニティからの報告として掲載した。当分科会としては、『学術的に意義が高く、準備面からみて、推進すべき計画』と評価した。

更に、宇宙のダークマターの探索をめざす XMASS-1.5 計画については、現行の XMASS 実験でバックグラウンドの除去の課題を十分克服する必要があるが、これを解決して高感度で暗黒物質探索を行うことが期待される。従って、『学術的意義が高いが、若干の課題がある計画』と評価した。

1.6.4 高エネルギー宇宙物理学連絡会

高宇連から今回提案された6件の計画 (§ 5) は、いずれも人工衛星ないし国際宇宙ステーションを利用し、「すざく」、MAXI、ASTRO-H で拓かれる新たな地平をさらに進めるものである。それらは、エネルギー分解能の追求 (DIOS)、エネルギー帯域の拡大 (CAST, FFAST)、新しい次元としてのX線偏光への挑戦 (PolariS)、時間変動の捕捉 (Hi-Z GUNDAM, WF-MAXI)、サーベイ領域の拡大 (PolariS を除く5提案)、他波長との相乗り (Hi-Z GUNDAM) など、多面的な展開を狙う計画群となっている。

この中から本分科会では、高宇連での事前評価 (§ 5.1.2) も踏まえつつ、『学術的に意義が高く、準備面からみて、推進すべき計画』として、DIOS を選定した。これは JAXA のイプシロンロケットを用いた衛星計画で、広視野X線鏡と新開発の極低温検出素子により、銀河団間の空間に広がると考えられる Warm Hot Inter cluster Matter (WHIM) の検出を目指す。WHIM は宇宙バリオンの大きな割合を担うと考えられ、背景 AGN の紫外線吸収線などの観測で存在が示唆されており、DIOS は WHIM が出すはずの軟X線輝線を検出してその存在を確定し、さらにその大規模分布を決定する。高い学術的な意義をもち、日本の強み、将来への展望などの観点からも、ぜひ推進すべきであると評価できる。技術的には ASTRO-H の資産を継承しており、かつ大規模な国際協力が見込めるものの、マンパワー、技術開発、経費、年次計画 (最早で2014年にプロジェクト開始、2018年に打ち上げ) などには、厳しい調整が必要であろう。

本分科会では、高宇連の残る5件のうちから、『学術的意義が高いが、若干の課題がある』計画として、PolariS を選定した。これは硬X線ミラーとトムソン散乱型のX線偏光計により、未開拓なX線の偏光観測に挑戦する計画で、当初は JAXA のイプシロンロケットによる打ち上げを想定していたが、米国 SMEX プログラムで進行していた軟X線偏光ミッション GEMS (日本が技術的に重要な貢献) がキャンセルされ、その再挑戦のさい、GEMS と PolariS が合体する可能性が浮上している。GEMS との調整が未完了なことが、「課題」として認識される。本分科会としては、まず PolariS チームが米国「GEMS」チームと協力し、GEMS 計画の再開により2018~2019年に世界初のX線偏光専用衛星を打ち上げることに注力し、そのバックアップ計画として、イプシロン打ち上げに向け、計画をより厳しく絞り込むことを推奨する。

残る4計画は、いずれも科学的意義は高いものの、技術的準備や実行体勢の構築、コミュニティからの支持の拡大、予算規模などに、課題が残っていると評価された。それらをクリアすることが、計画実現への近道であろう。

1.6.5 太陽研究者連絡会

太陽物理学の分野では、(1)フレアの発生機構、(2)コロナ加熱機構、(3)黒点磁場の起源の三大課題を解決するために、人工衛星による観測と地上からの観測の二本立てで研究が進められている。

このうち、前者に関しては、現在稼働中の「ひので」の後継機種として、彩層の磁場観測とコロナの高分解能撮像観測に重点を置く Solar-C 計画が長期大型計画として選定されるとともに、太陽を極方向から探査するという野心的な Solar-D 計画についても検討が進んでいる。

これらを背景として、Solar-C 計画を補完する形での地上観測計画という観点に立って、太陽研究者連絡会を中心に中規模計画の議論が行われ、以下に見るとおり (1)「次世代太陽圏環境変動ネットワーク観測計画」と (2)「次期地上太陽望遠鏡計画」の 2 つが策定された。

このうち、前者については、太陽フレアに伴い発生し人間社会に大きな影響を与える宇宙天気理解と予測を目指した計画であり、社会的ニーズも高いことからその意義は大きいといえる。しかしながら、3 グループ 7 機関 10 観測施設が連携して研究を進めるといった計画の性質上、計画全体より丁寧なコーディネーションが必要であると思われる。また、具体的に連携の効果が発揮されるためには、各機関における個別研究を超える全体的スキームを意識的に作り上げることが重要であろう。以上から、当計画を『学術的意義が高いが、若干の課題がある計画』と評価した。

一方、後者については、可視光域において地上で実験的観測施設を建設運用することの学術的意義は認めるものの、米国の 4 m 太陽望遠鏡計画など諸外国の動向をみると、日本が Solar-C 計画を進めつつ、単独で 2 m 級太陽望遠鏡を新たに開発し運用することが適切な方策であるか疑問である。

1.7 本分科会における総合評価

上記の各分野での議論を経た上で、本分科会において、分野を超えてのプロジェクトの評価・議論を行った。その結果、以下の 5 つの計画（順不同、名称は本書の名称を使用）を、分野を超えて特に重要であると本分科会は判断し（2013 年現在）、物理学分野の将来計画を検討する選考委員会に推薦した。本分科会での評価の概要を以下に記す。

- **南極望遠鏡計画**（本書の「南極 10m テラヘルツ望遠鏡計画」と「南極赤外線望遠鏡計画」を合わせたもの）
第 1 に、サブミリ波・赤外線で「地上最良の天文観測地」である南極高地での先端的観測を開拓し世界をリードすること。第 2 に、観測環境を活かし、中心課題として口径 10m サブミリ波望遠鏡と 2.5m 赤外線望遠鏡の共同で宇宙膨張初期の天体形成を直接的・包括的に探査すること。第 3 に、二つの国立大学と極地研の密接な共同で、日本の天文学・科学全般に大きな未来を開くこと。以上の総合によって、この両計画を一体として推進する場合、極めて高く評価される。
- **CMB 偏光観測衛星 LiteBIRD**
宇宙マイクロ波背景放射の偏光観測を通じて、揺らぎの重力波モードを求め、宇宙初期の大膨張期であるインフレーションの存在を直接証明し、その機構に迫ることを目指す。宇宙論・素粒子物理学の分野に大きなインパクトを与える成果が期待でき、また計画も着実に練り上げてきており、高く評価できる。
- **JEM-EUSO: 国際宇宙ステーション日本実験棟に設置する極限エネルギー宇宙天文台**
JEM-EUSO 計画は、極高エネルギー宇宙線が生成する空気シャワーの大気蛍光を宇宙から大立体角で観測することを主目的にした計画である。10²⁰ 電子ボルトに到達する極高エネルギー宇宙線がどのような天体でどのようなメカニズムで加速されるのかは大きな謎であり、JEM-EUSO によってこの問題の解決に向けた大きな進展が期待される。
- **CTA 国際宇宙ガンマ線天文台**
CTA は、従来の地上高エネルギーガンマ線実験に対し、その感度を約 10 倍に、また対象エネルギー範囲を上端、

下端とも約1桁近くに拡大することを目指すプロジェクトである。CTAの対象は、高エネルギー天体物理学の各分野ばかりでなく、宇宙論、素粒子の宇宙物理学にまで及んでおり学術的価値は極めて高い。CTAは日米欧を中心とする国際プロジェクトであり、日本は、主要メンバー国として活躍している。国内コミュニティからも強く支持されている。

- **ダークバリオン探査衛星 DIOS**

現在の宇宙バリオンの大きな割合を示すのが銀河団間空間にある Warm Hot Inter cluster Matter (WHIM) である。本計画は WHIM が出すはずの軟X線輝線を検出してその存在を確定し、さらにその輝線のグローバルな強度分布を測定することにより宇宙バリオンの大規模構造を決定しようとする野心的な計画であり、其の学術的意義はきわめて高い。

これらの計画は、「マスタープラン2014」に掲載された。

第2章

宇宙電波懇談会からの提案

2.1 議論のまとめ

電波天文コミュニティの総力を結集して進めてきた大型ミリ波サブミリ波干渉計 ALMA の建設が一段落しつつある。ALMA は、第一線の観測装置として、今後約 30 年運用されると見込まれている。厳しい競争の中で世界に伍して ALMA による成果を上げ続けていくこと自体、これまでにコミュニティが経験したことのない大きな挑戦である。

この新たな状況も踏まえつつ、電波天文学コミュニティは、10 年後を見据えた議論をし始めた。具体的には、大規模計画として Square Kilometer Array (SKA) への参画が、中規模計画として 5 つの計画が、それぞれ構想されている。これらのうち、宇宙背景放射偏波観測を通じて原始重力波の検出を目指す『LiteBIRD』に関しては、計画も具体的にその実現に向けた準備も着実に進んでいることを確認した。今後、高エネルギー物理 (素粒子) 分野とも連携しながら、電波天文コミュニティの将来計画としてより強固な位置づけがなされるように、さらに分野間連携を深めるべきであるとの結論を得た。『南極天文学の推進』についても、大学の独自計画という基本性格は認識しつつも、コミュニティとしてもその実現を支援していくことで合意した。一方、その他 3 つの中規模計画 (きゃらばん-サブミリ、大口径ミリ波サブミリ波単一鏡、ALMA 拡張アレイ)、及び SKA への参画については、コミュニティとして強い興味を持ちつつも、時間をかけた更なる検討が引き続き必要な段階にあることを確認した。

2.1.1 長期計画議論

電波天文分野における長期計画の検討状況 (2012 年 12 月末現在) を下表にまとめた。後述するように、『LiteBIRD』と『南極天文学の推進』以外の 3 つの中規模計画は、その具体化に向けてさらに 1-2 年の検討時間が必要である。SKA については、国内に「SKA コンソーシアム」が組織され、科学的検討や要素技術開発が進められている。ただし、これらが「大規模国際プロジェクトとしての SKA」への参画に向けた組織的活動になっているとまでは言い難い状況である。SKA への参画形態についても、今後 1-2 年かけてコミュニティ全体で議論していく必要がある。

計画名 (↓)・年度 (→)	2013	2014	2015	~2017	~2020
LiteBIRD	要素技術開発・ 地上実証実験	ミッション提案・ プロト製作開始		フライトモデル 製作開始	観測開始
南極天文学の推進	予算要求準備		アンテナ設計終了	アンテナ製作終了	現地試験観測
他の中規模 3 計画 ^[1]	R&D	R&D	計画の具体化? ^[2]		
SKA ^[3] への参画	国内体制議論	国内体制議論	計画の具体化? ^[2]		

※ 2012 年 12 月末時点でのタイムラインであり、その後の検討の進展は考慮していない。^[1] きゃらばん-サブミリ、大口径ミリ波サブミリ波単一鏡、ALMA 拡張アレイ。^[2] これ以降は不透明。^[3] SKA 自体は、2013 - 2015 が Pre-construction Phase、2016 - 2020 が Phase 1 (10% 建設) と位置づけられている。

2.1.2 中規模計画議論の経緯

まず天文学・宇宙物理学分科会の呼びかけに応える形で、電波天文コミュニティに向け、中規模計画の提案を改めて募集した(2012年8月31日提案締切)。その結果、以前から提案のあった次の5件の申し込みがあった(括弧内は提案代表者):(1) きゃらばん-サブミリ、銀河中心ブラックホール検出・高画質撮像装置(三好真)、(2) 超広視野・広帯域の大口径ミリ波サブミリ波単一望遠鏡による暗黒宇宙の大規模構造の探査(川辺良平)、(3) 南極天文学の推進:南極10mテラヘルツ望遠鏡(中井直正)、(4) LiteBIRD(羽澄昌史)、(5) ALMA 拡張アレイ(亀野誠二)。これら計画の理解を深め、問題点を洗い出し、コミュニティとして将来どのような方向を目指すべきかを議論するため、2012年12月21日・22日に「宇電懇シンポジウム」を開催した。両日とも約100名の参加を得た。当日は、各計画2時間の枠内(議論20分を含む)で計画提案者に自由にプログラムを組んでいただき、科学的意義や計画の詳細を説明していただいた。最後にそれを受けた総合討論を1時間行い、各計画の総括と今後の進め方に関して、コミュニティの合意を形成した。

シンポジウムに先立ち、各提案グループに対して計画概略書の作成を依頼し、それらを12月初旬にウェブで公開した。これにより、コミュニティ構成員は、各計画に関する十分な予備知識を得た状態でシンポジウムに臨むことができた。実際、シンポジウムでは、各計画に対する課題の指摘や提言も含め、率直かつ濃密な議論が展開された。この計画概略書の作成と並行して、2012年9月から11月にかけて、国立天文台電波専門委員会でも独立に各計画のレビューが進められた。電波専門委員会では「各計画に対して国立天文台がどのような責務を果たしうるのか」という点に焦点が当てられ、宇電懇とは異なる視点から議論が進められた。しかし一方で、各計画の科学的意義や技術的課題について多数の指摘がなされ、これらは結果的に宇電懇シンポに向けた計画概略書の完成度向上に寄与した。なお、電波専門委員会の議論の場には、宇電懇運営委員長もオブザーバーとして参加した。

シンポジウムでは、計画実行の優先度についても議論された。まず LiteBIRD については、計画が具体的で準備も着実であり、科学的意義も高く評価されたことから、実現に向けてコミュニティとしてもさらに支援を続けることで合意した。南極天文学の推進は、大学独自のプロジェクトという基本的性格を持つが、新たな観測天文学サイトの開拓という側面もあり、これらの点の理解を踏まえた支援をしていくことで合意した。ただし、南極というサイトの特性上、スケジュールや予算計画には大きな不確定要素があることも同時に認識した。その他の3計画、及び SKA の参画については、いまだ構想・準備段階にあるとの認識を得た。各提案グループに対しては、今後1-2年程度のタイムスケールで、R&D 活動を含め、計画の更なる具体化を図ることを要望した。また、これら計画を将来の学術発展のためにどう位置づけ取り組んでいくべきかという点について、コミュニティとして継続的に議論していくことを確認した。

2.1.3 大規模計画との関係

LiteBIRD は、これまで我が国の電波天文コミュニティにとって手薄だった宇宙背景放射を対象にする。インフレーション・モデルの検証という大目標からも分かるように、ALMA や他の将来計画とは独立した(我が国の電波天文コミュニティとしては)新しい研究対象を切り開く計画であると位置づけられる。ただし前景放射に関する情報は、星間物質研究にも活用されうる他、検出器等の開発面でも様々な計画と協調可能である。南極天文学の推進は、現時点では大学による独立した取り組みであるが、新たなアンテナ技術やサイト開発の面からは、広範な波及効果が期待できる。

その他の3計画は、まだ計画自体の不確定要素が大きいため、ALMA や SKA といった大規模計画との関連も不透明である。現状では中規模計画として検討されているが、今後、科学的意義や実現性の観点から検討を重ねる過程で、大規模計画として再定義される可能性も秘めている。SKA に対する我が国の参画形態も含め、今後1-2年で、各計画の具体化が望まれる。その結果を踏まえて、それぞれの計画の優先順位を、コミュニティとして改めて議論すべきと考えている。その際には、ALMA でどのような科学的成果が見込まれるのかという予想もまた、考慮されるべきであろう。

2.2 ALMA Extended Array (アルマ拡張アレイ)

2.2.1 計画の概要

アルマ拡張アレイ（以下 AEA と略記）は、ALMA 望遠鏡を 300 km に拡張し、解像度を 20 倍に向上する計画である。350 GHz で 0.6 ミリ秒角の分解能と 1000 K の輝度温度感度を実現し、VLBI の分解能で熱的な宇宙を探る。ALMA はサブミリ波帯で ~1 K の輝度温度感度で低温天体を、15 km の基線長で ~0.01 秒角程度の角分解能で観測する。VLBI は ~0.1 ミリ秒角のさらに高い角分解能で撮像するが、輝度温度の検出限界は ~ 10^8 K と高く、非熱的放射源に対象に限られる。AEA は両者の長を併せ、VLBI の分解能で熱的放射というパラメータ領域を観測天文学にもたらし、0.6 ミリ秒角の分解能は、距離 10 pc で 1.3 太陽半径、10 Mpc で 0.03 pc、 $z = 2$ で 5 pc に相当する。「銀河形成と巨大ブラックホールの成長」「活動銀河核への質量供給」「恒星表面の撮像」「恒星の視直径・距離計測」「原始星初期段階の撮像」など、従来の観測天文学で未踏のフロンティアが広がる。

本計画は、20 GHz 帯以下の低周波で宇宙初期の暗黒時代などを探る SKA (<http://www.skatelescope.org>) とは対象や波長域が異なるが、活動銀河などの高エネルギー現象を広帯域のエネルギースペクトルで理解するシナジーが期待できる。> 5000 km の長基線でブラックホール撮像をめざす EHT (<http://www.eventhorizontelescope.org>) は対象がブラックホールシャドウに絞られ、AEA とは方向性が異なるが、AEA は EHT に撮像の高品質化の効果をもたらす。LLAMA (<http://www.iar.unlp.edu.ar/llama-web/>) は本計画と方向性が一致し、協力して進めたい。



図 2.1 左:干渉計の分解能（横軸）と輝度温度感度（縦軸）。AEA は VLBI に比べて 1 万倍の輝度温度感度向上、ALMA に比べて 20 倍の分解能向上をもたらす、熱的放射を最高分解能で観測する。右:AEA のアレイ配列案。AOS, OSF は ALMA の山頂サイトと山麓施設, LLAMA 計画の 2 局も記してある。

2.2.2 科学的意義

AEA が天文学にもたらす多様なフロンティアのうち、2 つの領域を述べる。詳しくはワークショップサイト (<http://milkyway.sci.kagoshima-u.ac.jp/groups/workshopalmaextendedarray2012/>) を参照されたい。

銀河形成と巨大ブラックホールの成長：ASTE などで多数発見された宇宙初期の星形成銀河「サブミリ波銀河」での巨大ブラックホール形成・成長を調べるため、AEA で降着円盤の放射を星形成領域から空間分離し、ブラックホールの質量・光度・降着率を測る。また、近傍の活動銀河でダストトーラスの内縁構造を探り、銀河円盤からブラックホールへの物質供給（角運動量を抜く）機構を解明する。

恒星の撮像と視直径・距離計測：ベテルギウスなどの赤色超巨星を 100×100 pixels に解像し、太陽以外で初めてフレアなどの活動現象、対流構造、自転計測などが調べられる（左図）。また、100 pc 以内の主系列星、10 kpc

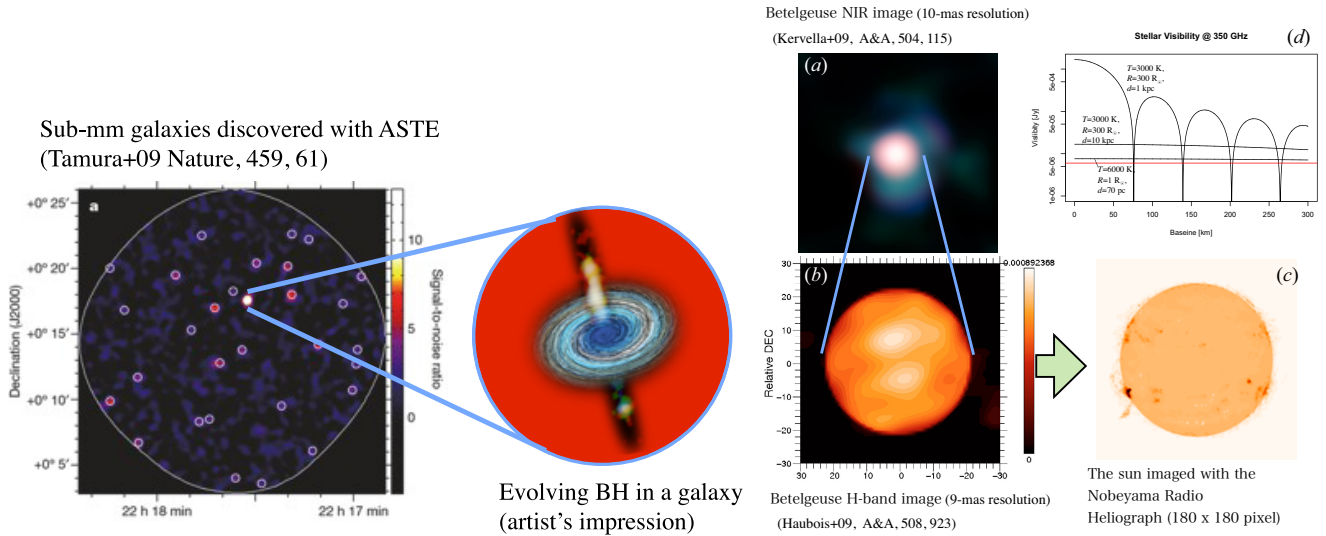


図 2.2 左:ASTE で発見された多数のサブミリ波銀河。AEA の分解能は $z = 2$ で 5 pc に相当し、星形成領域のダスト放射と巨大ブラックホールの降着円盤からの放射を空間的に分離できる。右:恒星表面の撮像：(a, b) は赤外線干渉計によるベテルギウスの像。AEA の撮像性能はこれを 100×100 画素に分解し、電波ヘリオグラフによる太陽像 (c) に匹敵する。(d) は基線長 (横軸) に対する恒星のビジビリティ (縦軸) で、赤線は AEA の検出限界を示す。ビジビリティのフィットにより恒星のサイズを計測できる。

以内の巨星の視直径を計測できる。実サイズが推定できれば、GAIA が観測できない銀河円盤の奥も直接測距できるので、銀河系全面に渡って地図を作成できる。

他にも、原始星初期段階の撮像、系外巨大ガス惑星形成の撮像、系外惑星主星の質量決定およびトランジットによる惑星公転軌道の決定、連星系の軌道決定、活動銀河からのアウトフロー撮像など、さまざまなテーマが提案されている。広い分野から多様な研究課題を受ける余地があり、柔軟に仕様を最適化したい。

2.2.3 所要経費と年次計画

FY	X	X+1	X+2	X+3	X+4	X+5	X+6...
開発	Site survey						
	Technical development						
建設			Infrastructure				
			Antenna		RX / Backends	Tests	
運用							Full Op.

項目	内容
観測局	19.7 億/局 $\times 5 = 98.5$ 億 (局 1.5 億, アンテナ 14 億, FE3 億, BE1.2 億)
計算機	2 億 / 5 年
立上げ	6 億
マネジメント	2 億
建設費計	108.5 億円
※運用経費 1 億円/局 $\times 5$ 局 + 保守 2.5 億円 + マネジメン ト 1 億円 = 8.5 億円/年	

計画のスケジュール案と経費見積りを上記に示す。ALMA に機能を付加する本計画は、ALMA Development Program の指針に沿い、高い科学的価値があること、経費と体制は提案者が全て用意すること、ALMA の運用に支障がないこと、という条件が審査される。X (計画開始) のトリガーは、ALMA が本格運用で成果を挙げ、より高分解能への要求が高まるのが必須である。運用時間は、ALMA 本体を使う高感度 (HS) モードと ALMA 拡張アレイのみで運用する中感度 (MS) モードからなる。HS 時間は ALMA 本体との科学的意義の優劣で決まるが、0 次案として HS が 1000 時間/年、MS が 4000 時間/年を想定する。MS の 25% 程度の時間で銀河系内の巨星 20,000 天体の視直径・距

離計測を実施するには5年の期間を要する。それ以上の運用は経費と成果創出との対比に基づいて審査を受けるが、10年以上の長期に渡って運用したい。

経費の大半を占めるアンテナは、ALMAの12mアンテナを元に見積っているが、ALMAプロトタイプアンテナを利用する、LLAMA計画と協力して局数の負担を軽減する、などの対策を検討している。

2.2.4 実施体制

東アジア・北米・欧州およびチリの国際計画であるALMAに機能を加える、国際協力が必須の計画である。付加するサイト建設は提案元の日本と、LLAMA計画のアルゼンチン・ブラジルが出資するのが望ましい。サイト保守・警備は有人だが、通常は遠隔運用で行なう。運用においてもALMAおよびチリ・アルゼンチンとの協力が必須である。

2.2.5 学術コミュニティの合意状況等

本計画は2011年8月に宇宙電波懇談会より「中規模計画」として日本学術会議に提案した。宇宙電波懇談会シンポジウム(2011年12月)、東アジアVLBIワークショップ(2012年5月)、VLBI懇談会シンポジウム(2011年12月、2012年12月)等で説明を行ない、2012年11月にワークショップ「ミリ秒角の分解能で探る熱的宇宙」を開催して科学目標を広く検討した。2012年12月に宇宙電波懇談会にて中規模計画の評価を行ない、「今後ALMAによって得られる成果を横目で見ながら、徐々に計画を練っていく必要がある。計画の具体化には、検討状況・時機いずれの面からも、まだ若干遠い段階にある」との評価と共に日本学術会議に答申された。また、国立天文台電波専門委員会にて2012年8月-11月にヒアリングを実施し、「引き続き科学的・技術的検討を進めていくことが望まれる」「十分にALMAの次の電波天文計画の柱になりうる」「国際的な枠組みの中で検討や議論を進めるべき」として、「再」の評価を得た。

2.2.6 大学共同利用

本計画の観測時間はALMAと同様に共同利用として公募される。ALMAの観測時間は出資比率に応じて、現在東アジアに22.5%が配分されており、AEAにも同じ方針が適用される。

2.2.7 プロジェクトの現状

本計画はまだ構想段階にあり、科学的意義と要求仕様を検討中で、建設計画や運用体制などの実現方法は未決定である。ALMAの成果に基づき、天文学コミュニティでの合意を形成しながら、現実的な計画・体制を設計していく。

2.2.8 天文学・宇宙物理学分科会からのコメント

計画の学術的意義

本計画は、結合型干渉計とVLBIの境界を埋め、熱的な電波源の高分解能イメージングに大きく寄与するもので高い意義があると考えられる。

経費、スケジュールの妥当性

この計画は、今後克服すべき多くの技術的なチャレンジを含んでいると推定されるが、提示された経費やスケジュールには、未だそれらが十分に反映されていないようである。従って、まずはどのような技術的課題があるかを具体的に明確にし、それとの関係で、経費やマンパワー、スケジュールを見積もる必要がある(次の技術的成熟度も参照)。

技術成熟度

本計画には、結合型干渉計で行う予定の100以上の基線長で位相安定度をどの程度の精度で保持できるかや、その観測データの較正法など、まだ具体的に検証されていない技術的な課題が存在する。それらの難易度（克服までの時間とマンパワー、経費など）を注意深く見積った上で計画を進める必要がある。さらに、ALMA本体が15までの基線長でどこまでの性能を達成でき、（長基線干渉計として）どのような技術的課題が残ったか、に本計画は大きく左右される。

計画実施体制の妥当性

上記の技術的な課題を克服しつつ計画を進めるための体制作りが重要である。なお、ALMAの観測システムと結合して運用されることから、ALMAと十分に情報交換を行いながら計画を進めるための協力体制の構築も大切である。

学術コミュニティでの合意状況

本計画は、中規模計画検討会での議論を通して学術的な意義の議論が深まった経緯があり、今後、観測対象等に関して、コミュニティの協力を得てさらに広く科学的検討を行うことで計画がよりよいものになると考えられる。また、日本の電波コミュニティに広く協力を呼びかけて、技術的な課題の克服も含めた実行体制を整えていくべきである。

共同利用体制の妥当性

ALMAのDevelopment Planとして位置づけられることから、システムの完成後は、ALMAのルールと取り決めに従って、ALMAとの協力のもとに、適切に共同利用体制が整えられることになる。

総合評価

本計画はまだ検討の初期段階にあると考えられる。また、ALMAで達成される長基線干渉計としての性能に、本計画の内容自身が大きく左右される。そのため、ALMAと独立して早期に進めることは難しいが、熱的な電波源の高分解能イメージングは、天文学のすべての分野に大きく寄与する可能性を持つことから、広く日本の電波コミュニティを巻き込んで、日本が世界に貢献できる計画として、長期的に取り組むべきものであると考えられる。

2.3 きやらばん-サブミリ、銀河中心ブラックホール撮像装置 (CARAVAN-submm)

2.3.1 計画の概要

きやらばん-サブミリ (CARAVAN-submm) はアンデス高地 2 カ所に設置した固定 VLBI 局と小型移動 VLBI 局で構成される VLBI 撮像装置である。日本の測地 VLBI で実績ある移動 VLBI 法を用いて u - v 面を埋め、従来の固定局だけの VLBI では到達しえなかった高画質高分解能撮像を目指す。銀河系中心 SgrA* を観測、降着円盤などのブラックホール近傍を撮像し、ブラックホール・ホライズンの様子を明らかにして、強重力場における一般相対論検証に道を拓き、ブラックホール近傍観測天文学を興す。国際共同 ALMA との協力はこの装置に高感度を付加し、観測対象を増やせる。ALMA 単体では達成できない 10μ 秒角台の分解能、既存のサブミリ波望遠鏡群だけの VLBI(EHT) では達成できない高画質でブラックホール近傍を撮像し、日本主導でブラックホール研究の更なる成果をあげる。

2.3.2 科学的意義

- 世界初のブラックホール・ホライズン (=観測上の”事象の地平面”) の検出。
- 強重力場に於ける一般相対性理論検証の実験場が初めて実現。
- ブラックホール降着円盤の撮像、ジェット生成等の撮像的ブラックホール観測天文。

つまり、本装置単独でホライズンの存在の強い証拠を得、降着円盤の撮像を行うことができる。さらに、世界共同で、ホライズンと降着円盤の詳細撮像を行うことができる。

- 世界初のサブミリ波帯メーザ源の VLBI 高分解能観測が可能になる。
- ALMA-拡張計画 (恒星面撮像) のパイロット的試験を分担、国際共同 ALMA の中での日本の主導権の確保に貢献。

つまり、SgrA* のみではなく、適正基線長を移動局が作ることで、恒星面撮像、サブミリ波帯メーザ源の高空間分解能観測ができる。実は汎用装置。

- 南米 VLBI 網計画への参加。ペルー、ボリビアなどの電波天文学に貢献。
- 本格的な銀河中心ブラックホールモニター観測装置 (スペースサブミリ波 VLBI) への足がかりとなる。

つまり、本プロジェクトは将来の大きな発展への種となる。

2.3.3 所要経費

最大建設費 60 億円：固定大型局、アンテナ 20 億円、付帯設備 5 億円、2 局で 50 億円小型移動局装置 5 億円、その他を含めて設備費総額 60 億円程度。運営費は年間 6 億円 (建設費の 10%)。以上は固定局に ALMA 素子アンテナと同等の規格品を用いた場合での算出金額である。

目標建設費 15 億円：ALMA アンテナは 800GHz 帯観測まで行う高スペック汎用電波望遠鏡である。一方本計画では 230GHz 程度での観測でよいので、コストダウンは可能である。さらに関連大学研究者が主体となって自ら装置を製作することで建設費は圧縮できると考えている。

ペルー、ボリビアとの国際協力を考えているが、経費を負担してもらおう事は想定していない。

2.3.4 年次計画

概算要求等で予算が一挙に獲得できた場合：

第1年次 アンテナ製作、固定局の先行建設工事

第2年次 アンテナ製作、固定局アンテナ組み立て、設置、移動局整備、試験観測

第3年次 アンテナ組立、調整、観測システム調整、試験観測。初期成果（ブラックホール・ホライズンの存在を強く示す干渉データの取得）。

科研費等で移動局の開発から進める場合：

第1-2年次 国内での移動局ゼロ号機の製作、移動技術の確立、230GHz帯 VLBI フリンジ検出。

第3-5年次 移動局初号機（or 改修ゼロ号機）をアンデスへ、地元望遠鏡と VLBI 実験。確度は上記より低いですがホライズン存在を強く示す visibility データの取得。

2.3.5 実施体制

国内実施体制

国立天文台・宇宙科学研究所・NICT・東京大学・法政大学・慶應大学・早稲田大学・名古屋大学・愛知教育大・大同大学・岐阜大学・鹿児島大学・熊本大学・苫小牧高専。多数の機関から興味をもつ研究者が参加しているが、計画を中心となって推進する研究機関があるわけではない。今後、コミュニティの意を受けた共同利用研が推進の主体となるか、強力な「大学連合」を組織する必要がある（その形態によって年次計画と予算規模は変わりうるので、二通りを上記では記述した）。

チャカルタヤ宇宙線観測所の利用においては、東大宇宙線研究所との協力体制が重要となる。現在、チャカルタヤでのサイトモニタが宇宙線研究所の共同利用として採択されている段階である。

国際協力

ペルー・地球物理観測所（ワンカイヨ観測所）、ボリビア・チャカルタヤ宇宙線観測所にはサイトサーベイにおいて参加、協力を得てきた。両研究所には今後の電波望遠鏡の設置に関する同意を得ている。

2.3.6 学術コミュニティの合意状況等

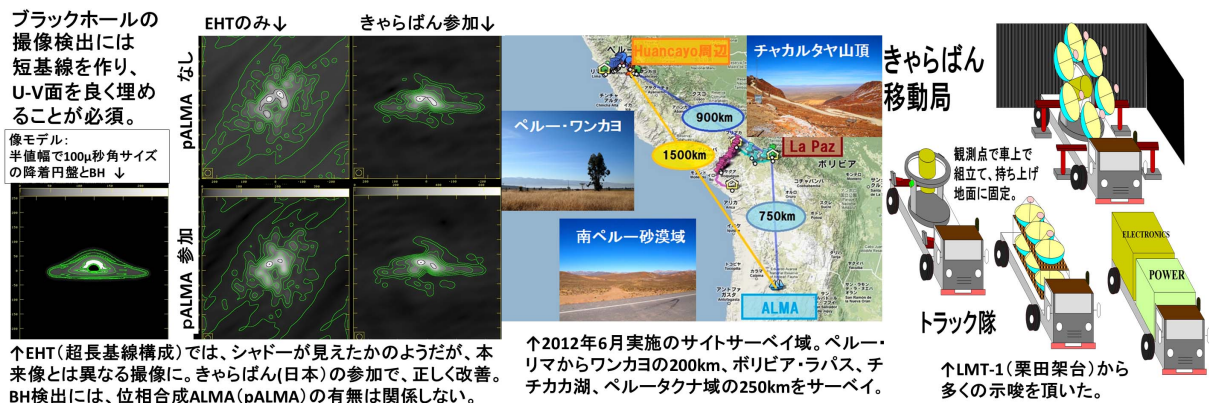
サブミリ波 VLBI によってブラックホールをみよう、と 2000 年頃から提案してきた。近年、相対論・重力理論、ブラックホール降着円盤、我々の銀河中心等の研究者と勉強会・研究会を繰り返してきた（2008 年度のブラックホール磁気圏勉強会、天文学会企画セッション「銀河中心 SgrA* とブラックホール時空」を皮切りに不定期な BH 勉強会を含め、30 会合程度）。

電波天文コミュニティでは宇宙電波懇談会・VLBI 懇談会各々のシンポジウムで説明、議論があり、一定以上の認識を得ている。また 2013 年度、国立天文台・VLBI 小委員会に VLBI の将来計画 WG の一つとして「ブラックホール WG」を設立。密な検討が行われる予定。

なお高エネルギー天文連絡会シンポに於いても計画を説明、（波長域が異なるので）「支持」をいただいた（2011 年夏）。

2.3.7 大学共同利用

移動局によって基線長を桁で変化させることが可能なので、比較的、低輝度温度の天体の高空間分解能観測も容易となる。つまり銀河内メーザ源 (= 広がりが大きく輝度温度は低め) や、さらに熱的天体の試験的検出も行える。移動局1局完成後には、サブミリ波帯メーザ VLBI 観測、ALMA-拡張の試験など、SgrA* 以外の実験的観測に提供できる。全3局の完成後には、VLBI 観測一般の共同利用ができる。



2.3.8 プロジェクトの現状

「ブラックホール近傍の撮像的研究」は多くの研究者の関心を頂いてきた。本プロジェクトは純粋にボトムアップで発生した科学プロジェクトである。科学目標に対する学問的興味を動機として研究者は参加しており、確たる資金もないのに、ここまで進んできた。数年来実施している勉強会・研究会では、主催者側の旅費等の余裕がなく、研究者がその興味に基づいて自腹で参加、議論を深めてきた。また昨年は研究者個人がもつ、それぞれの研究費から必要費用を捻出していただき、観測サイトのサーベイ(総額百数十万円)を実現した。

現段階では、(1) 一定の資金を獲得して移動局の開発からはじめ、(2) 同時に、推進主体となる組織を作る必要がある。今後の計画実現には、観測装置開発のための一定以上の経費を必要とし、少なくとも大型の科研費レベルの予算を獲得する必要がある。本プロジェクトはなるべくコストダウンを果たして実現しようと試みているが、それでも十数億円は要する。これは、大大学においても容易に獲得できる金額ではない。どのように必要予算を得るかが課題である(=中規模計画に該当するすべてのプロジェクトに共通の課題だと考える)。もう一つの課題は、推進の主体となる組織・研究機関の確保である。参加メンバーは多数であり、その所属機関も多岐にわたる。そのためメンバーが本プロジェクトを主任務として果たすことはきわめて難しいのが実情である。

2.3.9 天文学・宇宙物理学分科会からのコメント

計画の学術的意義

本計画の第1の目的は、SgrA*の降着円盤及びブラックホール近傍の撮像である。この目的は非常に重要であり、計画には一定の学術的意義が認められる。

経費、スケジュールの妥当性

移動局を用いて VLBI の撮像観測を成功させるためには、クリアすべき技術的な課題がいくつか存在すると予想される（技術的成熟度の項も参照）。本来は、そのような技術的な課題への克服の道筋も含めて検討し、それらをフィードバックする形で装置計画とスケジュールが具体化されるべきであるが、現時点では、本計画はまだフィードバックループの途中にあると考えられる。

技術成熟度

本計画で最も重要な役割を果たす、VLBI の撮像観測可能な移動局、がどの程度の波長帯と基線長で使用可能となるのか、その技術的な検証が未だ十分なされていないとはいえ、それをまず第一に行うべきである。その結果、目的を達成するための技術的な課題が整理され、その克服も含めたスケジュールやマンパワーと経費が見積もられ、その上で適正な装置計画を作成することができると考えられる。

計画実施体制の妥当性

上記の技術的な課題への克服も含めて、計画実施体制を見直すべきであろう。

学術コミュニティでの合意状況

本計画は、その学術的な目的から、理論及び電波コミュニティの関連する研究者に働きかけを続け、計画の推進に一定の成果をあげてきた。しかしながら、本計画は、移動局による VLBI イメージングという新たな道を開くものであり、今後の日本の VLBI 天文学にとって非常に大きな貢献となるはずである。この観点から、さらに広くコミュニティに理解・協力を求めるべきである。

総合評価

本計画はまだ検討の初期段階にある。計画をより具体的に進めるためには、試作移動局の開発などを通して技術的な検証を行い、課題の克服も含めたスケジュールや経費、適正な装置計画を組むべきである。そのための1つの方法としては、コミュニティ内での議論でも指摘されたように、まずは科学研究費等で実施可能な、試作移動局の開発を主とする小規模計画としていち早くスタートさせることが考えられる。また、同様の目的の装置が今後世界で複数立ち上がってくることを考えると、早期スタートに加え、学術的な目的の見直し（ブラックホール撮像以外の観測対象の具体的な検討）も有効であろう。

2.4 南極 10m テラヘルツ望遠鏡計画

南極内陸部高原地帯は地上で唯一テラヘルツ波の観測が可能であり、ミリ波サブミリ波でも地上で最高の観測環境にある。この地に日本が持つ(新)ドームふじ基地に超伝導電波カメラを搭載した広視野 10m テラヘルツ望遠鏡を建設し、東北大学の 2.5m 赤外線望遠鏡と連携して、high-z にあるダスト銀河の超広域探査を行う。これによって銀河の誕生と銀河創生期の星形成活動の解明を行う。またこの計画をもとに、より大きな大型南極望遠鏡(口径 20-30m 赤外テラヘルツ望遠鏡、赤外テラヘルツ干渉計)の実現を目指す。

2.4.1 計画の概要

南極大陸の昭和基地から約 1000km 内陸側に日本のドームふじ基地があり、さらにそこから約 60km ほど離れたところに新ドームふじ基地が建設される予定である(図 2.3a)。これらは標高が 3800m と高く、気温が -20°C ~ -80°C の極寒の地である。そのため、(1) 大気中の水蒸気が非常に少なく、サブミリ波から赤外線にかけて大気の透過率が極めて高い(図 2.3b-d)。さらに時間的に安定しており(図 2.3b,c)、連続波電波の観測や干渉計での観測にも適している。(2) 快晴率が 68% (1994,95 の平均)、晴天率が 85% 程度と非常に高い。(3) 年間平均風速は 5.8m/s と高くはなく、10m/s 以上の風は非常に少ない。これらは(新)ドームふじ基地がサブミリ~赤外線の観測で地上最高の条件にあることを示し、特に 1THz 以上では事実上地上で唯一観測可能である。

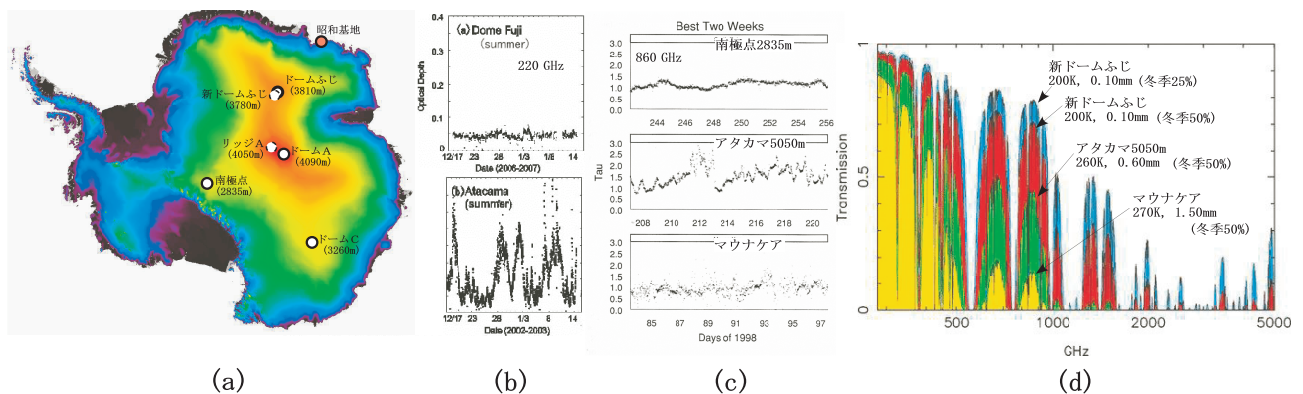


図 2.3 (a) 南極大陸高原地帯にある(新)ドームふじ基地と他の主な基地の位置を示す。グレーは標高を示す。ドーム A には中国が、ドーム C には欧州が基地を持つ。米国は南極点に基地を持つほかりッジ A に基地を建設する構想がある。(b) 上図がドームふじ基地で 2006 年 12 月 17 日から夏季 1 か月間測定した 220GHz での大気の光学的厚みである (Ishii,S., et al. 2010)。下図は 2002 年同日から 1 か月間のチリのアタカマ 5050m での値。(c) 南極点、アタカマ 5050m、マウナケアでの 1998 年における連続する 2 週間で最も安定な大気の光学的厚みを表示したもの。ドームふじでは南極点よりもさらに安定であることが期待される。(d) 衛星データによる可降水量に基づく各地の大気透過率の推定値 (Yang,H., et al. 2010。新ドームふじ基地はドーム A と同程度という推定から)。

新ドームふじ基地に口径 10m テラヘルツ望遠鏡を建設する(図 2.4a,b)。鏡面誤差は $15\mu\text{m}(\text{rms})$ を目標とし、850GHz を中心として 400GHz~1.5THz で観測する。角分解能は $5''$ ~ $19''$ である。アンテナの主鏡には回転放物面ではなく回転双曲面を採用して(リッチ・クレチアン光学系)、1度 ϕ の広視野を実現する。ナスミス焦点に 400GHz \times 1000 素子、850GHz \times 3000 素子、1.5THz \times 4000 素子の超伝導電波カメラ(図 2.4c)を搭載し、広域掃天観測を可能とする。将来的には 10 万素子の電波カメラを搭載する計画である。またヘテロダイン受信機+電波分光計も搭載する。アンテナは雪の吹き溜まりを防ぐため、高さ 4~5m の高床式の台の上に設置する。感度は 850GHz において電波カメラでは 1 時間積分で $5\sigma \approx 2\text{mJy}$ である。1THz 以下では confusion limit ($5\sigma \approx 1\sim 2\text{mJy}$) で観測感度が決まる。

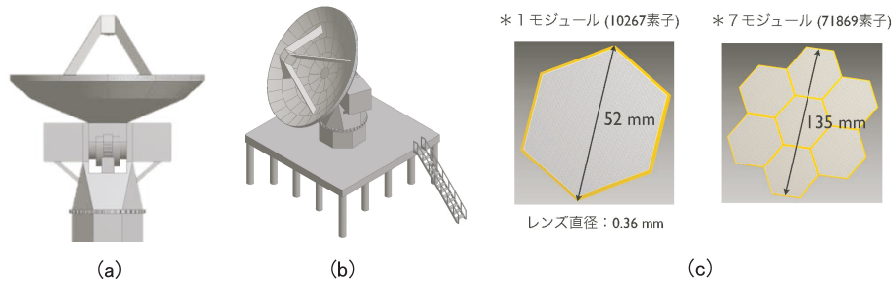


図 2.4 (a) 南極 10m テラヘルツ望遠鏡。(b) アンテナは高さ 4~5m の高床式の台の上に設置。(c) 850GHz 帯の超伝導電波カメラの 1 モジュールとそれを並べた 7 モジュールの例。

2.4.2 科学的意義

high- z のダスト銀河の超広域掃天観測を行う。銀河がいつ、どのようにして誕生し進化してきたかは未解明の重要問題である。またこれまでの可視光の観測では、発見された銀河の数は（例えば宇宙再電離に必要な銀河に対し）不足しており、見えない銀河（暗黒銀河）が多数存在するはずだと言われている。実際、図 2.5a のように高感度の可視光の観測でも全く対応物がないところにサブミリ波銀河が多数受かっている。通常の銀河や爆発的星形成銀河では一般にダスト放射により赤外線でも最も明るく輝いている。さらに最近の観測によると $z > 4$ ではダスト温度が高い傾向にあるとも言われている（図 2.5b,c）。high- z 銀河ではそのピークがテラヘルツ~サブミリ波で観測されるのでその周波数帯で観測するのが最も有利である。またスペクトルから銀河のおよその距離を求めるためにはピークの両側も測定する必要がある。そのため 10m テラヘルツ望遠鏡と 2.5m 赤外線望遠鏡が協同してスペクトルの決定にあたる。また多くの高励起の分子輝線や原子輝線の観測も行い、星形成率など銀河の性質も明らかにする。

宇宙は大規模構造をしているため一部の領域だけを観測して銀河の数を求めると宇宙論的には見誤ることになる。ウォールを観測すると銀河の数が多く、ボイドでは少なくなってしまう。統計的に有意な結果を得るためには大規模構造よりはるかに大きな領域を観測する必要がある。そのため超広視野望遠鏡による広い領域の掃天観測を行う。

検出された銀河はアルマ望遠鏡や TMT などによって内部の詳細観測を行い、銀河の構造と性質を明らかにする。

なお、high- z 銀河の探査以外にも近傍銀河や銀河系内の星形成領域の観測など、多くの目的に使用可能である。

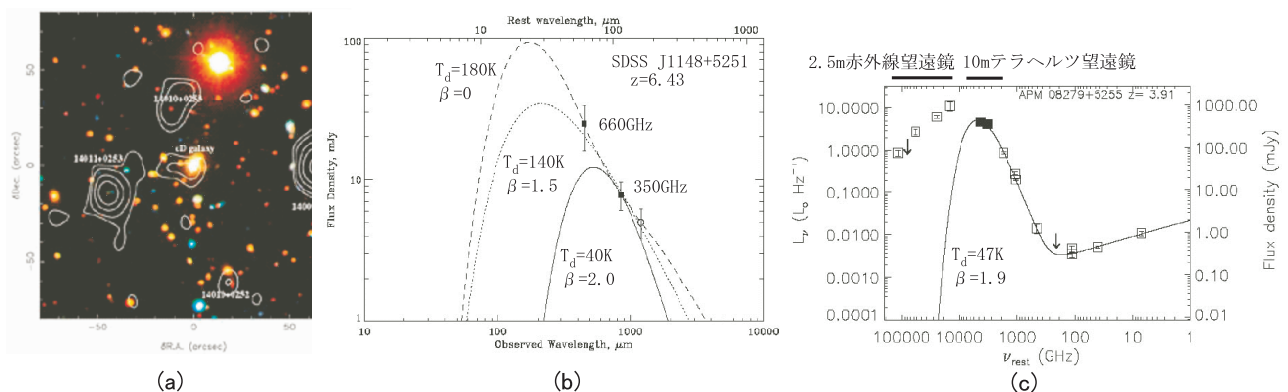


図 2.5 (a) JCMT+SCUBA による 350GHz で検出されたサブミリ波銀河（等強度線）で、左側の天体は $z=2.56$ 。背景はハッブル宇宙望遠鏡による可視光で観測された $z=0.25$ にある銀河群。(b) $z=6.43$ にある銀河 SDSSJ1148+5251 のスペクトル (Robson, et al. 2004)。高温であることがわかる。(c) $z=3.91$ にある銀河 APM08279+5255 のスペクトル (Beelen, et al. 2006)。

2.4.3 所要経費

設計製作し国内仮組して調整試験までを第1期とする。アンテナ関係が開発費を含めて9.0億円、超伝導電波カメラが2.0億円、ヘテロダイン受信機+電波分光計で2.1億円、人件費が1.7億円、その他を含めて総額15.2億円である。第2期は南極への輸送、現地組立、調整試験を経て観測を開始する5年間で、人件費を含めて総額5.1億円である。

2.4.4 年次計画

概算要求は2期に分けて行う。第1期では設計製作に4年、国内仮組試験に1年で計5年間。第2期も5年間で、南極への輸送が2年、その2年目に現地組立、調整試験も行い、3年目から観測を開始する。南天掃天観測は最終的には10年程度かかる見込みであるが、短時間掃天観測による明るい銀河の検出から順次報告していく。

2.4.5 実施体制

国内実施体制

筑波大学が研究を統括する。アンテナ製作は筑波大学と京都大学が協力して行う。超伝導電波カメラは国立天文台と筑波大学、ヘテロダイン受信機は国立天文台や他大学の協力のもと筑波大学が行う。低温対策や輸送時の耐振動対策は筑波大学、東北大学、国立極地研究所が協力して行い、日本大学や大阪大学など多くの大学の協力も得る。輸送、現地建物の建設、電力供給（自家発電）、現地生活維持は国立極地研究所が担当する。観測開始後は筑波大学内に南極天文台（仮称）を設置して運用にあたる。

国際協力

南極観測の国際組織（SCAR）の天文天体物理委員会に市川（東北大学）が代表して参加し、協力関係を築いている。また東北大経由で豪州と協力してドームふじ基地での大気気象の測定を行っている。

2.4.6 学術コミュニティの合意状況等

2005年に「南極天文コンソーシアム」（代表中井）を結成し、協力して計画を推進してきた。宇電懇と光赤天連の公開シンポジウムで発表し、日本学術会議物理学委員会天文学宇宙物理学分科会に推薦された。筑波大学長を代表として当該分科会の推薦のもと日本学術会議の大型計画マスタープランに申請した。国立極地研究所の第8期南極地域観測事業（2010-2015）で南極天文の推進が正式に決定され、進めている。第9期（2016-2021）でも目玉候補となっている。

2.4.7 大学共同利用

全観測時間の約半分を南天掃天観測に当てるがその観測データは較正後、一般に公開する。残り約半分を個別観測に当て、その約半分を一般共同利用に供する予定である。

2.4.8 プロジェクトの現状

筑波大学、東北大学、国立極地研究所の連携プロジェクトとして平成26年度概算要求の特別経費（5か年計画）として提出した。2大学はそれぞれ10m テラヘルツ望遠鏡および2.5m 赤外線望遠鏡を具体的な要求項目として提出してある。もし当該概算要求が認められ、かつ2019年度に新ドームふじ基地が設置されれば（国立極地研究所の別の概算要求事項）、2020年度望遠鏡現地組み立て、2021年度観測開始となる予定である。

2.4.9 南極天文学推進計画（10m テラヘルツ望遠鏡計画＋赤外線望遠鏡計画）へのコメント

はじめに

テラヘルツと赤外線の二つの計画は、いずれも大学の計画として南極の観測適地への進出を目指すものだが、それぞれの実施機関である筑波大学と東北大学のグループは提携して主な観測課題で協働する一方、「南極天文コンソーシアム」を組織し、現地への輸送やインフラに責任を負う国立極地研究所とともに密接な推進体制を築いている。また実現後は、「南極天文台（仮称）」として、一体となった運営を計画している。従って評価は両者に共通する面が多い。以下では基本的に両者を一体の計画として共通する評価を中心に述べ、必要に応じて個別の評価やコメントを付け加えることにする。

計画の学術的意義

日本が活動する南極高地の「ドームふじ」近くにさらに観測に適した「新ドームふじ」（標高 3,800m）が極地研により建設されるのに併せ、筑波大学・東北大学がサブミリ波・赤外線の中規模望遠鏡と先端的観測装置を設置して観測を進める意欲的な計画であり、両者はコンソーシアムを結成し、国立極地研究所と共同して、一体として推進している。

学術的意義は、個別の計画で評価した時は高い評価、両者を合わせた時は極めて高いと評価する。その理由は、以下のとおりである。

第1に、南極高地は、天文観測条件は素晴らしく、特にサブミリ波・赤外線では「地上最良の天文観測地」である。米国、欧州諸国、中国などが競って南極高地への観測進出を進める中、日本が二つの国立大学主導の計画でその一角に立ちリードすることは、日本の天文学にも日本の科学全般にとっても、大きな未来を開くだろう。ただし、アクセスが困難であるという課題があるため、国立極地研究所との共同により、この課題の対応に取り組んでいる。

第2に、透過度、晴天率、シーイング等で最高の観測条件を活かした口径 10m サブミリ波望遠鏡と 2.5m 赤外線望遠鏡の組み合わせによる遠方ダスト銀河の広域探査という主課題は、宇宙膨張初期の天体形成を直接・包括的に探るもので、また稼働を始めた巨大電波望遠鏡アルマ、ハワイに建設予定の 30m 光赤外線望遠鏡 TMT に好個の観測対象を提供する大きな役割も果たすだろう。

経費、スケジュールの妥当性

経費、スケジュールとも、ほぼ妥当である。それぞれに望遠鏡の建設経費、付加する観測装置の経費を見積もり、それぞれの大学から 26 年度に向けた概算要求が、既に文科省に提出されている。また輸送、現地設営、維持等に関しては極地研が中心となる予定である。これも一部はすでに概算要求が提出されている。サブミリ波望遠鏡は経費的に苦しい可能性があるが、その場合は学術的意義を落とさないレベルで口径をやや縮小する等、工夫が必要になるかもしれない。

スケジュールはいずれも国内で数年かけて望遠鏡政策・テストを行い南極に輸送する計画で、年数もほぼ妥当であろう。南極では氷の状況が悪く輸送困難が続いているが、そうした外的条件によって若干の遅れが出ることは覚悟する必要がある。当面は 2020-21 年の現地組み立て完了・観測開始をにらんで、国内での望遠鏡・観測装置の製作とシステム作りをしっかりと進めることが重要である。建設から観測も含め 20 年を見通すのもこの種の計画としてほぼ妥当と思われるが、大学という環境下で将来的運用の計画・体制を固めて行くことが望まれる。

技術成熟度

サブミリ波アンテナ、赤外線望遠鏡ともに、我が国の天文研究者も企業も十分な経験と技術を持っている。ただ、極地条件下での組み上げ・運用・精度の維持に関しては未知数の部分が多い上、経費節約のため工夫を凝らしたアンテナ・望遠鏡であるから、その設計・製作に当たっては経験を持った天文研究者と技術者が制作企業と十二分に共同して

進める体制が必須である。なお極地での運用を考慮すれば、特に赤外線望遠鏡計画では、将来の装置計画を整理しておくことが必要だろう。

計画実施体制の妥当性

核となる 2 大学と極地研の基本的な支援体制は、十分に得られている。実施主体である筑波大学、東北大学は 26 年度向け概算要求で準備態勢を整え、またそれぞれに、日本学術会議の学術の大型計画マスタープラン（2013）に学長が責任者として応募した。また極地研では「南極における赤外線・テラヘルツ天文学の推進」が第 8 期観測事業に採択され、南極天文の推進が正式にうたわれている。また両計画を含む「極域科学フロンティア」を、上記の学術会議マスタープランに提出した。いずれも実施の責任を明らかにしたものである。ただ実行に移った場合には、宇宙科学研究所における太陽や電波衛星の場合のように、極地研内に天文計画を推進する専門家チームが配置されることが計画の成功には欠かせないであろう。

次に天文学コミュニティを含めた実施体制は、ほぼ整いつつある状況と判断される。サブミリ波計画では、観測装置は国立天文台や大学との共同で進められる。赤外線望遠鏡計画では主に東北大学内の学部・研究科との共同に重きを置いているが、望遠鏡での京大との協力等、他大学・機関との共同に関しても明記すべきである。いずれにせよ「南極天文コンソーシアム」を中心に広くしっかりした協力体制を敷くことは、新たな技術開発と長期の特殊な運用を要するこの計画では重要になるだろう。

学術コミュニティでの合意状況

分野コミュニティにおける合意形成は、十分になされている。両計画とも、分野コミュニティである宇宙電波懇談会、光赤外線連絡会において提案・議論され、2011 年からの中規模計画の検討でそれぞれに高い評価を受けている。学術会議の大型計画マスタープランには両計画とも、各分野及び全分野のシンポジウムを受けた天文学・宇宙物理学分科会で評価され、マスタープランに提出することが承認された。

共同利用体制の妥当性

両計画とも、望遠鏡時間の一部を共同利用とする計画としている。しかしながら南極という未経験地域におけるリモート運用がどのように展開するか、不明な部分が多い。まずは共同開発・共同観測に多くの大学・研究所等から研究者が参加することで協力と共通理解を広め、一般的な共同利用は第 2 段階で考えるのが、現実的ではないか。従って現段階では共同研究・共同開発に重きを置き、公募を伴うような共同利用は後の段階としておく。

総合評価

第 1 に、サブミリ波・赤外線「地上最良の天文観測地」である南極高地での先端的観測を開拓し世界をリードすること。第 2 に、観測環境を活かし、中心課題として口径 10m サブミリ波望遠鏡と 2.5m 赤外線望遠鏡の共同で宇宙膨張初期の天体形成を直接的・包括的に探査すること。第 3 に、二つの国立大学と極地研の密接な共同で、日本の天文学・科学全般に大きな未来を開くこと。

以上の総合によって、この両計画を一体として推進する場合、極めて高く評価される。その実現と成功を、ぜひとも望みたい。

2.5 CMB 偏光観測衛星 LiteBIRD

2.5.1 計画の概要

インフレーション宇宙理論は熱いビッグバン以前を記述する最も有力な理論であり、原始重力波の存在を预言する。その検証は人類に課せられた最大の知的挑戦である。原始重力波は、宇宙マイクロ波背景放射（CMB）の偏光分布に渦状のパターン（原始 B モード）を刻印する。本計画の主目的は、CMB 偏光を全天で精密観測し、原始 B モードを世界に先駆けて観測し、代表的インフレーション宇宙理論を完全に検証することである。小型望遠鏡、超低温冷却系、多色超伝導検出器アレイを搭載し、二年間の観測を行う。JAXA のロケットによる打ち上げを前提とする。宇宙論研究の中心としての Kavli IPMU、衛星開発・試験・打ち上げの中心としての JAXA、地上 CMB 観測の実績を有し、要素技術開発を推進する KEK の三機関をはじめ、国立天文台、カリフォルニア大学バークレー校など、国内外の研究者のネットワークを構築して推進する。POLARBEAR 等の地上観測プロジェクトで相補的な科学成果を出しつつ技術実証を行うのも計画の大きな特長である。本計画は、推薦を受けて、学術大型研究計画マスタープランへ提案された。

2.5.2 科学的意義

1. 宇宙論：代表的インフレーションモデルが预言する原始重力波強度の下限（テンソル・スカラー比 $r = 0.002$ ）まで探索できる。（図 2.6 参照）検出すればインフレーションのエネルギースケールに関する情報が得られる。検出されない場合も代表的モデルが棄却され、意義の高い結果となる。他の観測との相乗効果により各インフレーションモデルの有意性をよく検証出来る。予期せぬ発見により宇宙に始まりがあるというパラダイムそのものが変更を迫られる可能性すらある。
2. 素粒子論：量子重力理論（超弦理論など）は原始重力波の预言値を与えるため、原始重力波の検出は、これらの究極理論候補の選別を可能とする。重力理論と量子論の統一という素粒子物理最大の目標に対して大きな意義を持つ。
3. 天文学：銀河磁場の構造・起源の解明、星間塵の組成及び整列機構の解明、宇宙再電離史の詳細と再電離機構の解明、銀河ヘイズ起源解明、超高精度ミリ波サブミリ波偏光全天探査によるセレンディピタスな発見などが期待される。

2.5.3 所要経費

初期投資に約 15 億円（超伝導検出器作成装置群や冷凍機システムの導入など）、開発費に約 50 億円、運営費に約 5 億円（人件費含む）、合計約 70 億円を想定している。ただし、打ち上げ費用は、打ち上げ形態に大きく依存するため、ここには含めない。開発費の内約 25 億円は、小型科学衛星標準バスシステムを利用したシステムバス部の開発・制作費を想定している。残りの約 25 億円は、主にミッション部（冷却系を含む観測機器）のプロトフライトモデルの製作費を想定している。バス部の新規開発要素の可能性も含め、より精度の高い予算見積もりを実施予定である。本見積もりでは考慮していないが、開発費のうち相当分を国際協力により調達することが期待できる。

2.5.4 年次計画

平成 25 年度～：要素技術開発と地上実証実験を推進する。ミッション定義審査を経て、システム実現可能性の検討を行い、システム要求書・仕様書、プロジェクト計画書をまとめる。

平成 27 年度～：基本設計審査を経て詳細設計を行い、エンジニアリングモデルの製作・試験を行い、設計を確定する。

平成 29 年度～：詳細設計審査を経て、システム機器の製作、インテグレーション、試験を行う。

平成 32 年度：打ち上げ移行前審査を経て衛星を打ち上げる。

平成 33 年度～：初期運用、観測機器調整、性能確認を経て、本格的観測を実施する。

平成 35 年度～：観測機器の較正を完了し、高いレベルでのデータの正当性のチェックを進めていく。

平成 37 年度：原始重力波の探索に関する最終結果を発表する。データの公開をおこなう。

備考：平成 26 年度以降は、ミッション提案機会の有無、予算確保状況等、プログラムレベルの不確定性があり、それに応じて年次計画は異なるが、最も早く実現する場合を衛星開発のフェーズに従って述べた。

2.5.5 実施体制

国内実施体制

JAXA がプロジェクトマネジメント、全体設計・開発、実証試験、打ち上げ、運用を担当し、衛星打ち上げの中心となる。Kavli IPMU がデータ解析パイプラインの構築、データ解析、キャリブレーションを主導し、KEK および国立天文台が地上観測での技術実証、ミッション部設計・開発・試験を担当する。その他理化学研究所、東北大学、岡山大学、大阪府立大学、横浜国立大学などの参加機関がミッション部開発、データ解析などに貢献する。

国際協力

焦点面検出器の開発にカリフォルニア大学バークレー校などの米国グループが寄与する。すでに基礎開発の予算を NASA から得ており、より多くの貢献を NASA から得ることを想定している。欧州からは WMAP に貢献した小松英一郎マックスプランク宇宙物理学研究所長が中核メンバーの 1 人として参加している。読み出しエレクトロニクスの開発に、マギル大学を中心としたカナダグループが寄与する。すでに基礎開発の予算を CSA (Canadian Space Agency) から得ており、より多くの貢献を CSA から得ることを想定している。上記に加えて参加を検討するグループが欧州、韓国にあり、プロジェクト化された場合に新しいグループの参加が見込まれる。

2.5.6 学術コミュニティの合意状況等

平成 24 年 12 月開催の宇宙電波懇談会シンポジウムにおいて、本計画は電波天文分野における高い優先度を持つ計画であるという合意を得た。平成 25 年 2 月開催の学術会議シンポジウム「天文・宇宙物理分野の将来計画」での発表を経て、学術会議物理学委員会天文学・宇宙物理学分科会において、学術大型研究計画公募に LiteBIRD 計画の提案を提出することが推薦され、マスタープランへの提案を行った（提案者は Kavli IPMU 村山機構長）。素粒子物理学（高エネルギー物理学）としても高い意義を持つため、高エネルギー物理学研究者会議が平成 24 年に出した「将来計画検討小委員会答申」においても LiteBIRD のサイエンスは重要と位置付けられた。

2.5.7 大学共同利用

本計画では宇宙論観測の最終結果発表とほぼ同時にデータを公開する予定である。データ公開のために、KEK または Kavli IPMU にデータセンターを設置し、運用する。計算機資源等は既存施設をフル活用してコストを抑える。データセンターは、データの供給元となる JAXA 宇宙科学研究所と密接な連携を持ち運用を行う。これにより、天文・宇宙・素粒子物理学の研究者がデータを広く使用できることになり、他の観測との統合した解析などが容易となる。

2.5.8 プロジェクトの現状

早い段階から JAXA ミッションデザイン支援グループと ISAS プログラムシステムズエンジニアリングオフィスから支援を受け、科学的目的の明確化、ミッション要求・システム要求へのフローダウンに十分な時間をかけた。その後システム検討、個別技術検討まで支援対象が進み、現在はミッション定義審査、システム要求審査に向けて、企業のサポートも加わり技術的成立性の検討を行っている。ミッション部観測機器については、POLARBEAR などの地上観測

プロジェクト推進が、観測機器の基礎開発となっている。さらに、国立天文台・理研・KEK・岡山大を中心として、新型超伝導検出器アレイの開発を進めている。以上の開発実績をもとに具体的設計を進めている。観測の課題の一つである前景放射とCMBの分離に関しても研究が進展している。(図2.7参照)

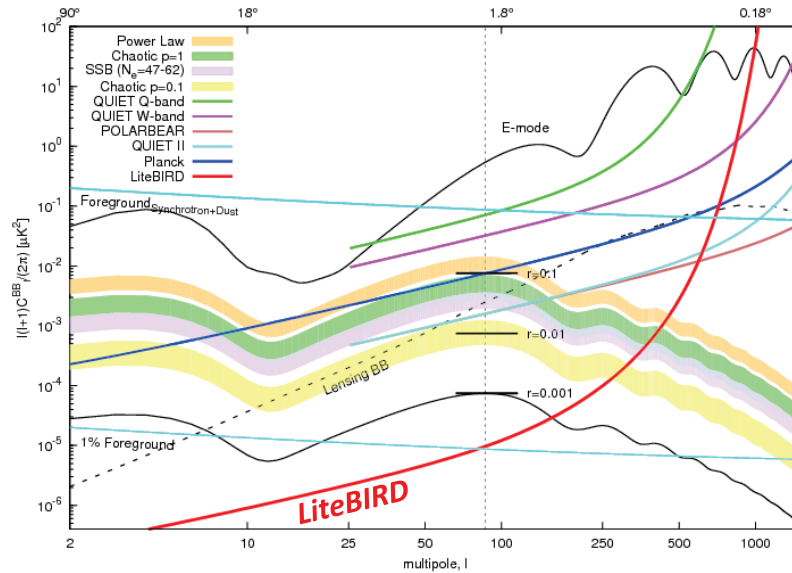


図2.6 インフレーション宇宙理論から期待される代表的なCMB偏光Bモードパワースペクトルと、LiteBIRDの感度目標曲線。参考のため、Planckや地上実験で期待される感度曲線も示す。

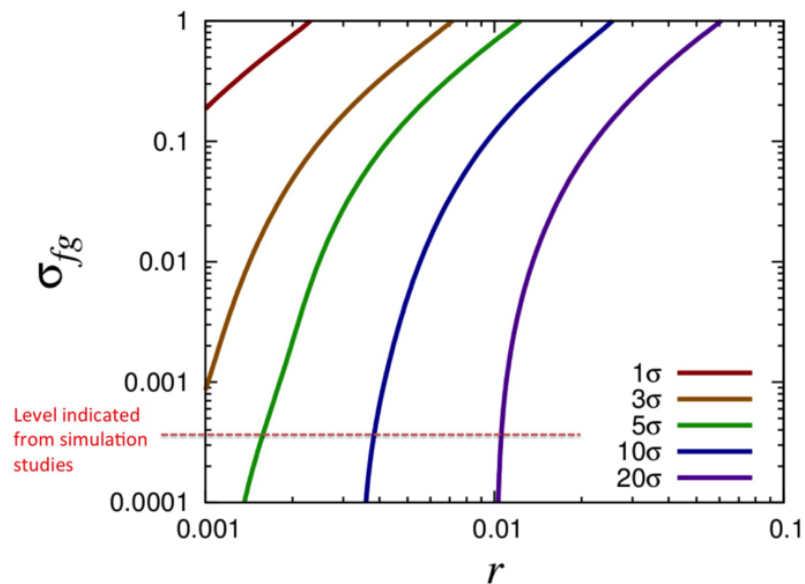


図2.7 LiteBIRDで期待される原始重力波発見の有意度をテンソル・スカラー比の値(横軸)とパワースペクトルにおける残留前景放射成分の割合(縦軸)の二次元上にあらわした図。シミュレーションによる残留前景放射の見積もりレベル(鎖線)は、前景放射を考慮しても、十分な余裕を保有してフルサクセスを達成できることを示している。

2.5.9 天文学・宇宙物理学分科会からのコメント

計画の学術的意義

宇宙マイクロ波背景放射の偏光観測を通じて、揺らぎの重力波モードを求めることができれば、宇宙初期の大膨張期であるインフレーションの存在を直接証明し、その機構に迫ることが可能となる。PLANCK 衛星等の最近の成果によって、宇宙論は標準モデルを確立するに至った。未だ発見されていない重力波モードは、残された最後のフロンティアであり、その世界初の発見を目指す本計画の学術的意義は宇宙論、さらには素粒子分野にとって極めて高い。

一方で、重力波モードだけではなく、一般に大スケール偏光観測によって、天文学にどのようなインパクトを与えるのか、検討を進められたい。

経費、スケジュールの妥当性

本計画は、世界に先んじて重力波モードを測定するため、当初は打ち上げ機会の多く予定されていた小型科学衛星シリーズの一つとして計画されてきた。しかし、現実的な経費の見積もりでは、小型科学衛星シリーズにはフィットしないことがわかり、また、小型科学衛星シリーズ自体の見直しも進められている。事態が流動的であることから、経費見積もりやスケジュールの妥当性については、今回は評価しない。

技術成熟度

これまで QUIET や POLARBEAR などアメリカが主導する地上実験に参加して来た経験、さらに新学術領域研究等を通じ国内の専門家を結集して新型超伝導検出器アレイなどの装置開発を進めてきたことなど、技術的成熟度は高いレベルにある。今後は、堅実な技術が求められる衛星計画に新型のアレイが実際に搭載できるのかなど、衛星計画特有の要求を満たすための検討をさらに進められたい。また、困難が予想されるのが、観測された偏光から前景放射からの寄与を取り除き、重力波モードに関係するパリティ負の B モードを取り出す部分である。WMAP や PLANCK (偏光は来年発表予定) などの経験を活かし、この部分の検討をさらに進める必要がある。

計画実施体制の妥当性

JAXA・宇宙研と KEK、国立天文台、さらに Kavli IPMU との連携に加えて大学等が参加するという実施体制は、十分に強力であり、妥当なものである。

学術コミュニティでの合意状況

電波コミュニティでは、計画の具体性や準備状況などから着実に進んでいると評価され、また ALMA や他の将来計画とは独立した新しい研究対象を切り開く計画として、中規模計画の中で最も高く評価されている。理論コミュニティからも、特にサイエンス面から計画を高く評価する声がある。

共同利用体制の妥当性

共同利用やプロポーザルに基づく運用などは計画されていないが、衛星データの公開など、コミュニティへの成果還元という点はきちんと押さえている。

総合評価

宇宙論・素粒子物理学の分野に大きなインパクトを与える成果が期待でき、また計画も着実に練り上げてきており、高く評価できる。今後は、小型科学衛星シリーズからの変更に伴う計画の再検討を早急にすすめ、また、前景放射による偏光成分の分離とそこから得られる天文学的情報についてさらに検討を行なうことが期待される。

2.6 超広視野・広帯域の大口徑ミリ波サブミリ波単一望遠鏡による暗黒宇宙の大規模構造の探査

2.6.1 計画の概要

宇宙大規模構造の骨格を描き出す「灯台」であるサブミリ波銀河を連続波と CO/[CII] 輝線で超広域に探査し、宇宙再電離期に至る時代まで、暗黒物質分布の根幹と銀河の形成・進化を描き出すとともに、スニヤエフ・ゼルドビッチ効果を利用し遠方銀河団 (大規模構造の high-mass end) の探査とその高分解能 Mapping から、銀河団の構造や形成過程の研究にブレイクスルーをもたらす。このため、口径 30–50 m 級のミリ波サブミリ波単一望遠鏡と、多波長の超広視野カメラ (ミリ波サブミリ波版の CCD カメラ) および多画素超広帯域分光装置 (ミリ波サブミリ波版多天体分光装置) 等を開発する。この望遠鏡は、NRO45m 鏡、ASTE10m 鏡の後継機として、日本の天文研究組織の基盤装置としての役割を担っており、(国外の研究機関とも連携し) 日本の大学と国立天文台が連携して実現し、2011 年より部分運用を開始した ALMA (30 年以上の運用を想定) との長期的・継続的な連携を実現するとともに、2022 年頃運用開始予定の赤外線天文衛星 SPICA やさらには TMT との連携を可能にする。また、ミリ波サブミリ波 VLBI の一局としても活用する。

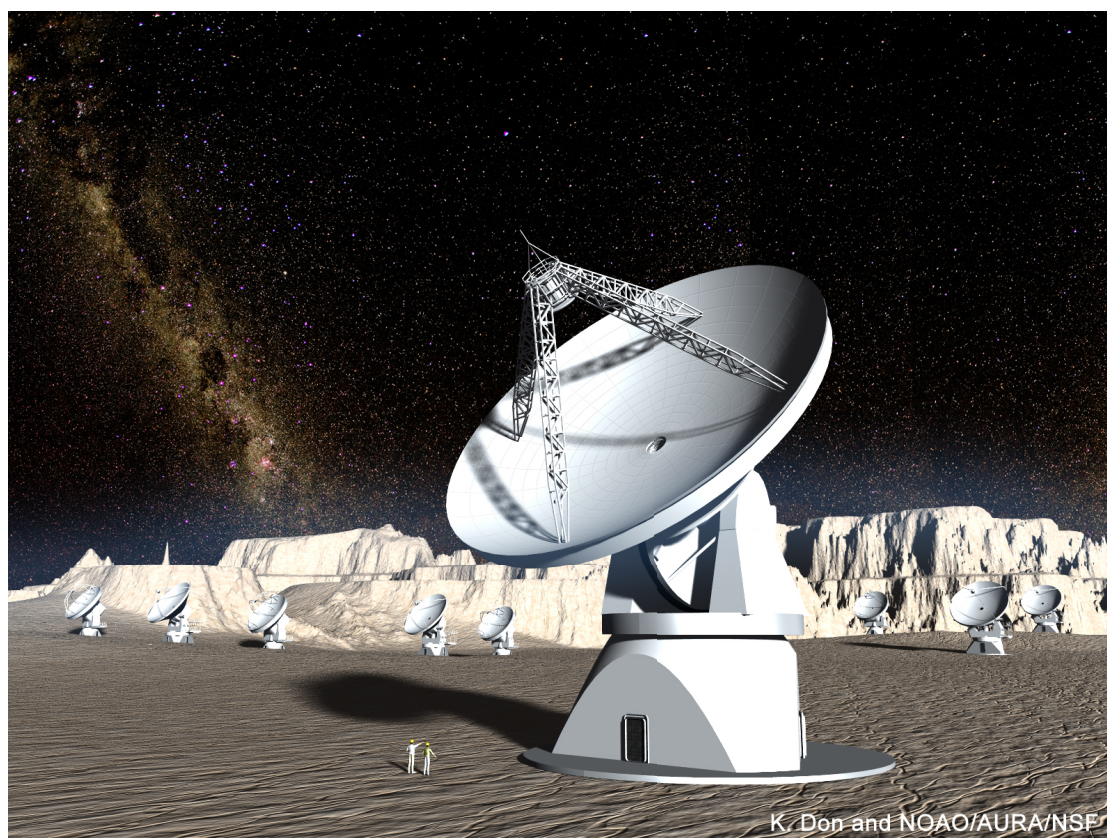


図 2.8 想像図

2.6.2 科学的意義

科学的な意義の詳細については、これまでに行った国際ワークショップ^{*1}、国内ワークショップのサイト^{*2}や、国際会議集録^{*3}などを参照されたい。

ここでは、主要なサイエンスケースを述べる。(i) ミリ波サブミリ波版 SDSS と呼ぶべき、宇宙星形成史のピークの時代 ($z = 1 - 5$) での主役となる銀河 ($\text{SFR} \geq 100 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$) の大統計サンプルを作成し、それに基づきダストに隠された銀河形成活動と巨大ブラックホール形成活動や、暗黒物質分布の根幹とそこでの銀河・銀河団の形成過程の解明を解明する。また、これらの大統計サンプルを用いて、光赤外線に比べてより遠方 ($z \geq 2$) の宇宙で redshift space distortion を調べることで、構造形成成長速度を測定し宇宙論スケールでの重力理論の検証にも挑戦する。(ii) いわゆる「前景成分」の高精度の観測 (サーベイデータを活用) から、インフレーションの証拠探しの信頼度の格段の向上をめざす。(iii) スニヤエフ・ゼルドビッチ効果を利用した高感度の銀河団探査により、現在ほとんど観測例のない $z > 1.5$ の遠方銀河団の探査が可能になり、大統計サンプルの構築が可能となる。また、階層構造の主要構成要素が銀河から銀河団スケールに移り、宇宙の星形成活動が減少に転じる $z = 2$ の銀河団の発見においても、他波長より有利である。遠方銀河団の観測は、宇宙の構造形成の high-mass end を直接捉えることになり、密度揺らぎや宇宙論パラメータを探る上で非常に大きな意味がある。また SZ 高分解能観測では、圧力分布 (ショック、総熱エネルギー) を詳細に調べることができ、銀河団の構造・質量を明らかにすることができる。(iv) 多色カメラによる近傍の星惑星系形成領域の超広域にサーベイで、星形成初期段階の天体 (ファーストコアなど) や褐色矮星の形成現場を多数発見できるだけでなく、コアの質量関数や密度構造の詳細を調べることが可能となる。また、分子雲コアから原始惑星系円盤までの数多くの天体で、ミリ波からサブミリ波までの広い周波数範囲に渡って分子輝線サーベイをおこなうことにより、分子雲コアから惑星形成までの化学進化の多様性や普遍性、さらに物理進化を暴きだすことができる。(v) VLBI 観測においては、独自の望遠鏡としての機動性と高感度性能を生かして ALMA を用いた VLBI とは相補的な高頻度モニターを実施することが可能になり、Sgr A* や M 87 などの観測から、降着円盤やジェットの本元のダイナミックな描像の解明、さらには相対論の効果の検証を行うことが可能になる。

表 2.1 Tentative Telescope Specification

Diameter	35 m (nominal; up to 50 m)
Main Freq. Range	70 — 420 GHz
Highest Freq.	up to 1 THz (limited use of antenna surface)
F.O.V.	≥ 20 arcmin. in diameter
Beam Size	6 arcsec. at 350 GHz

2.6.3 所要経費と年次計画

所要経費は、約 100 億円規模 (望遠鏡本体、および必要なインフラストラクチャー整備を含む)。基盤となる観測装置は、科研費等の競争的研究経費も獲得して基礎開発し製作を行いたいと考えている。基盤観測装置等の開発・整備費は、総額 15-20 億円規模となる見込み。望遠鏡の試運転期間や運用初期段階では、現在開発を進める多色 ASTE TES カメラ、UC パークレイ開発の次世代多色 TES アレイ、デルフト大と共同で開発する分光イメージングアレイ DESHIMA

^{*1} <http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/~ytamura/WS/WS2011/Program.html>

^{*2} <http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/~kkohno/ALMA/index.php?Workshop120929>

^{*3} Kawabe, R. et al., “A Large Millimeter and Submillimeter Telescope Project; ALMA SPICA Synergy Telescope (“ASTE-II”)”, in the proceedings of “New Trend in Radio Astronomy in the ALMA Era”, 2013.

等も活用する。2023年頃の運用開始を目指す。建設にはおよそ5年を要するため、2018年頃の建設開始を目標とする。運用期間は30年である。チリのアタカマ5000mサイトかそれと同等のサイトに設置する。

2.6.4 実施体制

国立天文台を中心に、国内の大学、さらには国外機関の参加を得て計画を推進する。分担案としては、国立天文台が、アンテナ・インフラの製造・整備の中核を担い、国内大学、国外機関が、観測装置の開発・整備を担う。基盤装置の開発製作については、既に協力を進めている米国・英国・オランダ等の国の研究機関との協力を進める。望遠鏡設置国（チリが有力）との協力も必須である。韓国・中国・台湾等の連携のほか、CCAT25m計画、LMT50m鏡とサイエンス面等で連携する可能性も検討している。

2.6.5 学術コミュニティの合意状況等

国内外の大学・研究機関の研究者による検討会合や国際ワークショップを行うとともに、宇宙電波懇談会等でも計画を紹介し議論を行ってきた。NRO45m, ASTE後を担う望遠鏡として、国内での理解が進んできている。また、国外の研究者からは、熱烈的な支持を得つつある。一方、CCAT25m鏡, LMT50m鏡などを推進するグループとも会合を持ち、どのように住み分けて共存して行くか、また科学的な連携をどのように推進するかの議論を行っている。

2.6.6 大学共同利用

科学運用は、共同利用を主体とする。その共同利用は、個別観測等の実施（これまでの共同利用）と、サーベイ観測とそのデータの共同利用の2つの種類からなると考えている。提案する望遠鏡の性格からサーベイ観測が大きな割合（50%程度）を占めると考えている。サーベイ観測のデザインは、この計画に参加する国外機関の研究者も含めて複数の「国際チーム」で立案する。サーベイデータは、優勢使用期間を設定したとしても短くし、出来る限り広く日本等の天文組織の利用されるように公開する。サーベイとしては、CO Tomography, SMG多色サーベイ、Blind [CII]サーベイ、SZ銀河団サーベイ、近傍銀河サーベイ、銀河面サーベイ、近傍星形成サーベイ、ラインサーベイ等が考えられる。

2.6.7 プロジェクトの現状

本計画は、中期計画として検討・構想を進めてきたが、各方面からのアドバイス、特に大型計画として推進すべきでは、という指摘に基づいて計画の再検討を行いつつある。さらに、コミュニティとの議論を行いながら、現実的で魅力的なプランへと発展させていきたい。

2.6.8 天文学・宇宙物理学分科会からのコメント

計画の学術的意義

宇宙初期の星形成銀河を超広視野・広帯域の大口径ミリ波・サブミリ波望遠鏡で連続波とCO/[CII]輝線で観測し大統計サンプルを作成し、宇宙初期でのダークハロー分布や大規模構造、銀河の形成・進化を解明するという計画の学術的意義は高い。観測装置についても広帯域分光装置、超広視野カメラ製作の力もありサイエンス成果が期待できる計画である。

しかし、400GHzまでが主であることや、同じサイエンスを目指す外国のミリ波・サブミリ波望遠鏡計画であるCCAT25mやLMT50m鏡計画を考慮すると規模、サイエンス面で狙いをより魅力的なものに発展させてほしい。

経費、スケジュールの妥当性

外国のミリ波・サブミリ波望遠鏡建設計画を考えると中規模計画でなく大型計画として推進すべきではないか。

技術成熟度

45m 鏡、5素子干渉計、10m サブミリ波望遠鏡 ASTE、アルマ望遠鏡を建設してきた実績がありアンテナ、広帯域分光装置、超広視野カメラの製作の力はあると思う。

計画実施体制の妥当性

国立天文台を中心に、国内、国外の大学・研究機関との協力で実施する体制はできると思われる。但し、ALMA など戦略的プロジェクトに日本がどう戦えるかが問われる時にこの計画にどれだけ力を注げるのかについても検討が必要。

学術コミュニティでの合意状況

国内外の大学・研究機関の研究者との検討会合や国際ワークショップの開催や宇宙電波懇談会等での計画紹介を行っている。同じようなサイエンスを目指す外国のミリ波・サブミリ波望遠鏡計画である CCAT25m や LMT50m 鏡計画に圧倒できるような優位性を持った計画にするよう、今後コミュニティでの議論を深めてほしい。

共同利用体制の妥当性

ミリ波サブミリ波版 SDSS を目指すとなるとサーベイ主体の望遠鏡になる可能性が高いが、共同利用（大学共同利用）が主体となるよう検討してほしい。

総合評価

電波天文学の将来計画として意義は十分認められるが、同じサイエンスを狙う外国のミリ波・サブミリ波望遠鏡計画を内容的に圧倒するような魅力的なプランへと発展させてほしい。

第 3 章

光学赤外線天文連絡会からの提案

3.1 議論のまとめ

光学赤外線天文連絡会では、年に 1 度行われるシンポジウムおよび年に 2 回の天文学会年会時に行われる総会で議論が行われ、各計画の進捗状況の報告や、分野全体での将来計画が検討されている。以下に最近 10 年間での光学赤外線天文連絡会における議論を総括する。

3.1.1 長期計画議論

2000 年頃までにすばる望遠鏡を含む主要な 8~10m 級望遠鏡が完成し、その後、世界では 30m 級超大型望遠鏡と次世代宇宙望遠鏡計画の議論が始められた。当初は各国から様々な計画が提案されたが、その規模の大きさゆえに統合・淘汰が進み、幾つかの計画は国際協力へと発展している。一方で、既存の天文台などの中小口径の望遠鏡ではサーベイやモニタ観測などに特化した使い方で特色を出し、存続を図る流れにある。

このような世界的な流れを受けて、2002 年~2009 年までの光赤天連シンポジウムでは、すばる望遠鏡の将来計画や、TMT, SPICA などの大規模計画を中心に将来計画に関するテーマで議論が行われた。この時期の前半には、サイエンス・地上望遠鏡・スペースの 3 つの班に分けて将来計画検討会が組織され、2005 年に 400 ページ超の将来計画検討報告書としてまとめられている。また、2005 年と 2006 年にはシンポジウムでの議論に関連して以下の 2 つの声明を発表している。

- 基幹大学を核とした望遠鏡計画の推進 (光天連運営委員会声明) 2005 年 1 月
- 地上 30m 級光学赤外線望遠鏡計画の推進について (光天連声明) 2006 年 11 月

これらの詳細はいずれも光赤天連ホームページ (<http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/gopira/>) にて公開されている。この時期の後半である 2007 年から 2009 年にかけては、TMT, SPICA を中心とするより具体的な議論を重ね、これらの計画は日本の光赤外コミュニティの「ロードマップにおける地上・上空での 2 本柱」として広く認められるに至った。現在、日本は TMT へは 1/4 の寄与を目標として参加し、SPICA では日本が中心となって、より国際協力を強化する方向で実現に向けて進められている。光赤天連では、2008 年より SPICA タスクフォースを設けているほか、コミュニティの総意として以下の声明を発表して、これを支援している。

- 次世代赤外線天文衛星 SPICA の推進 (光赤天連声明) 2013 年 6 月

大型計画に関する方向性が定まった後、2010 年と 2011 年のシンポジウムでは将来計画に関する議論から少し離れ、アーカイブデータや既存の施設の活用に関する議論が行われた。これに関連して、光赤天連運営委員会より以下の声明を発表した。

- 大学における研究教育基盤の整備 (光赤天連運営委員会声明) 2012 年 6 月

2012 年以降は学術会議での中規模計画取りまとめの動きを受けて、従来の大規模計画に関する議論に加えて中規模計画に関する議論の機会を増やし、2005 年にまとめた将来計画検討報告書の見直し・改訂を行う方向で進められている。これまでに議論が行われた大規模・中規模計画のリスト (運用開始予定年度順) は以下の通りである。

計画名	規模	国内中核研究機関	運用開始予定年度
京都大学 3.8m 新技術望遠鏡計画	中規模	京都大学	2016 年
Prime Focus Spectrograph	中規模	IPMU	2017 年
東大アタカマ天文台 (TAO) 計画	中規模	東京大学	2017 年
小型 JASMINE	中規模	国立天文台	2019 年頃
WISH	大規模	東北大学/国立天文台/JAXA	2019 年
すばる望遠鏡次世代補償光学システム	中規模	国立天文台	2020 年
Euclid	中規模	—	2020 年
TMT	大規模	国立天文台	2021 年
南極中口径赤外線望遠鏡計画	中規模	東北大学	2021 年頃
SPICA	大規模	JAXA	2022 年
地球型系外惑星と生命の探査 (SEIT)	中規模	国立天文台/京都大学	2025 年以前
WFIRST	中規模	—	2025 年頃
JTPF	大規模	国立天文台	2028 年
広島大学東アジア天文台計画	中規模	広島大学	未定 (※)

※ 広島大学は東大 2m 望遠鏡移設計画 (SGMAP プロジェクト) を先に進める予定

ここに掲げられた中規模計画は、どれも大型計画ではカバーできないサイエンスを持ち、技術開発や人材育成の面においても各研究機関レベルで進められる規模にあることから、中央集中ではなくコミュニティの基盤を支える役割を果たすものである。一方で、大型計画実現のためには、これらの基盤で養われた人材を国立天文台や JAXA などに集中させ、より高度な開発体制を整える必要がある。現在、日本にはすばる以外に大きな特色を持つ光赤外の施設がなく、すばる以外では他の分野との連携機会が少ないが、これらの中規模計画が推進されれば、連携機会が増え日本の天文学全体がより活性化すると予想される。

3.1.2 中規模計画議論の経緯

上述のように、中規模計画に関する議論はこれまでも大規模計画と併せて、光赤天連シンポジウムで議論されており、各グループがそれぞれの計画に関する状況報告を行い、コミュニティからの意見を受け取るという形で進められてきた。特に 2004 年のシンポジウムでは大学の活性化をテーマとして中規模計画を中心に議論が行われ、翌年にはこれを受けて運営委員会声明という形で、基幹大学の望遠鏡計画の重要性を関係機関に働きかけている。同様な内容の運営委員会声明は東日本震災の影響で遅れたものの 2012 年 6 月にも発表しており、大学の研究基盤を築く中規模計画の重要性を再度訴えるものとなっている。

学術会議より中規模計画に関する検討と推薦の依頼を受けた 2012 年後半には、初の試みとしてコミュニティ内で評価委員会を組織し、各中規模計画に関する評価を以下の流れで行った。

1. シンポジウムで評価の方法に関して議論し方針を決定
2. 7 名の評価委員会を組織し、光赤天連総会で承認を受ける

3. 関係する各グループに 9 ページの提案書を依頼
4. TV 会議多局ネットワーク上での公開ヒアリング
5. 評価委員会で議論し評価結果としてまとめる
6. 運営委員会で確認後、コミュニティ内でのパブリックコメント調査を経て学術会議に返答

上記評価作業に関する状況はほぼリアルタイムで Web 上で公開され、公開ヒアリングの資料や議論メモに関しても閲覧できるようにして進められた。これまで、光赤外ではコミュニティとしてこれらの中規模計画に対し優先順位を議論することはせず、自由競争で進められてきたため、評価委員会でもサイエンスとしての優劣は評価が難しく、各計画の進捗状況や実現可能性、コミュニティ内での認知度や人材育成への寄与を中心に議論が行われた。評価結果は以下の通りとなった。

計画名	評価結果 (※)	備考
京都大学 3.8m 新技術望遠鏡計画	SSS	
東大アタカマ天文台 (TAO) 計画	SAS	大型計画の規模
すばる望遠鏡次世代補償光学システム	SAS	大型計画の規模
小型 JASMINE	SAS	大型計画の規模
南極中口径赤外線望遠鏡計画	SAS	極地研主導で電波と合同
Prime Focus Spectrograph	SAS	国際協力によるプロジェクト
地球型系外惑星と生命の探査 (SEIT)	—	TMT 計画の予算で進めるべきもの
広島大学東アジア天文台計画	—	評価には時期尚早
Euclid/WFIRST 計画	—	評価には時期尚早

※評価結果は、学術的評価/緊急性/各分野での検討 の順

3.1.3 大規模計画との関係

以下に、評価された 6 計画と大規模計画との関係をまとめる。

計画名	大規模計画との関係
京都大学 3.8m 新技術望遠鏡計画	TMT: 人材供給、分割鏡での補償光学技術開発 ALMA: 惑星系・原始惑星円盤研究で相補的
東大アタカマ天文台 (TAO) 計画	ALMA: フォローアップや観測天体供給 すばる: 望遠鏡時間の不足を補う、南天をカバー TMT/SPICA: 観測天体供給
すばる望遠鏡次世代補償光学システム	TMT: 観測天体供給、補償光学技術開発、人材育成
小型 JASMINE	Gaia: 観測領域や観測周期などの点で相補的 WISH/SPICA: 人材育成
南極中口径赤外線望遠鏡計画	人材育成にはなるが、大型計画とは一線を画するもの
Prime Focus Spectrograph	TMT ほか: 観測天体供給 LSST: フォローアップ

天文学は、同じく知の極限を追究する学問である素粒子物理学とは対照的で、一極集中型の実験・計測によって切り拓かれるものではなく、様々な事象の観測に基づいた多様な構成要素の上に成り立つ学問である。その対象は、もちろん

観測限界が広がる際にはその新たな領域に多く存在するが、突然出現するものや、まだ調査されていない天域から発見されるものも非常に多く存在する。このため、観測手段・手法は多岐にわたり、観測時間や視野の限られた巨大望遠鏡計画を中心に、観測対象が異なる「相補的」な計画や、巨大望遠鏡の時間を有効に活用するための「連携的」な計画などをバランス良く進めることが重要である。しかし、現実的には地方の研究機関が TMT や SPICA などの大型計画に直接かかわることは、開発環境や教育面から考えて困難であるのが現状で、今後、これらの大型計画をどのような体制で全国規模で支援し、推進していくかは検討を重ねる必要がある。

3.2 京都大学 3.8m 新技術望遠鏡

岡山に口径 3.8m の先端的望遠鏡を建設することにより、これまで 1.88m 望遠鏡が果たしてきた役割を発展的に引き継ぎつつ大学による天文学研究・教育の強力な拠点を立ち上げる計画である。

3.2.1 計画の概要

国立天文台岡山天体物理観測所構内に、口径 3.8m の新技術光学赤外線望遠鏡を建設する。主鏡は国内初の分割鏡で、可視近赤外では世界初の花びら形である。その分割主鏡を超精密研削技術と独自開発の CGH 干渉計を駆使して製作する。加えて軽量コンパクトな架台を開発し、次世代の超大型望遠鏡や南極等の極地への建設のために必要な基礎技術を実験開発する。

また、中口径の機動性と占有性を活かし、ガンマ線バースト等の突発天体・新技術補償光学を用いた系外惑星の直接撮像・スーパーフレア等の特色ある研究を推進する。さらに、国内の大学による利用にも供し、これらを通じて日本の大学での研究・教育・人材育成の基盤的拠点とする。

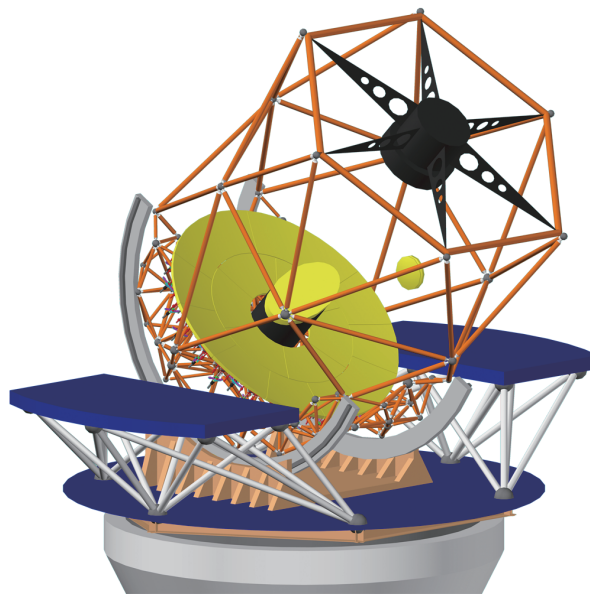


図 3.1 京大岡山 3.8m 新技術光学赤外線望遠鏡の完成予想図。

3.2.2 科学的意義

観測研究課題として京大グループで重点を置いているものは、主としてこの望遠鏡の機動性、占有性、経度を活かしたものである。

・ガンマ線バースト、超新星、激変星、X線新星等の突発天体現象

これらの代表的な突発天体現象（激変天体現象）の多くは高密度天体（白色矮星、中性子星、ブラックホール）に落ち込むガスが明るく光り、観測されるものである。このような突発天体現象の研究は、相対論的天体の物理的理解において大きな意義がある。これは現在進行中の大学間連携での観測の中核ともなる。また、これらの中にはガンマ線バーストや超新星のように重力波源の候補もあり、その可視光対応天体の観測に貢献できる。さらに、時間軸にも重点を置いた撮像サーベイが世界的に行われるため、東アジアにおいてそのフォローアップを行うことは、新たなパラメータ空間での天文学を拓く可能性がある。

・系外惑星の直接撮像観測

太陽系外惑星の研究では、すでに存在が明らかになった惑星を分光観測しその性質を明らかにすることや、さらに主星に近い領域で新たな惑星を直接撮像していくことが次なる目標であり、そのためにはすぐれた Inner Working Angle (IWA; 主星のどれだけ近傍まで高いコントラストで観測できるか) を備えた観測装置を、豊富な観測時間が得られる望遠鏡に搭載することが重要である。ここでは、新技術の Adaptive Optics (ExAO) を開発して上記の目標を達するとともに、TMT 等のセグメント望遠鏡に対する観測機器の基礎開発とする。

・太陽型恒星のスーパーフレア現象の解明

太陽に似た星の活動性を調べるため、ケプラー衛星のデータを精査したところ、約 150 個の星でスーパーフレア (太陽で観測された史上最大のフレアの 10 倍以上のエネルギー規模のフレア) を発見し、さらにべき乗則から、最大級の太陽フレアの 100 倍のエネルギーのフレアが 800 年に 1 度の頻度で起こることが示唆された。スーパーフレア星の性質と活動性の変化を明らかにするために、長期的な占有時間で、可視光高分散分光観測によって系統的な探査と継続的なモニター観測を行うことが重要である。また、こういった分光観測装置によって、現在岡山 188cm 望遠鏡で行われているドップラー方式での系外惑星探査を継続しさらに発展させることができる。

これら以外にも、共同利用を行う大学等の研究者とともに学外メンバーを含めた科学委員会を組織して、コミュニティとして整合性のある研究計画を作り上げていく。

3.2.3 所要経費

主鏡部 100、副鏡部 25、第三鏡部 25、方位軸等 80、その他 100 百万円として、望遠鏡 計 3.3 億円を見積もっている。さらに付帯装置や観測装置の一部として 2 億円、ドーム観測棟として 4 億円を想定している。

3.2.4 年次計画

光学系製作 (主鏡製作・副鏡製作・第三鏡製作) が 18 か月、望遠鏡架台の初期設計は完了、詳細設計に 18 か月、製作に 6 か月、ドームの初期設計・詳細設計に 9 か月、建設に 6 か月。上記の後、数か月の試験観測期を経て通常観測へと進む。後述のように H26 年度の概算要求が認められれば、2015(H27) 年度の試験観測開始 (ファーストライト) を計画している。

3.2.5 実施体制

国内実施体制

京都大学大学院理学研究科の物理学・宇宙物理学専攻が中心である (宇宙物理学教室、附属天文台)。ナノオプトクスエナジー社の資金援助を基に、国立天文台岡山天体物理観測所がサイト関係の、名古屋大学光赤外天文計測学講座が種々の計測関係を担当して、プロジェクトが開始された。

国際協力

本計画は特に国際協力をうたっているものではないが、東アジアの各国を中心としてこの望遠鏡の技術や製作方法への関心はきわめて高く、積極的な協力を行なっていくとともに、従来の岡山天体物理観測所での観測等を通じて育まれてきた国際共同研究の発展にも寄与していく。

3.2.6 学術コミュニティの合意状況等

本計画の発端は、1990年代半ばにさかのぼる。当時すばる望遠鏡の建設が開始され、すばる時代に国内での光赤外分野での観測的研究や機器開発、教育・人材育成をどうしていくのかというコミュニティでの活発な議論がベースにある。国立天文台に諮問委員会がおかれ、今後も各大学での研究・教育を推進し、すばるを支えていくためには国内に中規模の望遠鏡を設置することが望ましいという答申が出た。しかし、このような事業の推進は国立天文台として行うことは難しく、大学がその役割を担うべきであるという空気が漂っていた。当時の国内最大の観測施設である岡山天体物理観測所のヘビーユーザーは京都大学であり、また地理的要因もあってか、京都大学でこのような役割を果たすべきであるという意見もあった。このような中で、1998年11月頃から本計画が京大で本格的に議論されるようになった。

これに対し、2001年5月に学術会議天文学研究連絡会（天文研連）の会議において特別議事録「岡山天体物理観測所の将来計画について」、2003年4月に特別議事録「大学における光赤外線観測天文学の研究基盤の強化について」、2005年5月に特別議事録「大学における光赤外線観測天文学の推進について」が発表され、新技術望遠鏡計画の早期実現が強く望まれるとの表明がなされてきた。

コミュニティでの議論としては、2000年8月の岡山新天文台シンポジウムから始まり、2001年から毎年の岡山ユーザーズミーティングや、2003年からの数々の光赤天連シンポジウムで議論してきた。それらでは、この望遠鏡によるサイエンスの提案、望遠鏡開発への要望や提案、観測装置の提案、運用方針などの議論を積み重ねている。2013年3月には京都大学理学研究科と国立天文台との間で研究教育協力に関する覚書が取り交わされている。

3.2.7 大学共同利用

上記の覚書では、本望遠鏡の完成後はその全観測時間の少なくない相当部分を全国大学共同利用に供し、日本における観測天文学のより一層の推進をはかることに合意がなされ、全国大学共同利用の推進にあたっては、国立天文台がこの責務を果たすこととしている。

具体的には、年間観測時間の半分は、国内の大学と国立天文台に割り当てる予定である。現在推進中の大学間連携に参加している大学・国立天文台を中心とした共同運用を目指し、大学間連携ネットワークの中核となる。

3.2.8 プロジェクトの現状

初期設計段階を終えつつあり、今年度中には技術的課題をほぼすべてクリアする予定である。京都大学から文部科学省へとH26年度概算要求が出されている。

昨年度には専門家による外部評価において「日本の天文学分野として支援を強めぜひとも早期の実現を期すべき中型計画である」との高い評価とともに、建設体制と協力体制に対する助言をいただき、特に後者では、分野研究者の参加による科学委員会の設置が緊急かつ重要なものとされた。これを受けて、繰り返してのサイエンス・装置ワークショップ等を通じて議論を深めることを開始している。

3.2.9 天文学・宇宙物理学分科会からのコメント

学術的意義

本計画の第一の目的は、将来の大望遠鏡計画に応用・発展できるような新技術を開発し実証することである（詳細は後述）。この点において、本計画は世界的にユニークであり価値が極めて高い。また、特定の研究分野や研究テーマの進展を主目的とする計画ではないが、搭載予定観測装置にもユニークなものがあり、価値ある観測研究ができる可能性、あるいは新観測技術の開発・実証に大きく貢献する可能性が十分に認められる。

経費、スケジュールの妥当性

本計画は民間からの寄付によってスタートし、基礎開発が進められた。現在、建設のための経費を概算要求中^{*1}である。取り入れられた新技術の多くは、ほぼ目処がついている段階である。2015年のファーストライトを目指している建設スケジュールについては、新技術が多いことを考慮すると楽観的過ぎる心配がある。

技術成熟度

個別技術として最も重要なものは、新しい鏡面創成技術であろう。全数の研磨を終えるまでにはまだ相当の期間が必要であろう。次に重要なのが各分割鏡の位置・姿勢制御である。センサーとアクチュエーターの開発は完了したとしても、環境が架台の剛性に依存することもあり、実際に十分高い精度で安定的に制御できるためには、相当の作業期間を要すると考えられる。望遠鏡の軽量架台については実スケールでの実証が速やかにすすめる必要がある。

計画実施体制の妥当性

推進主体は京都大学であり、十分な体制を構築できる環境にある。新技術を多く取り入れていることを考慮すれば、技術開発力の高いスタッフをより一層強化すべきである。学内での支援体制は整っている。また国立天文台との間で岡山観測所への設置、および全国共同利用方式に関する覚書が締結され、観測運用の枠組みが定まった。

学術コミュニティでの合意状況

光赤天連においては長年にわたって議論され、推進の決議、支援の表明が繰り返されてきた。TMT、SPICA、TAO、すばる次期装置などとの関係については、将来の可能性を拓く新技術望遠鏡として、ユニークな位置づけがなされている。学術会議天文宇宙分科会においても、大学の研究プロジェクトとして推進すべき計画であると認められた。

共同利用体制の妥当性

本計画は京都大学が主体となって進めるものであるが、天文学的研究あるいは観測装置開発に関しては国内諸大学・機関からの参加・貢献が期待される。本運用時には約半分の観測時間を全国共同利用に供することが表明されており、国立天文台が共同利用を支援することで効果的な運用が期待される。

総合評価

本計画の最大の特長は、多くの新技術を実際に取り入れることにある。成功した新技術は将来のより大型の望遠鏡、あるいは高性能の観測装置を実現するための確固たる基盤になるとともに、観測技術開発分野の研究成果・技術を持つ研究者を育成する場としてきわめて重要である。新しい研究分野を新しい技術で切開いて行くという研究姿勢・風土が醸成されれば大成功といえるのではないか。もちろん国内の光赤外望遠鏡としては最大であるので、突発現象、系外惑星トランジットなどの価値の高い研究成果も十分に期待される。京都大学をはじめとする責任機関と参加研究者がこれらの独自性や価値を十分に理解し、強力に推進することが望まれる。

^{*1} 平成25年度補正予算政府原案に採択

3.3 南極赤外線望遠鏡計画

3.3.1 計画の概要

南極内陸にある国立極地研究所のドームふじ基地に 2.5m 赤外線望遠鏡を建設し、筑波大学の 10m テラヘルツ望遠鏡と連携して、high-z にあるダスト銀河 (テラヘルツ銀河) の広域探査によって銀河創生期における星生成活動の解明を行う。さらに南極の利点を生かして太陽系惑星の大気構造の研究、スーパーアースなど系外惑星での水蒸気大気の発見などを行う。本設備は大学の基盤装置として、南極での独創的なサイエンスの開拓、教育・研究を通じての人材の育成、装置開発、国内外の研究者との共同研究、極地科学・工学とのシナジーなども推進する。

3.3.2 科学的意義

南極の口径 2.5m の望遠鏡は南極の好条件によって、近赤外線での撮像性能ではすばる望遠鏡とほぼ同等の性能を発揮する。また、最近のサイト調査からシーイングが可視光で 0.2" であることが判明した。波長 $1.2\mu\text{m}$ より長波長で回折限界となり、ハッブル望遠鏡なみの解像度が得られる。上空大気の水蒸気量が極端に少なく、安定した大気、高い快晴率、極夜における連続 5 ヶ月間の連続観測などで、独創的な研究が可能となる。赤外線撮像装置を用いた high-z におけるテラヘルツ銀河の銀河の広域探査と星生成の解明を行う。発見された銀河は ALMA や TMT による詳細観測のためのターゲットとなる。低分散多天体分光でのトランジット観測によりスーパーアースの水蒸気大気などの研究を行う。極夜には複数の惑星を持つ近傍の星の連続観測が可能である。10 μm でのヘテロダイン分光器を用いて金星などの連続観測により太陽系惑星の大気循環の解明を行う。その他、長周期変光星の観測、高光度赤外線銀河 (LIRG) における II 型超新星探査、GRB や重力マイクロレンズのモニター観測への参加、将来の赤外線観測技術と干渉計技術開発にも資する。

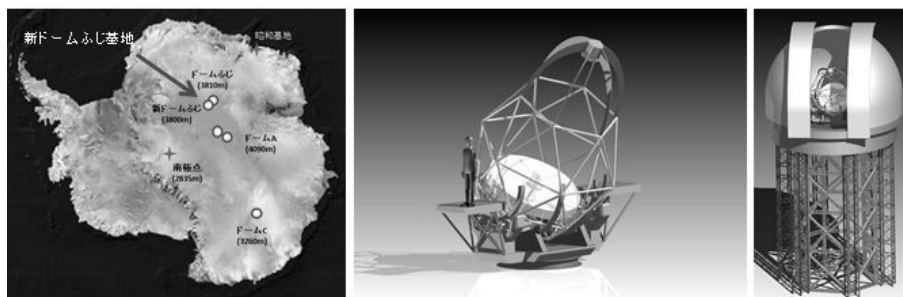


図 3.2 南極内陸における現在の天文基地と超軽量 2.5m 南極赤外線望遠鏡

3.3.3 所要経費

口径 2.5m 赤外線望遠鏡は岡山 3.8m 望遠鏡架台の技術を用いて 4 億円以下で製作する。さらに、3 色赤外線カメラ (低分散簡易多天体機能付き) に 1 億円が必要である。その他に、望遠鏡ステージ、エンクロージャの経費が必要で、総額約 7 億円である。ドームふじ基地への運送や現地での組み上げなどの予算については今後極地研と検討を進める。

3.3.4 年次計画

建設開始から 3 年で望遠鏡と観測装置を製作する。望遠鏡は東北大学構内に設置し、1 年間の試験観測を行う。日本から細い通信回線を使ってリモートで観測を行うことになるので、十分なテストが必要である。南極移設には 2 年間で

要する。現在、第8期南極地域観測事業(2010-2015)が進行中であるが、ここ2年間、昭和基地周辺の氷が厚く、砕氷船しらせが接岸できない状況が続いているため、南極観測事業の縮小と遅れを余儀なくされている。物資等を搬入できない状況なので、望遠鏡計画の遅れも懸念されている。また、新ドームふじ基地建設後に望遠鏡を設置することになるので、ファーストライトは早くても7年後、2020年となる。

3.3.5 実施体制

国内実施体制

赤外線望遠鏡は東北大学理学研究科(天文学専攻、惑星プラズマ・大気研究センター、地球物理学専攻・地球物理学・惑星大気物理分野)、工学研究科(宇宙探査工学分野、地域環境計画分野)が筑波大学、国立極地研究所(極地工学グループ)、南極天文コンソーシアムの協力の下に推進する。理学研究科においては望遠鏡と赤外線観測装置の製作、工学研究科においては極限環境における設営、リモート制御と観測、モニター技術の開発を行う。極地研は安全な運送と雪面上に大型装置を設置する技術の開発と現地での建設を担当する。建設後はテラヘルツグループと共同して天文越冬隊員を派遣し、研究課題を推進する。

国際協力

現在、ドームふじ基地でオーストラリア・ニューサウスウェールズ大学と共同で、自動発電装置と大気擾乱観測装置、全天カメラなどを運用している。また、SCARには南極天文委員会(Astronomy and Astrophysics from Antarctica)が組織され、東北大学から委員を派遣している。この組織を通じて情報交換を行いながら、欧米、中国との具体的な科学協力について検討中である。

3.3.6 学術コミュニティの合意状況等

2005年に赤外、電波グループ、極地研を中心にして「南極天文学コンソーシアム」(代表 中井)を結成し、協力して計画を推進してきた。「南極における赤外線・テラヘルツ天文学の開拓」は極地研の第8期南極地域観測事業(2010-2015)に採択され、第52~54(2010/2013)の南極地域観測隊として赤外線グループから南極での設営に参加した。本計画は宇電懇および光赤天連の公開ヒアリングで発表され、いずれからも高い評価を得た。それぞれのコミュニティから天文学宇宙物理学分科会に推薦された。その後、学術会議公開シンポジウムで発表した結果、マスタープランとして推薦を受け、筑波大学学長を代表者として日本学術会議マスタープラン「学術大型研究計画」に応募した。また極地研が応募したマスタープラン「極域科学フロンティア」計画においても、ドームふじ基地における天文学観測の重要性が謳われている。

3.3.7 大学共同利用

南極内陸という極めて過酷な環境にあるので、現地での負担をできる限り少なくするために2-3年間装置交換は行わず、プロジェクト観測、リモート観測、スケジュール観測を行う。一部共同利用にも供するが、ドームふじ基地の状況を鑑みながら運用方法については検討していく。また、一定期間後、新しい装置への交換も予定しており、装置の提案も歓迎する。

3.3.8 プロジェクトの現状

東北大学と筑波大学の連携プロジェクトとしてそれぞれから特別設備費として平成26年度(5年計画)の概算要求を提出した。

3.3.9 天文学・宇宙物理学分科会からのコメント

本計画については、南極テラヘルツ望遠鏡の項で、まとめて議論する。

3.4 すばる望遠鏡 次世代広視野補償光学システム

3.4.1 計画の概要

すばる望遠鏡 広視野補償光学システム計画 (ULTIMATE-SUBARU: Ultra-wide-field Laser Tomographic Imager and MOS with AO for Transcendent Exploration by SUBARU Telescope) は、広い視野にわたって像質を大幅に改善することを可能にする地表層補償光学系と、これに対応した近赤外線広視野観測装置をすばる望遠鏡に導入することにより、ハッブル宇宙望遠鏡に匹敵する高い解像度と望遠鏡口径 2 倍に相当する高感度化、そして従来の 6 倍の広視野を実現するものである。

地表層補償光学系では、可変副鏡と複数のレーザーガイド星、波面センサによる大気ゆらぎの高度なモデル化によって、視野全体にわたり従来の約 2 倍の解像度を達成することを可能にする。可視光の長波長側 ($> 0.6\mu\text{m}$) から中間赤外線に至るまで、全体的に解像度が向上するため、カセグレン焦点に搭載するあらゆる装置の高感度、高解像度化が達成されるが、特に地表層補償光学系の性能を十分に活かす新たな近赤外線撮像・多天体分光装置を開発することで、視野約 13 分角で高い解像度をもつ観測が可能になる。装置の基本仕様を表 3.1 と表 3.2 にまとめた。

主に可視光で類をみない広視野撮像、多天体分光を実現する Hyper Supreme-Cam (HSC)、Prime Focus Spectrograph (PFS) と共に、2020 年代の すばる望遠鏡の基幹装置として位置づけるもので、観測時間のおよそ半分を占める月が明るい時間を担う近赤外線装置計画であり、Thirty Meter Telescope (TMT) へのサンプル供給を通じて、TMT とすばるとの役割の明確化と密接な連携を図るものである。

仕様項目	仕様内容
可変形鏡	副鏡 (1000 素子程度)
波面センサー	シャックハルトマン式 (100~1000 分割程度)
ガイド星	レーザーガイド星 (4 個)、自然星 (3 個)
レーザータイプ	ファイバーレーザー
レーザー出力	20W
レーザー射出ビーム径	約 25cm

表 3.1 地表層補償光学系の基本仕様

仕様項目	仕様内容
波長域	0.9 ~ 2.5 μm
視野	約 13 分角四方
プレートスケール	0.1 秒角/ピクセル
撮像用フィルター	狭帯域、広帯域
分光方式	多天体スリット分光
波長分散	2000~3000 程度

表 3.2 赤外線装置の基本仕様

3.4.2 科学的意義

すばる望遠鏡の新たな基幹装置として運用するものであり、様々な分野において新たなサイエンスの展開が期待できるが、特に以下の二つをキーサイエンスとして掲げる。これらについては、すばる望遠鏡の観測時間を集中的に投入する「戦略枠プログラム」を実施して、人類の遺産と呼べる規模の科学的成果を達成する。

- 大規模撮像・分光サーベイによる銀河進化史の全貌解明

宇宙における星形成活動の最盛期の銀河を広視野を活かして従来の 10 倍以上の規模で観測し、形態、力学構造、化学進化、活動銀河核形成などの詳細調査によって銀河の進化過程を明らかにする。具体的には、赤方偏移 1 から 3 の銀河を 2,000 個程度観測する。明るさ・質量、星形成量、ガス/星質量比など様々なパラメータの広い範囲の銀河を観測し、統計的精度を飛躍的に高めることで、銀河進化において何が決定的な要素であるかを明らかにする。

- 高感度狭帯域撮像による最遠方銀河探査

近赤外線での高感度観測によって赤方偏移 7.5 以遠の星形成銀河を検出し、最初期の銀河形成とそれが引き起こした宇宙再電離過程を探究する。具体的には、地球大気夜光のない波長域の狭帯域フィルタによって非常に深い撮像観測を行うことで最遠方銀河候補を発見する。10 視野程度を観測することで、赤方偏移 8 の銀河を 40 個程度、赤方偏移 10 の銀河を 5 個程度発見できると期待される。視野の狭い TMT の装置では、分光観測ができる明るい最遠方銀河候補は発見できない。すばるがサンプルを供給し、距離の確定と詳細観測を TMT で行う、という連携により、すばるのこれまでの成果をさらに発展させる。

このほか、高い空間解像力と広い視野を活かした研究提案として、銀河系や近傍銀河の恒星種族を分解して観測し、その形成史を探る「銀河考古学」や、銀河系中心部を、従来の補償光学系よりもはるかに広い視野で、数年にわたりモニタ観測し、銀河系の恒星種族と超巨大ブラックホールの形成との関連を明らかにする研究などが提案されている。

3.4.3 所要経費

地表層補償光学系・観測装置の暫定的な基本仕様をもとに、開発経費の見積りを進めている。過去の実績、他プロジェクトの情報、製造メーカーとの初期的な交渉などをベースに、現時点での経費見積を表 3.3 に示す。なお、観測装置の経費を“0-15 億円”としているのは、当初は既存装置 (MOIRCS) を地表層補償光学系と組み合わせた観測を計画していることを表している。本計画は共同利用望遠鏡の基幹装置の整備であり、運営費から拠出するのが望ましいが、現在の運営費の厳しい状況を踏まえ、主に国内の競争的資金および国際協力によって経費を賄うことを考えている。

3.4.4 年次計画

TMT との連携の効果を最大限に発揮するためには、本計画が TMT の本格的観測開始前に実現し、サンプル形成を開始していることが必要である。2020 年にサイエンス運用を開始することを目指し、表 3.4 のようなスケジュールを考えている。

主要項目	経費	年度	
可変副鏡	約 5 億円	2013	概念設計 → 概念設計レビュー
レーザーシステム	2-4 億円	2014	基本設計、開発検討 → 基本設計レビュー
波面センサーシステム	約 0.8 億円	2015	詳細設計
制御計算機	約 0.2 億円	2016	最終設計レビュー → 製造開始
望遠鏡改造・改修	5-10 億円	2017	組立、試験の開始
観測装置	0-15 億円	2019	エンジニアリング ファーストライト
人件費	約 2 億円	2020	サイエンス運用 開始
予備費	約 5 億円		
合計	約 20-42 億円		

表 3.4 年次計画

表 3.3 主要な経費見積の概算

3.4.5 実施体制

国内実施体制

ハワイ観測所が中心となって、国立天文台、東北大学、東京大学の研究者・学生約 20 名からなるワーキンググループを 2011 年に結成し、技術的検討を進めている。本格的な開発フェーズに入る際にも、このワーキンググループが核

となり、日本・海外の研究者・エンジニアを加えて開発を推進する。

国際協力

超大型望遠鏡が稼働する 2020 年代に向けて、8–10m 級望遠鏡は、それぞれの望遠鏡の特色を活かしつつできるだけ国際協力を進めていくべきであり、装置開発においても連携して進めていくことが必要となる。本計画については、同様の計画を過去に検討してきた Gemini 望遠鏡をはじめマウナケア天文台の望遠鏡の関係者との協力のもとで、予備的調査を行っている。加えて、カナダ Herzberg Institutes for Astrophysics (HIA) は本計画に強い関心を表明しており、補償光学系および観測装置の両面で、具体的な検討に共同で着手している。サイエンスの面でも、2013 年 6 月にカナダ、台湾の研究者を交えたサイエンスワークショップを北海道大学にて開催し、装置仕様への科学面からの要求の設定においても国際的な協力のもとで進めている。

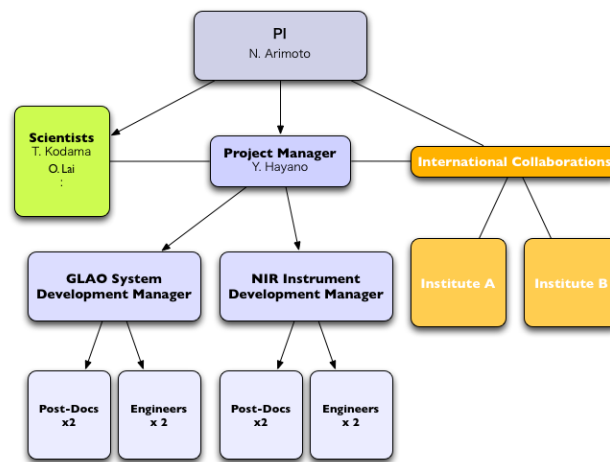


図 3.3 ULTIMATE-SUBARU 計画 推進体制図

3.4.6 学術コミュニティの合意状況等

本計画は、すばる望遠鏡 (国立天文台ハワイ観測所) に対するサイエンスコミュニティ代表からの諮問機関であるすばる小委員会が 2009 年 3 月にまとめた提言書に挙げられた望ましい将来装置の一つであり、コミュニティからの要望に基づいて開始されたものである。検討の推進にあたっては、サイエンスワークショップを毎年開催すると共に、すばるユーザズミーティングや光赤天連シンポジウム等の会合でも検討状況を報告し、周知を図っている。

3.4.7 大学共同利用

本プロジェクトで製作する装置はすばる望遠鏡の基幹装置であり、全世界の研究者にむけて共同利用の提供が行われる。個別の観測提案をベースとする一般共同利用はもちろんのこと、100 夜を超える戦略枠プログラム提案を、国内研究者はもちろん、国際的な研究協力者も加わって検討し、史上最高かつ最大規模の掃天観測プロジェクトを立ち上げる予定である。

3.4.8 プロジェクトの現状

現在、地表層補償光学系および近赤外線撮像・多天体分光装置を概念設計を進めており、2013 年度中に、海外を含めて広く外部機関から評価委員を招待したプロジェクトの概念設計レビューを計画している。その後外部の競争的資金

獲得、国際協力による予算獲得などを経てプロジェクトの承認、開始につなげる予定である。

3.4.9 天文学・宇宙物理学分科会からのコメント

計画の学術的意義

次世代広視野 AO を開発し、カセグレン焦点でも広視野のサーベイ型観測を可能にすることがこの提案の内容である。主焦点のサーベイ能力は、LSST の実現までは世界に並ぶものがないが、一方、すばるの現在の近赤外線観測能力は、すでに他の 8m 級望遠鏡に大きく遅れをとっている。ここで提案されている補償光学システム（すばる GLAO）は、この近赤外線観測において、13 分角にわたって、回折限界にせまる高い解像度を実現するものである。これを最適な観測装置と組み合わせれば、近赤外線においても、すばるの能力を世界の最先端に引き上げることができる。とくに、銀河の誕生期と進化の最盛期の観測には、静止系の紫外・可視光域を捉える近赤外線観測が極めて重要である。すばるによる可視光と近赤外サーベイは、TMT に重要な観測対象を提供するユニークな役割を果たすと期待される。

本プロジェクトは、TMT 時代におけるすばる望遠鏡の戦略の中心となるもので、高い学術的価値を有する。

経費、スケジュールの妥当性

本プロジェクトの全体経費は 25~50 億円と見積もられている。不確かさの最大の原因は GLAO ではなく、観測装置の開発予算を、国際協力も含めてどのように調達するかが未定であることによる。また、必要な望遠鏡の改修費も、運営予算からどの程度出せる（出すべき）か現時点ではさほど明確ではない。項目別に見積もられた経費はおおむね妥当と思われる。TMT の稼働を見据えて立案されたスケジュールもおおむね妥当である。

技術成熟度

GLAO は世界中の大型地上望遠鏡が競い合って開発を進めており、見通しはかなり立っている技術である。この提案チームのメンバーも、相当な実績を有しており、実現に向けて大きな不安要素はないと思われる。

計画実施体制の妥当性

ハワイ観測所長自らが責任者となり、観測所の運用計画とも整合性を持つように作られた実施体制で、おおむね妥当なものとする。

学術コミュニティでの合意状況

光・赤外線コミュニティでの合意は形成されつつある。一方で、すばる望遠鏡の将来的な運用方針と学術的意義について、広く天文研究者、及び周辺コミュニティへ、理解と支持を得る努力を今後期待したい。

共同利用体制の妥当性

すばる望遠鏡の「サーベイ望遠鏡化」については、従来の共同利用のあり方を基本から考え直す必要がある。本提案は、いわば望遠鏡の性能向上なので、全ての利用者に資するものである。

総合評価

TMT への参加を踏まえて光・赤外線分野の将来計画、特に地上からの観測計画においては、TMT の建設と完成後の科学成果において重要な貢献をすること、そのために既存および建設中の設備を有効に活用すること、そしてその中で次世代をになう若手人材を養成することが基本的な枠組みとなる。本プロジェクトは、TMT が稼働する時代まで見据えたハワイ観測所の運用計画の重要な柱であり、我が国の光・赤外コミュニティにとって必須の基幹装置である。提案されたスケジュール通りにこの装置が完成することを期待する。

3.5 位置天文衛星・小型 JASMINE

3.5.1 計画の概要

小型 JASMINE(図 3.4 左) は、JAXA 宇宙研の小型科学衛星を用いて主鏡口径 30cm 級の望遠鏡を搭載し、近赤外線位置天文観測を行うミッションである。小型科学衛星は、標準バスを用いること、そのインターフェース条件を満たすこと、ロケットは JAXA のイプシロンロケットを用いること、観測系システム(ミッション部)の総予算は 10 億円程度以内であること、といった様々な制限付きであり、それを満たす範囲でどれだけ技術的に実現可能な衛星をつくり、世界的な科学的成果を出させるかを検討する必要がある。そこで、小型 JASMINE では、銀河系中心付近のバルジの限られた領域方向(図 3.4 右に示す $3^\circ \times 3^\circ$ 程度)およびいくつかの特定天体方向(CygX-1 やガンマ線連星系、系外惑星系、星形成領域など)を Hw バンド(1.1~1.7 ミクロン)で約 12 等級以下の星を観測し、高度な位置測定精度($10\mu \sim 70\mu$ 秒角)をもとに、星の 3 次元的位置や運動情報を活かした先駆的な科学成果を達成することを目標としている。観測終了後、位置天文カタログとして観測データを公開する。現在、概念設計、技術実証実験、コスト見積もり、サイエンス検討を進めている。国際的には、ESA は可視光で全天を $7\mu \sim 300\mu$ 秒角精度での観測(Gaia 計画)を、日本は銀河系中心方向等の観測に有利な赤外線によりバルジの観測を行うという役割分担を担っている。また、小型 JASMINE は、高時間分解能(バルジ方向では同一天体を 90 分に 1 度測定)をもち、短時間周期の変動現象の解明に対しては、Gaia(年に数回程度の測定)に比べて有利である。小型 JASMINE は、サイエンスや技術的検討に関する国際連携も進み、世界の位置天文学コミュニティ(IAU の Commission8)からも強い支持と推薦を得られている。

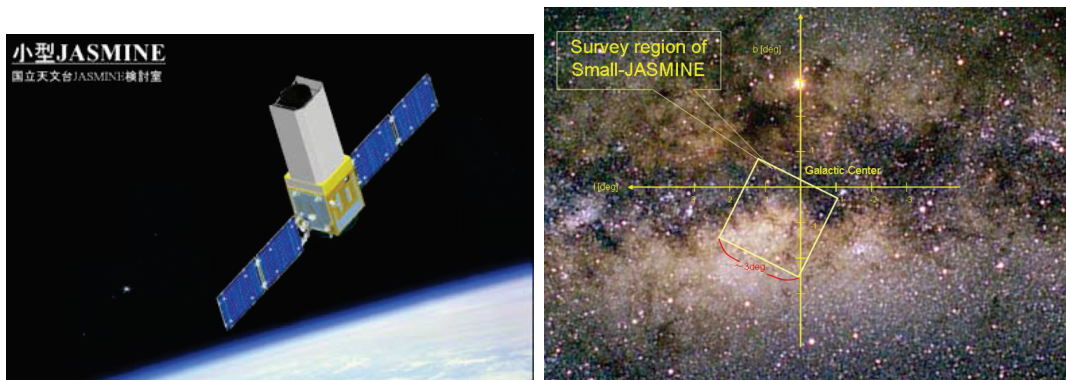


図 3.4 左図は、小型 JASMINE 衛星のイメージ図。小型 JASMINE は、高度約 550km の太陽同期軌道とよばれる地球周回軌道を回る。右図は、銀河系中心付近の観測領域を示す。座標は銀河座標で横軸は銀緯、縦軸は銀経をあらわす。銀経軸および銀緯軸から 30 度程度傾いた正方形が、サーベイを予定している $3^\circ \times 3^\circ$ の観測領域である。ただし、まだ固定はしておらず、今後、サイエンス等の検討にもとづき観測領域の多少の変更はありえる。なお、小型 JASMINE は、春と秋に、この観測領域をサーベイするが、その他の季節は、CygX-1 やガンマ線連星系、系外惑星系、星形成領域など科学的に興味があり、他にはない小型 JASMINE の特徴(近赤外線での観測や高時間分解能など)を活かせる特定天体をターゲットにして位置天文観測を行う予定である。

3.5.2 科学的意義

本ミッションで得たカタログを用いての科学的意義は、次のように考えている。小型 JASMINE では銀河系バルジの星に対する世界で初めて高精度で大量な星の距離と運動情報を測定することにより、バルジの構造(三軸不等楕円体の力学構造: ダークマターや星の軌道、位相分布関数)とその形成史、バルジ内の星形成史、銀河系中心での星団形成、銀河中心にある巨大ブラックホールとバルジとの共進化に関する研究等を飛躍的に発展させることが期待できる。さら

に、小型 JASMINE の位置天文カタログは、X 線連星 (CygX-1 等) やガンマ線連星、系外惑星の軌道要素の解明、重力レンズ天体の解明、恒星物理学の進展、星形成領域や星間吸収物質の 3 次元的分布の解明、(特に主星が低質量星の場合) の系外惑星探査、未知の天体・現象の発見 (ワームホールの発見等) 等に対しても成果が期待されている。

3.5.3 所要経費

小型科学衛星の予算条件は、今までのところ、ミッション部 (観測系システム及びバス部の改修や追加オプション使用の場合はその費用も含む) は約 10 億円以内、バス部 (標準バスを使用することが条件) が約 25 億円、イプシロンロケットによる打ち上げ経費が約 38 億円という予算規模である。なお、ミッション側の研究者が采配できるのはミッション部の予算のみである。小型 JASMINE は、ミッション部の予算上限の約 10 億円に対して、企業連合によるコスト見積もりは、その条件を満たす見込みである。ミッションが JAXA で採択され、プロジェクト化した後に詳細な検討が行われるが、もし、コストが超過する見込みになった場合には、ミッション仕様のトレードオフを出す予定である。

3.5.4 年次計画

2013 年度: JAXA 宇宙研による小型科学衛星 (3 号機相当) の募集 (予定) に応募 (ミッション提案)

2014 年度: JAXA による選考審査を受ける。もし採択され、予算化した場合は、詳細設計、開発を開始

2014 年度 ~ 2018 年度頃: 小型 JASMINE の詳細設計、開発、衛星の試作、製作、試験

2018 年度頃 ~ 2021 年度頃: 衛星打ち上げ、衛星運用 (目標は 3 年間)

(2018 年度頃) ~ 2022 年度頃: データ解析

*2020 年度頃: カタログの中間リリース

2022 年度頃: 最終カタログの公開

* 3 号機 (相当) に不採択の場合は、審査結果に応じて概念設計、技術課題などの見直し、改善を行い、4 号機 (相当) の募集への応募を目指す。それに応じて上記スケジュールがずれる。

3.5.5 実施体制

国内実施体制

○国立天文台 JASMINE 検討室: ミッションの総責任、プロジェクトマネジメント、ミッション部の検討・開発の総括、企業連合や衛星バス部との連携、サイエンスコミュニティとの連携。

○京都大学理学部: ミッション部のマネジメント管理、データ解析と公開、総合的なシステム検討を担当。

○JAXA 研究開発本部・宇宙研: 衛星システムの検討・アドバイス、特に構造、熱、姿勢制御、システムエンジニア。

○筑波大学他 11 大学: 梅村雅之氏を代表として約 25 名の研究者からなるサイエンスワーキンググループがあり、バルジ班、巨大ブラックホール・銀河系中心班、コンパクト天体班、星班、連星系・系外惑星系・重力レンズ班から構成されている。各分野で成果が期待されるサイエンスを検討している。

○衛星開発の企業連合体制: ミッション部の開発・試験のとりまとめ、およびバス部とのインターフェースを行う企業のもとに、構造、光学系、熱、電子系を担当する企業を配置して効率的かつ確実性が高い開発体制を組む予定である。

国際協力

○M.Perryman 氏 (Bristol 大学: ヒッパルコス衛星のリーダーで 2007 年まで Gaia のリーダーを務めた) が、expert adviser として正式メンバーに加入。

○小型 JASMINE の相補的データとなるバルジの星の視線速度や元素組成の測定を行う予定の米国の ASPOGEE-2 計画 (SDSS-IV コラボレーション) とサイエンス連携に関する MOU を締結した。

- Gaia のデータ解析チームや米国海軍天文台の位置天文研究者によるデータ解析や技術検討の協力。
- 上海天文台による、サイエンスデータの中国における受信協力。

3.5.6 学術コミュニティの合意状況等

光赤天連による 2012 年度に行われた中規模計画評価では、よく検討が進められている計画であり、将来に進めるべきとの総合評価を頂いている。また、世界的な位置天文学コミュニティである IAU の Commision8 から、Gaia と相補的であり進めるべき計画として推薦を頂いている。

3.5.7 大学共同利用

銀河系中心付近のサーベイ観測の結果は、位置天文カタログとしてコミュニティに公開する。また、特定天体の位置天文観測に関しては、関係コミュニティからの対象天体に関する意見を聴取の上、キー観測として実行する。

3.5.8 プロジェクトの現状

検討がかなり進み、衛星の概念設計がほぼできて (設計の一部は、図 3.5 参照)、ミッション達成に必要な技術的見込みやデータ解析手法の確立と実証、さらにコストや開発体制の見込みがみついている。このように近いうちに小型科学衛星の提案募集があってもミッション提案できるように準備をしてきている。

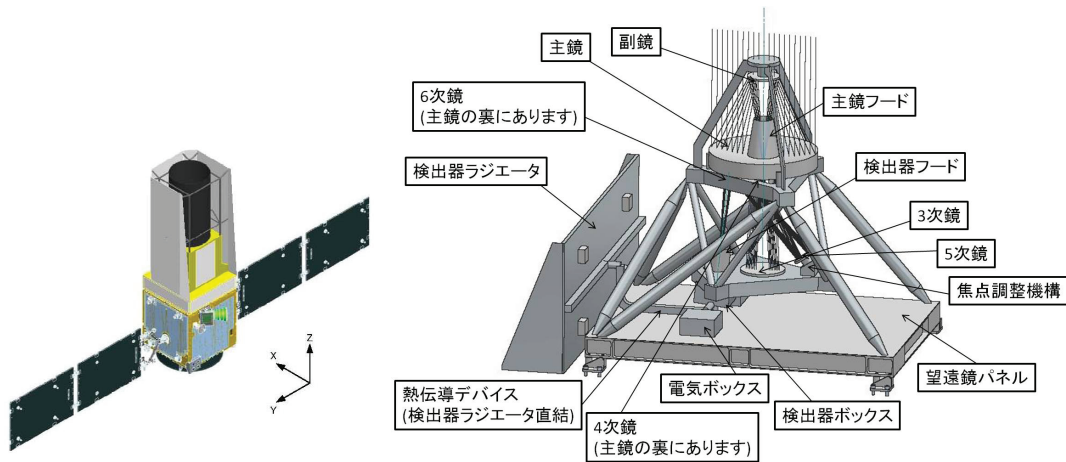


図 3.5 左図は、衛星の外観図。太陽電池パドルが両側についた四角い箱は衛星バス部 (小型科学衛星用の標準バスを使用)、その上に搭載されているのがミッション部である。衛星の総質量は 340kg 程度の見込みである。ミッション部の中の四角い箱の中に望遠鏡が収められている。この四角い箱の上に搭載されている円柱状のものは、望遠鏡への迷光侵入を防ぐフードである。右図は、望遠鏡の構造図。望遠鏡は、光学素子をトラス構造で支持している。望遠鏡の光学系は 3 枚鏡のコルシユ系であり、主鏡口径 30cm、焦点距離 3.9m、視野面積は $0.6^\circ \times 0.6^\circ$ である。検出器は、位置天文観測用に HAWAII-4RG を 1 個用いる。ミッション部の下部は望遠鏡パネルを介して衛星バス部に接続され、衛星バス部の熱変形が望遠鏡構造へ影響しにくい構造となっている。左側の板状の部品は検出器冷却用の放熱板 (ラジエータ) である。

3.5.9 天文学・宇宙物理学分科会からのコメント

計画の学術的意義

HIPPARCOS の成功以後、位置天文観測衛星の学術的重要性は非常に高くなってきている。間もなく打ち上げられる欧州の GAIA 衛星（可視光観測が中心）の観測波長域を補完するという点で、世界で初めての近赤外域での位置天文観測衛星である小型 JASMINE の学術的意義は高い。特に可視光域では見通すことが難しい銀河系中心方向付近のバルジを最優先観測対象としてシステム設計していることは高く評価してよい。

経費、スケジュールの妥当性

日本の研究グループにとって衛星搭載可能な形での位置天文観測システムの開発・製作は初めての試みであり、衛星計画として進めるにはまだ不確定要素も残っていることから、これまでの他の新機軸衛星での例に照らせば、計画経費、特に開発経費は、関係者の予想以上に増加すると思われるので、経費・スケジュールのいずれも、より現実的な見直しが必要である。

技術成熟度

位置天文観測では、単に個々の観測精度の高さが要求されるだけでなく、固有運動・年周視差などの除去のために、長い観測期間を通じての観測システムの同一性が要求される。この種の観測装置の開発は、日本では初めての挑戦である。これまでのところ、衛星本体の位置決定、衛星振動の影響、星像中心決定法などある程度見通しがついている技術要素以外の衛星の姿勢誤差や観測装置の剛性維持、観測データ処理における熱変形など系統誤差の扱いなどについて、さらなる技術的検討が望まれる。

計画実施体制の妥当性

国立天文台を中心とした実施本体グループが未だ弱体である。専任できる研究者の数が7名と少なめであることもさることながら、具体的にはプロジェクト・マネージャーの不在が大きい。光赤外天文学にこだわらず天文学及び関連分野でのプロマネ経験者を中心据えることが、現時点で最も重要な対策である。

学術コミュニティでの合意状況

可視光近赤外における位置天文観測については、日本におけるコミュニティ自体が小さいため、合意形成について工夫が必要である。一つは、位置天文学観測に関する国際的なレベルでの合意形成であり、これについては IAU の Commission 8 (Astrometry) からの勧告を得るなど、大きなサポートが得られている。一方、国内で計画を進めるといふ観点からは、銀河動力学、恒星物理学など精密位置天文観測データから恩恵を受ける他分野の研究者の支持が重要であり、今後は、この方向での合意形成を光天連より大きな枠組みで進めていくべきである。

共同利用体制の妥当性

現時点で、共同利用体制の点まで深く考慮されているようには見えない。位置天文衛星の性格上、2種類の共同利用が想定される。主観測テーマである銀河系中心付近のバルジ方向の観測の場合は観測対象が確定しているため、得られたデータの共同利用が中心となる。一方、バルジを観測できない（しない）期間での観測に関しては、観測対象を公募することを考えるべきであろう。提案グループが国立天文台等で自ら行うよりも、これまでの ISAS の衛星計画で採用されてきたスキームを積極的に利用することを中心に検討することが望ましい。

総合評価

一言でいえば、学術的意義は高いが、準備万端というレベルには、まだ達していない。近赤外域の位置天文衛星観測は、たとえ成功経験を有する ESA でも簡単にできることではないので、現時点では、技術的課題を一つ一つ丁寧に克服していくことが最も肝要であると思われる。日本はこの分野では後発国であるので、Perryman 氏に限らず米欧から位置天文観測衛星あるいは同種の観測システム構築の経験者を顧問として指導を仰ぐだけでなく、経験ある中堅・若手の研究者・エンジニアなどを実際の開発チームに招くなど、積極的に先人の知恵を借りるという姿勢が重要であろう。

3.6 東京大学アタカマ天文台 (TAO) 計画

3.6.1 計画の概要

東京大学アタカマ天文台 (The University of Tokyo Atacama Observatory, TAO) 計画は、チリ共和国・アタカマ地方にある標高 5640m のチャナントール山頂に口径 6.5m の大型赤外線望遠鏡を建設する計画である。このサイトは極めて小さい水蒸気量 (PWV メディアン値で 0.85mm)、優れたシーイング (FWHM 0.7 秒角)、良い晴天率 (82%) など、世界トップクラスの観測環境を誇る。ここに赤外線観測に最適化した大口径望遠鏡を設置することにより、銀河形成や惑星形成などの天文学の重要課題に赤外線観測で迫る。またこの計画は大学による次世代研究者育成もその大きな目標としており、開発・観測研究の両面で若手の育成に力を入れている。これは大規模計画での日本の競争力・発信力を高め、リーダーシップを発揮するのに重要である。

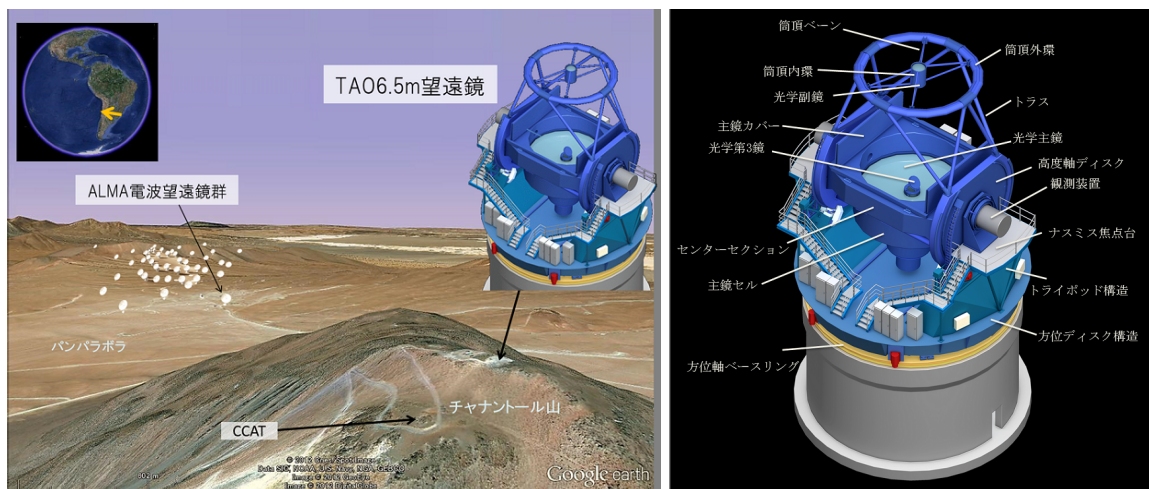


図 3.6 (左) TAO が建設されるアタカマ・チャナントール山。山頂 (標高 5,640m) の地点に TAO6.5m 望遠鏡は建設される。(右) TAO 望遠鏡の概念図。望遠鏡架台はトライポッドディスクを採用しており、ナスミス焦点およびペントカセグレン焦点を備えたカセグレンタイプの望遠鏡である。

3.6.2 科学的意義

銀河の形成進化および惑星形成の解明は現代天文学の最重要課題である。銀河形成の最盛期である高赤方偏移の時代を探るためには静止波長で可視波長域の銀河スペクトルを捉える近赤外線観測が、惑星形成の現場を探るためには温度 100K 以下という低温の放射領域を捉える中間赤外線による高空間分解能の観測が必須であり、いずれも赤外線波長域での観測が重要となる。地上望遠鏡としては世界最高標高となる本計画サイトは大気中に含まれる水蒸気が極めて少ないため赤外線波長域における大気透過率に極めて優れ、近赤外線では波長 $2.5\mu\text{m}$ まで切れ目のない観測が、また中間赤外線では波長 $25 - 38\mu\text{m}$ での観測が地上から初めて実行可能になる。この優れた赤外線観測条件と口径 6.5m の高い感度・空間分解能を活かし、近赤外線大規模分光サーベイによる銀河進化過程の解明と中間赤外線高解像度観測による惑星形成過程の解明が、本計画の最重要科学研究目的である。

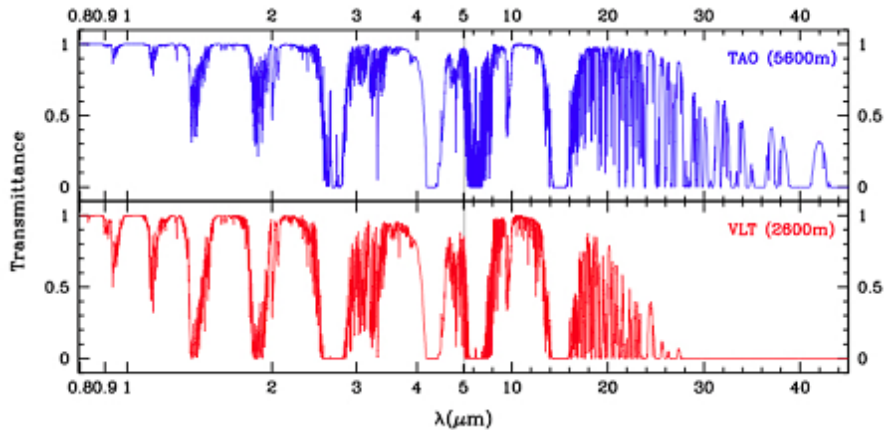


図 3.7 赤外線波長での大気透過率。上が TAO サイトで下が VLT サイト。TAO サイトでは $2.5\mu\text{m}$ までの近赤外線が切れ目なく観測でき、また $25\text{--}38\mu\text{m}$ の中間赤外線波長帯にも新しい大気の窓が現れる。

3.6.3 所要経費

TAO 計画の望遠鏡建設費はサイト整備等を含め総額 70 億円である。内訳は、望遠鏡本体の製作費が約 20 億円、鏡などの光学系製作費が約 20 億円、施設及びサイト整備・現地組み立てが約 30 億円である。これに加えて、赤外線観測装置 2 台の製作経費に 8 億円を要する。これら経費の大部分については、2009 年度および 2012 年度補正予算で措置されている。また、サイト整備のうち一部はサイトを隣接する米国 CCAT 計画と共同で実施する予定である。望遠鏡が定常運用に入った段階での運用費は年間約 5 億円を想定している。

3.6.4 年次計画

TAO 望遠鏡製作は補正予算措置を受け 2013 年度に本格化している。2014 年度までに各要素の製作建設を終え、2015 年度に国内調整、2016 年度にチリへの輸送を進め、2017 年度内に望遠鏡ファーストライトを行う計画である。観測装置は 2014 年度内に完成し、すばる望遠鏡での初期観測を行い、望遠鏡ファーストライトにあわせてチリに輸送する。望遠鏡ファーストライト後はできるだけ速やかに科学観測をスタートさせる。

3.6.5 実施体制

実施体制

TAO 計画は東京大学天文学教育研究センターのスタッフを中心に進められている。組織体制は下の通り。

- 研究代表者：吉井 謙（東京大学天文学教育研究センター）
- 計画マネジメント：土居 守（東京大学天文学教育研究センター）
- 研究計画メンバー：河野 孝太郎、川良 公明、田中 培生、宮田 隆志、本原 顕太郎、田辺 俊彦、峰崎 岳夫、酒向 重行、諸隈 智貴、田村 陽一、小西 真広、高橋 英則、上塚 貴史、青木 勉、征矢野 隆夫、樽沢 賢一、加藤 夏子（以上、東京大学天文学教育研究センター）、越田 進太郎（チリ・カトリカ大学）

国際協力

これまで本計画はチリ現地の諸機関との密接な関係と協力のもとに進めてきた。特にチリ大学とは学術交流協定を2003年来締結しており、サイトの土地利用交渉や先行設置した口径1m望遠鏡観測のチリ時間運用などで協力している。またカトリカ大学とは協定を締結し、同大学での観測装置開発者養成と本計画推進のための共同ポスドクを雇用しており、コンセプション大学天文学専攻とも学術交流協定を締結した。

大型サブミリ波望遠鏡をチャナントール山に建設する計画であるCCAT計画を主導するコーネル大学とカリフォルニア工科大学とは、アクセス道路の拡張など共同でサイト整備を行っている。主鏡製作にはアリゾナ大学シュワード天文台ミラーラボを予定しており、同大学と学術交流協定を締結、主鏡関連技術や将来の可変副鏡計画について協力している。

3.6.6 学術コミュニティの合意状況等

TAO計画は光赤外線コミュニティを中心に議論されてきた。2005年および2012年には光学赤外線天文連絡会から運営委員会声明の形で計画推進の意見を表明いただいている。また年2回の光赤天連総会やシンポジウムでは定常的に進捗報告を行っている。そのほかコミュニティの意見を計画に反映させるため、プロジェクトの外部評価(2013/1)や望遠鏡仕様の有識者レビュー(2013/6)なども実施している。

3.6.7 大学共同利用

TAO計画では望遠鏡時間の40%を国内研究者枠として、大学をはじめとした研究者にオープンにする計画である。またプロジェクト枠(望遠鏡時間の50%)でも共同研究を積極的に受け入れる。これらでは若手育成の観点から、全国の大学院生の学位取得のための観測を優先的に遂行する。

3.6.8 プロジェクトの現状

TAO計画は2012年度の補正予算措置を受け建設フェーズに入っている。現在は望遠鏡仕様の詰めを行っており、主要部品については調達の手続きに入っている。

3.6.9 天文学・宇宙物理学分科会からのコメント

計画の学術的意義

東京大学アタカマ望遠鏡(TAO)は、南米チリ共和国チャナントール山頂(標高5,640m)に建設予定の光学赤外線望遠鏡(直径6.5m)である。地上望遠鏡として最も高所に位置することから*2、 $25\mu\text{m}$ から $38\mu\text{m}$ にかけての中間赤外線で回折限界(1秒角程度)の観測が新たに可能となる。また、他の地上望遠鏡ではほとんど観測不可能なパッシェン α 線の波長($\lambda = 1.875\mu\text{m}$)でも、高い透過率を達成できる。これらにも増して重要なことは、TAOでは近・中間赤外線の全波長域にわたって、既存の地上光学赤外線望遠鏡を凌ぐ大気性能(透過率、シーイング)を得られることである。このことから、TAOは天文学の広範な分野において、また特に現在世界で活発に研究されている初期宇宙や惑星系形成の研究においても、重要な成果を達成できる潜在性を秘めている。

また、TAOは日本が南天に建設する初めての大型光学赤外線望遠鏡となる。このため、すでに共同利用が開始されているALMAを用いた観測との相乗作用により、日本の天文学の推進に寄与することが期待できる。

*2 チャナントール山頂は、地上では南極高地に迫る良好な観測環境を持ちながら、南極高地と比べるとアクセスが容易であるという特徴がある。

経費、スケジュールの妥当性

TAO 望遠鏡の建設経費は約 70 億円としており、これに加えて観測装置 2 台を 8 億円で製作するとしている。この推定額は妥当と見積もられ、かなりの部分については 2009 年度と 2012 年度の予算で措置されている。また、サイト整備関連については CCAT 計画と共同で実施するなどして、予算不足を補う努力がなされている。

完成後の運営費としては 5 億円を想定しており、概ね妥当な額と考えられる。国際協力による運用等も視野に入れて、運営経費の確保に努められたい。

スケジュールについては、2013 年度と 2014 年度で望遠鏡主要部分の製作を終え、2015 年度に国内調整、2016 年度にチリへ輸送、2017 年度にファーストライトの予定である。このスケジュールはかなりタイトであるので、プロジェクトメンバーの総力を結集して工程の維持に努められたい。

技術成熟度

TAO 望遠鏡は基本的に既存技術を使用するので、大きな技術的問題はないと見受けられる。

計画実施体制の妥当性

TAO 計画を推進する人員としては余裕のある状態ではないが、東京大学天文学教育研究センターの大部分のメンバーが TAO 計画の推進に参加しており、実施体制構築の努力が認められる。

学術コミュニティでの合意状況

TAO 計画は光赤外コミュニティを中心に議論されてきた。2005 年および 2012 年には光赤天連から運営委員会声明の形で支持されている。また年 2 回の光赤天連総会やシンポジウムでは定常的に進捗報告を行っており、コミュニティの意見を計画に反映させるための外部評価 (2013 年 1 月) や有識者レビュー (2013 年 6 月) など実施している。

共同利用体制の妥当性

観測時間の 40% を国内研究者枠として、大学をはじめとした研究者にオープンにする計画であり、東京大学以外の研究者も共同利用を通してメリットを受けられる。

総合評価

総合評価としては、これまでの努力により予算のかなりの部分が措置されていることもあり、積極的に推進すべきと考える。なお、完成後の運用体制 (組織) については、本郷の天文学教室との関係や木曾観測所の将来計画も含めて検討してもらいたい。

3.7 超広視野分光器 Prime Focus Spectrograph (PFS)

3.7.1 計画の概要

すばる望遠鏡用の多天体ファイバー分光器を製作する計画。現在 8m 級の望遠鏡で進行中の似た計画はなく、世界でユニークな装置となる。特に HSC で撮像した天体からターゲットを選び、大規模な分光サーベイを行うことを目指している。HSC と同じく、Subaru Strategic Program (SSP) で 300 夜の観測を 5 年間掛けて行うことを提案する。

HSC と Wide Field Corrector を共有し、Focal Plane 上の CCD array を 2400 本の光ファイバーで置き換える。一本一本のファイバーの先端を Cobra と呼ばれるロボットで $5\mu\text{m}$ の精度で制御するファイバー配列装置を持つ。50m のファイバーを通して IR 側の別室に設置する計 4 台の分光器に 600 本ずつ光を送る。分光器はそれぞれ青、赤、近赤外の 3 つのアームを持つ。 1.3° の広視野を可能にする。装置全体の概念図は図 3.8 に、分光器の仕様は表 3.5 に示す。

2017 年の commissioning を目指す。光赤外コミュニティでは TMT が最重要と位置づけられているが、TMT で観測するターゲットは HSC の撮像と PFS の分光で厳選する必要がある、有本ハワイ観測所長はすばるの将来計画として HSC、AO と並ぶ三本柱の一つと位置づけている (Subaru Users' Meeting 2013.1.15)。

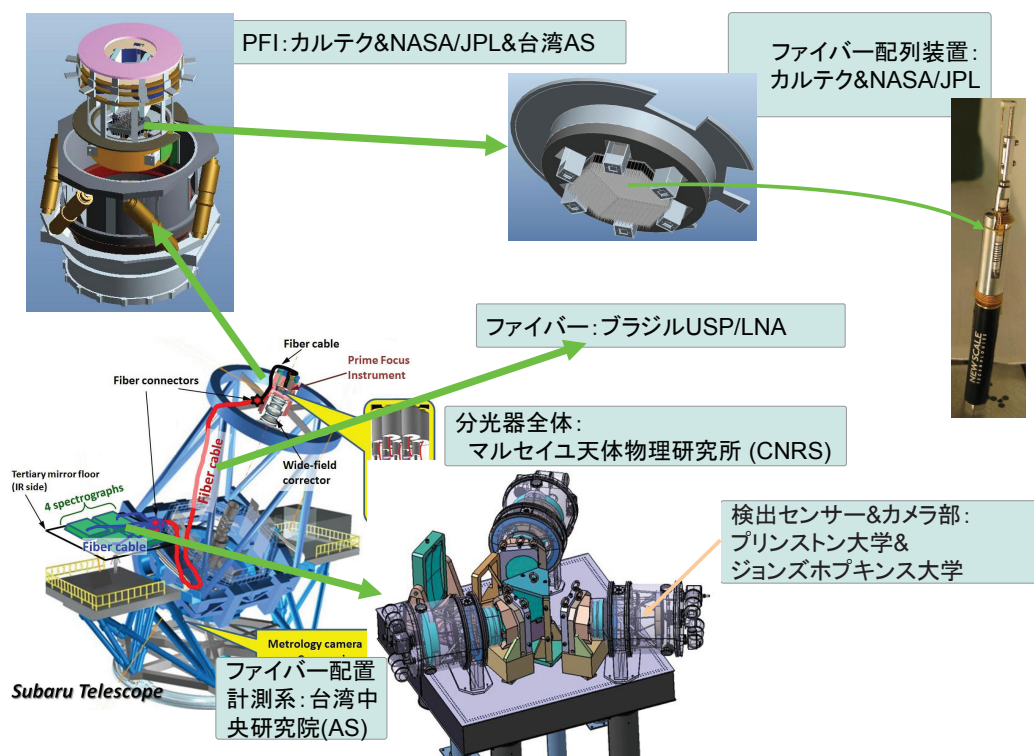


図 3.8 PFS の概念図。国際協力パートナーの責任分担も示す。

3.7.2 科学的意義

PFS によるサーベイでは三つの目的にそれぞれ約 100 夜ずつ観測を行う。

(1) 宇宙論。HSC Wide Survey 領域から選択された銀河を分光フォローアップし、約 400 万個の輝線銀河の赤方偏移を得る。銀河の 3 次元分布からバリオン振動 (BAO) の標準定規スケールを観測的に求め、宇宙の膨張則 $H(z)$ 、

アーム	波長域 (nm)	平均分解能	検出器
青	280–640	2500	Hamamatsu (special coating)
赤	640–955	3200 or 5000	Hamamatsu (HSC と同じ)
近赤外	955–1260	4500	Teledyne HgCdTe ($< 1.7\mu\text{m}$)

表 3.5 分光器の仕様。

角形距離 $D_A(z)$ を $0.8 < z < 2.4$ の各赤方偏移ビンで求め (図 3.9 左)、暗黒エネルギーの状態方程式パラメータを高精度で決定する。また、構造形成の成長史 growth rate を同赤方偏移範囲で求め、宇宙論スケールでのアインシュタインの一般相対性理論の妥当性を検証する。近赤外アームと 8.2m の口径を活かすことで、 $1 < z < 2.4$ の高赤方変移の宇宙論銀河サーベイが可能であり、4m 級望遠鏡の計画、例えば米国の DESI 計画などが実現したとしても、ユニークな結果が得られる。将来の大型計画である LSST、Euclid や WFIRST に先駆けて宇宙論結果を導出する。

(2) 銀河形成・進化。HSC Deep Survey 領域から色選択した銀河の分光サーベイを行う。特に、近赤外アーム、広い分光波長域を活用することで、宇宙の星形成率がピークを迎える、つまり銀河形成の激動期と考えられる $z \sim 2$ の大規模分光サーベイを行い、銀河の進化を詳しく調べ、銀河の形態の起源を解明する。これまでの分光サーベイ (COSMOS, PRIMUS など) と比較して、サーベイ体積、分光銀河の天球上での数密度で桁で凌駕するユニークなサーベイデータを提供する (図 3.9 右)。この分光データを用い、宇宙の大規模構造の様々な環境の下で如何に異なるタイプの銀河が形成・進化してきたかを定量的に調べる。また、HSC の多色広帯域・狭帯域フィルターで発見した、 $3 < z < 7$ の赤方偏移にある明るい QSO や Lyman 輝線銀河を分光フォローアップサーベイし、宇宙の紫外線光子バックグラウンド、再イオン化過程の物理を制限する。

(3) 銀河考古学。天の川銀河の約 100 万個の星 ($V < 22$) の視線方向速度を測定する。2013 年 10 月に打ち上げ予定の位置天文衛星 GAIA のデータと組み合わせることにより、6 次元位相空間での星集団の動力学構造を調べ、銀河系のクラスタリング進化史を逆算的に調べ、CDM 構造形成モデルを検証し、暗黒物質の性質を制限する。GAIA 衛星でも明るい星 ($V < 17$ 、約 10kpc 以内) については視線方向速度が測れるが、PFS は半径 100kpc に渡る星の速度を測ることが可能であり、相補的である。また、red-arm の分光器について 710–885nm の波長帯で中分散 ($R \sim 5000$) 回折格子に変更できる仕様にし、約 10 万個の星サブサンプル ($V < 21$) の中分散分光サーベイを行い、 α -元素の存在量 (abundance) を調べ、銀河の化学進化史も調べる。さらに、独立なサンプルとして、アンドロメダ銀河 (M31) のハロー領域の約 10 万個の星サンプルを分光フォローアップサーベイし、視線速度、化学組成を調べる。

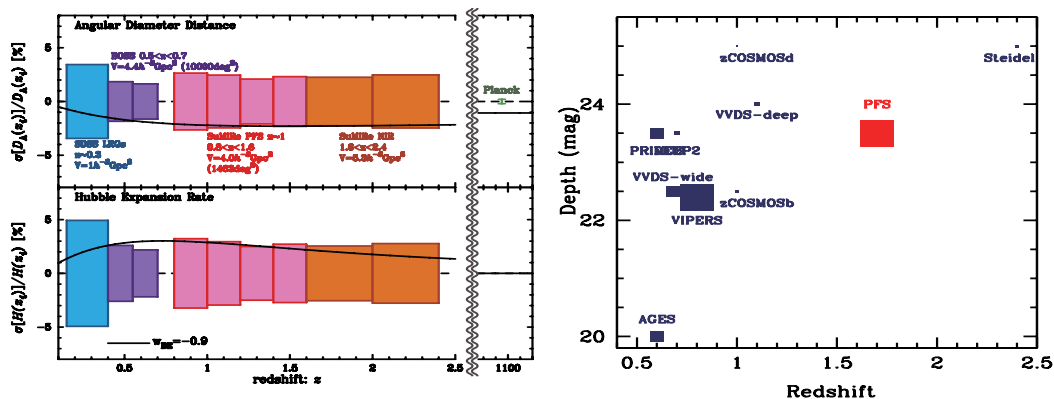


図 3.9 左：バリオン振動を使って宇宙の膨張則と角形距離を観測できる精度。これでダークエネルギーの性質を高精度で決定できる。右：分光サーベイのカバーできる赤方偏移 (メディアン) と深さ。四角の大きさはサーベイの面積を表す。PFS によるサーベイのユニークさがわかる。

3.7.3 所要経費

総経費は contingency を含め、\$80M と見積もる。内閣府の FIRST からの資金を含め Kavli IPMU が\$29M、各パートナーから\$5M の貢献を MOU で合意済。計約\$20M 不足している。東大からの概算要求と新しいパートナーの確保で不足分を賄う予定。

3.7.4 年次計画

2013 年度から各 subsystem の Critical Design Review (CDR) を経て、製作が本格化。FIRST 終了時の 2014 年 3 月には分光器一台を完成、2017 年に commissioning。SSP へ提案、2018 か 19 年度よりサーベイを開始予定。

3.7.5 実施体制

国内実施体制

プロジェクトオフィスは東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構 (Kavli IPMU) にある。ハワイ観測所と密接に連絡を取り合っており、装置の仕様を決めている。完成後は移管し、facility instrument となる。

国際協力

Kavli IPMU を中心に、Princeton、Caltech、NASA Jet Propulsion Laboratory、John Hopkins、Laboratoire d'astrophysique de Marseille (LAM)、ASIAA Taiwan、そしてブラジルのグループで設計・開発・制作する国際協力のプロジェクトである。分担は図 3.8 に示す。すでに MOU は締結され、製作に向けて個別の契約書を準備している。

3.7.6 学術コミュニティの合意状況等

2010 年の Subaru Users' Meeting ですばるの将来計画として承認され、すばる小委員会 (SAC) から正式に文書ももらっている。2012 年の SAC 提言「2020 年代に向けたすばるの戦略」では「HSC サーベイで見つかった稀少天体候補を PFS で分光フォローアップして、高い信頼性で TMT 観測ターゲット天体を選び出しておけば、より競争力が高まるであろう。」と TMT 時代の PFS の有用性を強調。更に PFS によるサーベイについては、「宇宙論サーベイのみならず、銀河考古学、銀河進化など多彩な研究分野で威力を発揮するものと期待される。現在、世界中で広視野撮像サーベイの計画は多数あるが、多天体分光装置の計画はまだ十分に練られておらず、PFS の独自性は極めて高い。さらに、SDSS サーベイの成功から明らかなように、天域の同じ領域の撮像サーベイと分光サーベイの相乗効果は極めて大きく、HSC・PFS サーベイは、今後何十年にも渡り人類に残るレガシー的サーベイデータになると期待される。」とその科学的価値を高く評価。光赤天連のレビューでも科学的意義で S 評価。

3.7.7 大学共同利用

PFS サーベイのデータは日本のコミュニティと共有し、誰でもサイエンスに使用できる。また、すばる望遠鏡の facility instrument となり、PI proposal で申請すれば使用可能となる。

3.7.8 プロジェクトの現状

2010 年 3 月に内閣府 FIRST で予算化。国際協力体制作りを進め、2012 年 3 月に Conceptual Design Review、2013 年 2 月に Preliminary Design Review を既に通過。2013 年度に各 subsystem 毎に CDR を行い、製作が開始。

3.7.9 天文学・宇宙物理学分科会からのコメント

計画の学術的意義

すばる望遠鏡の主焦点に、多天体ファイバー分光器を設置し、8m 望遠鏡の大集光力と、すばる望遠鏡主焦点の大きな視野という特徴を活かして、大規模な分光サーベイ計画を行う計画である。科学目的として、(1) 宇宙論、(2) 銀河進化、(3) 銀河考古学の、3つのサブテーマをもつ。他に類似の計画はなく、どのサブテーマもユニークな成果が期待される。

経費、スケジュールの妥当性

計画自身は、すでに、(十分ではないものの) 国内でも予算化され、海外パートナーも含めて、具体的な設計検討が進められている。ただし、現在の予算、国際パートナーの枠組みでは、20 億円程度の予算不足となっており、新たな資金(または国際パートナー) 獲得が必要である。

技術成熟度

今までにない大型の多天体ファイバー分光器であり、システムとして成立させるためには、多くの課題があり、確実な設計、開発が望まれる。ただし、原理的に実現を妨げるような技術課題は見当たらず、確実な開発を進められ、十分に実現可能であると判断される。

計画実施体制の妥当性

東京大学 IPMU を中心とする国際共同推進体制がすでに構築され、運用されている。ただし、多くのパートナーが参加し、I/F が複雑化していることから、プロジェクト全体を IPMU が確実にコントロールできるよう、マネジメント体制を充実させることが大切である。

学術コミュニティでの合意状況

すばるの主焦点分光器については、すでに長年コミュニティで議論されており、合意は十分に得られている。

共同利用体制の妥当性

装置が定常運用に入った後は、国立天文台の手により、共同利用に供される予定である。

総合評価

PFS は、上記のように科学的に価値の高い計画である。

さらに、すばるの次世代の代表的観測装置である Hyper Supreme Camera (HSC) とは、科学的にも技術的にも親和性が高い。科学的には、HSC で発見された天体を分光フォローアップするには最適の装置である。さらに、技術的にも、主焦点という、他の 8m 級望遠鏡にはない、すばるの特徴を活かし、かつ Wide Field Corrector を HSC と共有するなど、利点が多い。

また、HSC の広視野撮像と PFS の分光サーベイの組み合わせは、次世代の日本の地上大型計画 Thirty-Meter Telescope (TMT) への観測ターゲットを提供するというためには最適な装置群であり、日本の光赤外線天文学の戦略的進め方にも合致する。

実質的にすでにプロジェクトは開始されている。ただし、未だに 20 億円の予算不足があるなど、今後とも予算獲得の努力が必要である。また、多くの国際パートナーを含む計画であり、その運用については相応のマネージメント体制の確立が必要である。

第4章

CRC (宇宙線研究者会議) からの提案

4.1 議論のまとめ

CRC (宇宙線研究者会議) では天文学・宇宙物理学中規模計画について、および CRC 実行委員会と CRC 将来計画検討小委員会での議論を重ね、中長期的な宇宙線物理学の方向性を議論しながらコミュニティの合意形成を図ってきた。今回 (2011 年 7 月～) の議論では、中規模計画の枠組みで CRC 内で公募を行い、8 つの計画が応募した。これらの計画は、これに先立つ 2010 年度の CRC 将来計画シンポジウムでも議論されており、継続的に検討されていた。引き続き 5 回にわたって開催したタウンミーティングにおいては、これらの 8 つの計画すべてについて複数回の発表や公開での議論を行い、コミュニティでは十分な検討を重ねた。計画評価の視点として、小委員会から、サイエンスにおいて高い価値があるかどうか、予算やマンパワーにおいて十分な実現性をもっているかどうか、CRC 全体を活性化するような効果を持つかどうか、が示された。

こうした議論を経て、今回は 5 つの計画が CRC からの中規模計画として提案されるに至った。

最優先の計画 CTA ならびに KamLAND2-Zen

CRC はこの 2 計画を最優先として推し、2 つの計画に優先順位はつけない。

CTA は多くの宇宙線源の観測や多様な成果が見込める点が評価されている。さらに、大型国際共同研究であり日本が乗り遅れずに主導的役割を果たすべきであるという緊急性も指摘されている。機を逸せずに参加すれば、日本の貢献も十分期待できると見込まれる。技術は比較的確実であることや、計画の成熟度も評価された。

KamLAND2-Zen は、サイエンスおよび実験計画での、豊富なオプションと着実性が高く評価された。宇宙物理から地球物理、素粒子・原子核物理に至る幅広い領域で重要な成果が期待される。また、既存の施設を基にしており、中規模計画として推すのにちょうど当てはまる予算規模やスケジュール、着実さも評価された。

今回は最優先とはしないが、展望をもって進めるべき計画 TA2, JEM-EUSO, XMASS-1.5

上記同様に、CRC からは 3 つの計画に優先順位はつけない。

XMASS-1.5 は目的とする成果がもたらされれば絶大なインパクトを持つこと、また実験の精度や信頼性も評価された。海外の実験との競争における緊急性も高いと認識されている。実験の現状の問題点を解決して、次の段階へ進むことが期待されている。

TA2, JEM-EUSO については、長期的な目で見ても最高エネルギー宇宙線が、将来にわたり引き続き宇宙線コミュニティにおける重要課題である、との一定の支持を受けている。一方で、基本的な目標が重なるので、両実験のロードマップの整理や現状の問題点を解決し、最高エネルギー宇宙線研究全体としての展望を明確にして進めることが望まれた。

大型科研費等による速やかな実現を目指すべき計画 TibetAS+MD+YAC, GADZOOKS!, IceCube/ARA

これらの計画は、比較的小規模で、かつ既に大型科研費等で進められている部分もあり、CRC からは今回の中規模計画に含めた議論は行わなかった。ただし、これらの計画もコミュニティでの議論を経てその重要性は認識されており、CRC はこれら3計画は大型科研費などで予算獲得して速やかな実現を目指すべきと判断した。

4.1.1 長期計画議論

宇宙線物理学分野においても長期計画は多くの場合において大規模計画でもあり、サイエンスだけでなく予算や組織面での対応も必要である。あるいは小中規模でも長期間の観測によって重要な成果をあげた例もある。CRC はこれらの長期的な課題についての方向性の議論や合意を形成する役割を担っている。

一方で、本分野では小規模中規模の計画が機動性を発揮して、新規の話題に先鞭をつけたり分野間をまたがるテーマに取り組むことも多い。このように各計画の規模、形態、研究テーマについて多様な独立性の高いプロジェクトが存在し、全体として分野を形成しているのも宇宙線物理学の特徴である。したがって、比較的短い期間で行う研究も、分野の活性や緊急性の高い課題に対応する上で必須であり、中規模の計画が、必ずしも長期計画とのつながりのみで検討できるとは限らない。

2011年～2012年は、長期計画については大型計画である KAGRA が建設開始されて検討課題が一段落したこともあり、具体的な議論はあまりおこなわれなかった。しかし、2011年8月に CRC 実行委員会が示した「宇宙線3分野(ガンマ線天文学、最高エネルギー宇宙線、地下実験)概況」においては、これら3つを喫緊の中規模計画での検討分野とした。

4.1.2 中規模計画議論の経緯

2011年8月の学術会議への中規模計画推薦を機会に、CRC 将来計画検討小委員会が設置された。この委員会は、複数年度にわたる検討の継続性や、周辺分野の意見を取り入れるために CRC に属さない外部委員も加え、計11名により構成された。また、2011年7月～2012年11月の間に5回のタウンミーティングを開催し、オープンな場での議論を継続的にこなした。各回のタウンミーティングでは、ガンマ線天文学関連、超高エネルギー宇宙線観測分野、地下非加速器実験分野といったテーマを設定して集中的に議論した。当該分野の中規模計画候補だけでなく、関連する CRC 内外の計画や、大局的な視点での理論レビュー等も招聘し、これらの計画についての検討や研究者のコンセンサスの形成がはかられた。コミュニティがタウンミーティングを通じて自主的な検討を進めてきたことは重要であり、会合がピア・レビューとして機能したことは評価したい。個々の計画についての優先度や緊急性については前節に記した。

4.1.3 大規模計画との関係

CRC では現在、Super-Kamiokande (ニュートリノ、核子崩壊) が稼働中、KAGRA (重力波) が建設中である。また将来の大規模計画では、Hyper-Kamiokande (ニュートリノ、核子崩壊) があげられる。これらは今回推薦する5つの中規模計画とは、サイエンスの上ではいくつかの共通する課題があるが、計画運営や建設の上ではまったく独立している。

一方、今回中規模計画としてあげたものにも計画全体は大規模であり、そのうちの日本のグループの寄与分が中規模であるもの (CTA, TA2, JEM-EUSO) もある。

4.2 ニュートリノレス二重ベータ崩壊探索 KamLAND2-Zen

4.2.1 計画の概要

「宇宙に反物質が無く物質だけでできている謎」、「ニュートリノが軽い質量を持つ謎」を解明するために、極低放射能環境を実現している液体シンチレータ反ニュートリノ観測装置カムランドのエネルギー分解能を大幅に向上し、1000kgの二重 β 崩壊核 ^{136}Xe を導入して、ニュートリノ質量の逆階層構造をカバーするマヨラナ有効質量20meVの感度でのニュートリノを伴わない二重 β 崩壊（以下 $0\nu 2\beta$ ）の探索を行う。さらに、原子炉ニュートリノが少ない特別な状況を生かし、世界最高精度での地球ニュートリノ観測を行い、地球内部での放射性熱生成を直接測定することで、地球の形成・ダイナミクスの理解を深めるニュートリノ地球科学を推進する。また、同時にカムランド内部へ装置を導入するための導入口を改良することで、大型の装置の導入を可能にし、強力な反ニュートリノ源を使った第四世代ニュートリノ探索や高純度NaI結晶を使った暗黒物質の季節変動検証など、極低バックグラウンド環境を必要とする極低放射能科学を推進する。

$0\nu 2\beta$ 探索の高感度化で必須となるエネルギー分解能の向上には、高量子効率の光センサーを使用して集光ミラーを取り付け、大発光量の液体シンチレータに置換する。これらにより、エネルギー分解能はカムランドと比べて1.7~2倍程度向上する。同時に液体シンチレータを内包するバルーンをより放射性不純物の少ないものに置換して、さらなる極低放射能化を図る。また、現在直径50cmしかない上部導入口を直径2mの大口径に拡大し、さらに5t程度までの重量物をつり下げる機構を設置することで、多様な極低放射能科学研究に対応できるよう汎用化を図る。

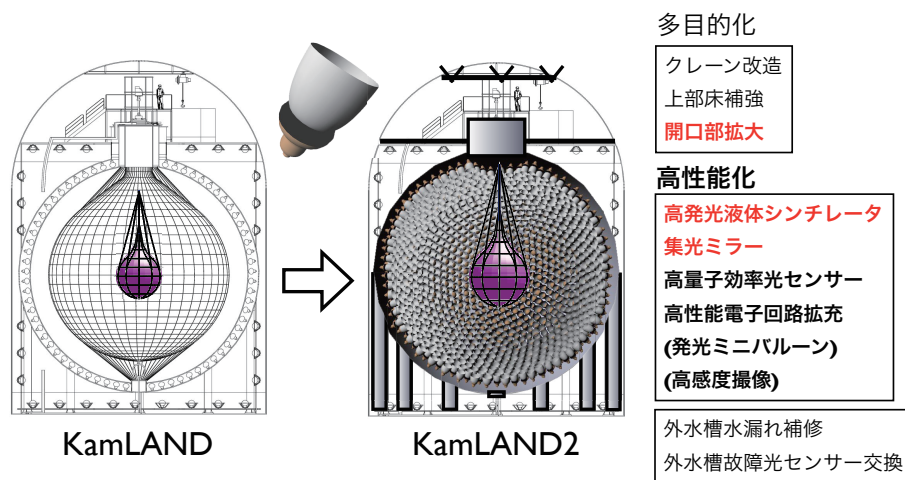


図 4.1 KamLAND2 では、極低放射能科学を推進するための汎用化・高性能化を実施する。

4.2.2 科学的意義

$0\nu 2\beta$ を発見した場合、ニュートリノと反ニュートリノが同一であるという物質粒子の中でニュートリノだけが持ちうるマヨラナ性の証明となる。ニュートリノのマヨラナ性はシーソー機構による「ニュートリノが軽い質量を持つ謎」の究明につながり、また、レプトジェネシス理論による「宇宙に反物質が無く物質だけでできている謎」にもつながる。さらに、 $0\nu 2\beta$ の反応率からニュートリノのマヨラナ有効質量が求められ、これまで質量の2乗差しか測定されていないニュートリノの質量の大きさを解明できる。ニュートリノのマヨラナ性と質量の大きさを解明は、CP位相の測定と併せてニュートリノ研究の最重要課題である。

もし $0\nu 2\beta$ が未発見となっても、学術的な意義が高くなければならない。ニュートリノ質量の逆階層構造までの感度を持つ世界最高感度を実現することで、宇宙観測やニュートリノ振動研究など比較的重いニュートリノ質量を示唆するものがある中、これらとの矛盾が明確になれば、ニュートリノはディラック粒子であることの証明となる。あるいは、多くの理論が期待するマヨラナ性を信用すれば、ニュートリノ質量は標準階層構造を持つと結論づけることが可能となる。また、世界をリードする地球ニュートリノ観測を並行して推進することができるので、バックグラウンドとなる原子炉ニュートリノが大幅に減少している中、高精度での放射性地熱測定により、地球始原隕石の特定やマントル対流が一層か多層かといった地球科学における永きにわたる議論に決着をつける可能性がある。さらには、宇宙観測や多くのニュートリノ実験が示唆している第4世代のニュートリノの存在を迅速かつ高感度で検証することや、過去の NaI 結晶を使った暗黒物質探索実験 (DAMA/LIBRA) が強い季節変動を示していることを極低放射能環境下で検証することも計画しており、幅広い学術的な成果が期待される。

4.2.3 所要経費

- ・高エネルギー分解能化 14 億円 (大光量液体シンチレータ+バッファオイル 3000 立方メートル 7 億円、高量子効率光センサー 6 億円、集光ミラー 1 億円)
 - ・汎用化 1 億円 (導入口拡張+クレーン設置+床補強)
 - ・極低放射能環境の増強 4 億円 (低放射能バルーン 1 億円、デッドタイムフリー電子回路 2 億円、革新技術開発 [発光バルーン、高感度撮像、高圧キセノン導入] 1 億円)
 - ・二重 β 崩壊核の増量 8 億円 (^{136}Xe 追加 400kg)
- 合計 27 億円
- その他、ニュートリノ源の製作はフランス CEA の担当で総計 3 億円程度を予定し米露とも協力する。

4.2.4 年次計画

- ・初年度：KamLAND から KamLAND2 への改造
 - ・第二年度：反ニュートリノ源導入で第4世代ニュートリノ探索開始、低放射能ミニバルーン製作、キセノン調達
 - ・第三年度：反ニュートリノ源撤去・キセノン導入で $0\nu 2\beta$ 探索開始、並行して地球ニュートリノ観測・革新技術開発
 - ・第四年度以降：20meV の感度での $0\nu 2\beta$ 探索 (5 年間)、地球ニュートリノ観測、革新技術開発
- その後、暗黒物質の季節変動検証 (2 年) ほかの極低放射能環境での観測を、可能な限り並行して、順次実施する。

4.2.5 実施体制

国内実施体制

- ・主な実務機関
 - 東北大学ニュートリノ科学研究センター：液体シンチレータ、高量子効率光センサー、集光ミラー、デッドタイムフリー電子回路、キセノン、地下施設運営などを担当
- ・その他のカムランドの運転や機器の開発・維持を担当する機関と担当内容
 - 東京大学 Kavli 数物連携宇宙研究機構：低放射能材料選別、キセノン純度測定
 - 大阪大学大学院理学研究科：低放射能測定、キセノン導入・回収
 - 徳島大学大学院ソシオ・アーツ・アンド・サイエンス研究部：NaI 結晶開発

国際協力

ローレンスバークレー国立研究所：高電圧電源、電子回路

カリフォルニア大学バークレー校：検出器校正装置

ワシントン大学、コロラド州立大学：デッドタイムフリー電子回路

カリフォルニア大学ロサンゼルス校：サイクロトロン反ニュートリノ源

テネシー大学、アラバマ大学：他二重 β 崩壊核種、校正線源製作

ハワイ大学：反ニュートリノ源設置

TUNL、デューク大学、ノースカロライナ中央大学、Nikhef（蘭）：カムランド運転

CEA Saclay（仏）：反ニュートリノ源製作・容器製作・輸送

KamLAND（地球ニュートリノ観測ほか）、KamLAND-Zen（ $0\nu 2\beta$ 探索）、Ce-LAND（第4世代ニュートリノ探索）、KamLAND-PICO（暗黒物質季節変動検証）の国際共同研究グループの連携で運営し、その他の極低放射能環境を必要とする研究計画とも連携を増やしていく。

4.2.6 学術コミュニティの合意状況等

本計画は、高エネルギー研究者会議や宇宙線研究者会議、物理学会などの将来計画に関するシンポジウム等で幾度となく報告され周知されている。これまでの高い実績と、研究テーマの重要性・競争力から、素粒子と原子核あるいは素粒子と地球科学などの境界分野を研究の主題にしているにもかかわらず、高エネルギー将来計画検討小委員会の答申でも取り上げられているほか、宇宙線研究者会議における中規模将来計画の評価でも「最優先で推す課題」との判定を得ており、コミュニティでの合意と強い推薦を得ている。

4.2.7 大学共同利用

全国共同利用・共同研究拠点ではないが、導入部の拡大により、多様な極低放射能環境を必要とする研究に対応できるため、共同研究を通して施設を提供することが考えられる。

4.2.8 プロジェクトの現状

前段階となる KamLAND-Zen が進行中であり、既に 320kg の ^{136}Xe を導入し世界最高感度を達成している。さらなる感度向上のために不純物除去を行うとともに、600kg 超の ^{136}Xe を調達しているが、逆階層構造をカバーする感度の実現には、分解能の向上が必要である。また、KamLAND においては、地球ニュートリノ観測による放射性地熱の測定に成功しており、地球モデルの検証が着実に進展している。分解能向上で必要となる開発においては、大光量液体シンチレータ、集光ミラーの開発が進んでおり必要な性能は確保できている。また、高量子効率光センサーはハイパーカムオカンデ計画と協調して行い、試作品での性能評価が始まりつつある。デッドタイムフリー電子回路はプロトタイプを製作し運用テストしており、開発の障害は見あたらない。これらの準備および成果は、特別推進研究「ニュートリノ観測装置カムランドを用いたニュートリノレス二重 β 崩壊の研究」および特別経費「ニュートリノ質量構造究明国際共同研究プロジェクト」で実施された。その他、第4世代ニュートリノ探索のための反ニュートリノ源においては、CEA Saclay で 1.5M ユーロが予算化され、製作準備に入っているほかタングステン容器の材料調達・設計が進行している。暗黒物質の季節変動検証のための高純度 NaI 結晶の開発においては、世界最高純度の結晶製作に成功しており、量産化のための開発を実施している。KamLAND は運転開始から 10 年以上が経過しており、耐用年数の観点からも刷新するタイミングであり、予算が付き次第開始できる準備状況にある。

4.2.9 天文学・宇宙物理学分科会からのコメント

計画の学術的意義

KamLAND2-Zen 計画の中核は既存の KamLAND 測定器の中心部にキセノン約 1ton を含有した液体シンチレータを入れたバルーンを設置し、このバルーン中のキセノンのニュートリノレス二重ベータ崩壊を探索するものである。もし、ニュートリノレス二重ベータ崩壊が観測されればニュートリノと反ニュートリノの同一性が証明されることになり、ニュートリノ物理学、あるいは広く素粒子物理学に与えるインパクトは極めて大きい。また、この計画では、ニュートリノの質量階層性がいわゆる逆階層性であれば確実にニュートリノレス二重ベータ崩壊を検出できる点も重要である。また非常にバックグラウンドの少ないシンチレータをもちいて地球ニュートリノの詳細観測によって、ウランとトリウムの分離測定を行い、地球始原隕石に関する知見などを得ることが期待される。また太陽の CNO 核融合サイクルからのニュートリノの観測の可能性も検討されており、これが達成できれば星のエネルギー生成に関する知見が大きく改善されると期待される。

経費、スケジュールの妥当性

既に KamLAND の装置本体があり、また KamLAND-Zen において KamLAND2-Zen のものより小さいものの中心のバルーンを設置したという経験があることから、経費とスケジュールの妥当性には概ね問題はないと考えられる。

技術成熟度

KamLAND2-Zen 計画では既存の KamLAND 測定器の中心部にキセノン約 1ton を含有した液体シンチレータを入れたバルーンを入れ、このバルーン中のキセノンのニュートリノレス二重ベータ崩壊を探索する。この際にニュートリノを放出する二重ベータ崩壊のバックグラウンドを十分除去するためにエネルギー分解能を改善する必要があり、高発光効率のシンチレータの使用、高量子効率の光電子増倍管の使用などを同時に行う。既に KamLAND 実験において測定器部分の技術的問題がないことが示され、更に KamLAND-Zen 実験にて KamLAND 中心部に別途、本計画に比べれば小さいものの、バルーンを入れて技術実証をしてきた。残念ながら予想されていなかったバックグラウンドがあったものの、既に世界最高のニュートリノレス二重ベータ崩壊の寿命の下限を得ている。またバックグラウンド源を同定してそれを取り除く作業も進行中である。

以上のように、技術的成熟度に関しては特に大きな懸念事項は見あたらない。ただし、同定したバックグラウンドを実際に除去できることを示すことは重要であり、一刻も早くバックグラウンドが大きく減ったデータを得ることを期待する。

計画実施体制の妥当性

計画実施体制については現状の KamLAND 共同研究が母体になる。日米の国際共同研究であるが、東北大学のグループが核となって強力にプロジェクトを遂行している。特に、このグループは既に着実に計画を実現してきていることから、実施体制についての不安は見あたらない。

学術コミュニティでの合意状況

KamLAND2-Zen 計画は宇宙線コミュニティの内部で検討されてきた。宇宙線コミュニティでは 2011 年から 2012 年にかけて 5 回コミュニティのタウンミーティングを開催して、主に中規模計画を中心に将来計画を議論してきた、その結果ガンマ線天文学を推進する CTA と共に「最優先に実現すべき計画」と位置づけられた。

共同利用体制の妥当性

本計画は、東北大学がホスト研究機関となって進める日米の国際共同研究である。天文学分野で一般的な望遠鏡などと違い、KamLAND2-Zen 装置での観測を公募するような形態ではなく、共同研究グループが共同で建設、運転、データ解析を行うスタイルである。共同利用体制についての評価は難しいが、個人研究ではなく、多くの研究者による共同研究という意味で適切と結論できる。

総合評価

KamLAND2-Zen 計画は、原子炉ニュートリノ振動と地球ニュートリノ観測で大きな成果をあげた KamLAND と、それをもとにしてニュートリノレス二重ベータ崩壊で世界最高の成果をあげた KamLAND-Zen 実験をベースに本格的にニュートリノレス二重ベータ崩壊を探索することを主目的にした計画である。ニュートリノレス二重ベータ崩壊はもし発見されれば、ニュートリノと反ニュートリノの同一性を示す真に画期的な発見となる。ニュートリノレス二重ベータ崩壊以外にも地球ニュートリノや太陽ニュートリノなど、複数の研究分野に関連し、多くの科学的成果が期待されるユニークな研究計画である。

研究グループでは、今までに着実に技術的実証と研究成果をあげてきており、KamLAND2-Zen もその延長線上の計画である。そのため、計画の実現性については大きな不安材料は見あたらない。また、共同研究グループもしっかりしている。あえて希望を言うならば、KamLAND2-Zen で多くの成果が期待され、その一方で国際競争が厳しいことをふまえ、日本国内での共同研究者をより増やす努力を期待したい。

4.3 ダークマター探索 XMASS

4.3.1 計画の概要

宇宙の物質・エネルギーの95%は未知である。27%は暗黒物質とよばれ、その存在は確実であるが正体は未だに不明である。その候補の一つは、新しい素粒子であるとされている。本計画は液体キセノンを用いて、暗黒物質が検出器内で反応した時に放出される蛍光を捉え直接観測する。計画されている検出器は世界最大であるとともに、暗黒物質探索のための検出器としては世界で最も低いエネルギーまで観測できる。最終目標は標的が10t、全体で25tの液体キセノンを用いて、暗黒物質の直接検出実験等を遂行することであるが、暗黒物質の探索は競争が激しく、緊急度も高い。そのため建設費用を抑えた比較的小型ではあるが世界最大となる標的1t、全体で5tの検出器を早期に建設し、暗黒物質の発見を目指すのが本中規模計画となる。

図4.2は本計画の持つ暗黒物質と核子との散乱断面積に対する感度を示す。図の横軸は暗黒物質の質量、縦軸は暗黒物質と核子との散乱断面積、実線は既存の制限を示す。本計画は既存の実験より10倍以上感度を向上し(黒点線)、暗黒物質の候補(色付領域)の発見能力を飛躍的に向上させる。質量の軽い暗黒物質に対しても、世界最高度の低エネルギー敷居値を武器に探索(灰色点線)を行う。検出器の質量が大きいことも有利な点であり、暗黒物質の信号に期待される季節に依存する変動も高い統計精度で捉えることが可能である。

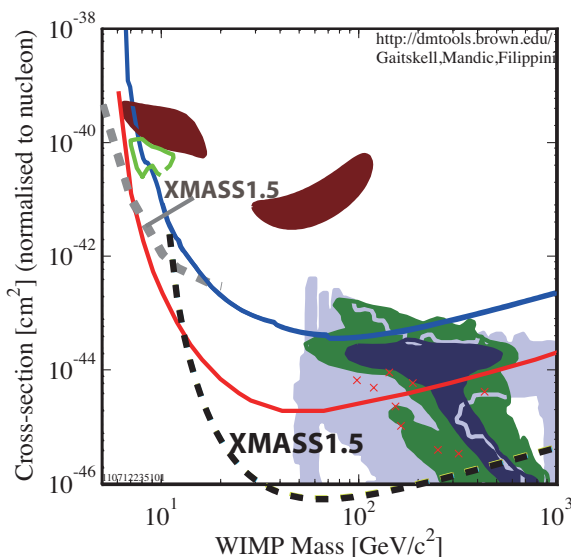


図4.2 XMASS 実験計画 (XMASS1.5 と表記) の持つ暗黒物質との散乱断面積に対する感度。横軸が暗黒物質の質量、縦軸は核子との散乱断面積を示す。黒点線と灰色点線が本研究計画の感度を示す。実線は既存の実験の感度(青 CDMSII, 赤 XENON100)を示す。色のついた領域は理論的に存在が予想される領域。

暗黒物質探索に必要な要素は、大型かつ低バックグラウンドである。本計画のキーとなる要素は、新型光電子増倍管である。現時点までに標的0.1tの検出器を建設・運転してきたが、壁面付近で生じる事象や、壁面に付着した放射性同位体などによる事象をより正しく同定する仕組みを加える必要があることがわかってきた。そこで本計画では凸型の光電面を持つ光電子増倍管を採用することとし、開発を行ってきた。すでに量産することは可能であるが、凸の大きさやその加工方法の最適化を進めているところである。さらに、低バックグラウンドを実現するために液体キセノン中の放射能等(クリプトン等を含む)や検出器内面の自然放射能(鉛210等)の低減に最新の技術を投入する。例えばクリプトンに関しては我々の開発した世界最高性能を持つ蒸留塔の技術を用いることができる。このようにこれまでの経験で

得た知識を一気に投入することにより必要な低バックグラウンドを達成し、世界最高感度の探索を行う。

本計画の特徴は、稀事象を探索する上記の目的に即して、将来のスケーラビリティが高いことである。これは液体キセノンのみを用いる 1 層型検出器と呼ばれるシンプルな装置の特徴である。本中規模計画での検出器建設に用いられる技術は、そのまま最終目標の検出器建設へ用いることができる点は将来に対する大きな強みである。例えば既存の 0.1t の検出器で実証されたのだが、暗黒物質探索のための検出器の中で単位エネルギーあたりの発光量が世界最高 (1keV あたり 14.7 光電子) であることは、検出のためのエネルギー敷居値が世界一低いことにつながっている。これにより軽い暗黒物質に感度が高いことが示され、そこで実証された性能を将来へ引き継ぐことが可能である。

なお、国内コミュニティで議論されている大規模計画の中で暗黒物質の直接検出を目標とするものは、本計画の最終目標となる検出器のみである。また、すでに標的 0.1t の検出器を建設・運転してきた経験があり、国内他計画にはない実績がある。国外で競合する実験としては XENON1t 実験がある。我々は 1 年ほどで設計、その後建設を予定しており、XENON1t 実験に先んじて成果をあげることが期待される。

本計画は、上記のような原子核反跳を生じる暗黒物質探索のみならず、太陽アクシオン、super-WIMPs 暗黒物質、超新星由来ニュートリノ等、広い物理対象に感度がある。これは当初の予定より豊富な研究対象であり、これら以外にも目的を限らず貴重なデータから得られる新しい物理現象の発見や探索にも力を入れてゆく。

4.3.2 科学的意義

本計画は、宇宙に関する未解決問題の中で、最も重要な問題の一つである暗黒物質の正体の解明にせまるものである。まず未知の素粒子としての暗黒物質の存在を明確に示すことは、暗黒物質の研究分野の中では最優先で進められるべきものの一つである。一旦暗黒物質が検出されれば、その質量や通常の物質との間の散乱断面積などを決定することができる。これらは素粒子としての性質を規定するために重要な情報となる。こういった情報を提供することができる暗黒物質の直接探索の学問的意義は大きい。実はすでに暗黒物質の信号を観測したと主張する実験グループが複数あり、大変興味深い状況となっている。これらは図 4.2 の左上の茶色の領域や、緑色で囲まれた領域などで示されている。また、図中色付きで示した理論的に予言される反応断面積を深く探ることができる感度を実現できる可能性が高くなってきたことも重要な点である。前者に対しては独立な実験としてより高い感度で検証を行うこと、後者に対して観測を行うことは世界的な競争になっており、高い緊急度と科学的意義を持つ。

暗黒物質の探索では宇宙空間や太陽内部等での対消滅と呼ばれる反応により発生する宇宙線やニュートリノの観測から間接的に捉えようとする試みも多くある。例えばスーパーカミオカンデなどによるニュートリノを用いた暗黒物質の間接測定がある。しかし直接探索においては、例えばキセノンの同位体組成などを人為的に変えて反応の違いを評価できるため、暗黒物質の性質をより詳しく調査できる等のメリットがある。

また、暗黒物質の探索においても、多様な可能性を追求する必要性が高まっている。上記のように探索の質量範囲が広いことは重要であり、また原子核反跳による探索のみならず電子に対してエネルギーを付与する可能性のある新しい素粒子に対する興味も広がっている。様々な可能性を探索できることは新たな科学的意義を付与する。

4.3.3 所要経費

本計画に見積もられた経費は総額 13 億円である。既存のキセノンや設備を最大限活用した見積もりを行っている。内訳は、(1) キセノン 3 億円 (不足分 3 トン)、(2) 光センサー 3.6 億円、(3) 電子回路 0.6 億円、(4) データ収集・モニター系 0.9 億円、(5) 容器 2 億円、(6) 配管等 0.9 億円、(7) 低温設備 1.5 億円、(8) その他 0.5 億円、である。

4.3.4 年次計画

2013年は検出器の基本的な設計を行い、新型光電子増倍管の最適化を通じ大量生産への準備を完了する。2014年には予算がつき次第光電子増倍管の大量生産を行い、平行して容器などの製作を業者に発注し製造に入る。2015年には建設を行い、運転を開始する。2016年には最初の暗黒物質探索結果を公表する。

4.3.5 実施体制

中心となる機関は、東京大学である。東京大学には既存の装置とユーテリティーがあり、宇宙線研究所と Kavli IPMU にある強力な暗黒物質の探索チームが中心となって計画を実施する。

国内実施体制

東京大学が実施体制の中心にあり、本検出器およびそれに関連するソフトウェアに第一義的な責任を持って推進する。東海大学、岐阜大学、宮城教育大学、横浜国立大学、名古屋大学、神戸大学などは、ラドンなどの測定、時間測定の研究など、個性に応じた実験研究の個々の部分を担当しつつ、全体の運用、データ解析等にも参加する。

国際協力

本計画には、韓国の Sejong University および KRISS が共同研究者として参加している。これら韓国グループは特に、小型の放射線ソースによる測定器の較正作業を担当する。

4.3.6 学術コミュニティの合意状況等

宇宙線研究者会議 (以下 CRC)、素粒子物理学・原子核物理学分野、天文学・宇宙物理学分野の研究者によりタウンミーティングや学術会議のシンポジウムなどによって評価され、合意が形成されてきた。CRC では学術的評価、緊急性、各分野での検討に対して最も高い評価が付与された。上記の他の分野でも提案の合意が得られている。

4.3.7 大学共同利用

本計画による研究は、全国の研究者の共同利用研究となる。本計画に参加した共同研究者のメンバーとして共同利用研究が行われる。

4.3.8 プロジェクトの現状

現在は本計画で提案している標的 1t、全体で 5t の検出器の詳細なデザインおよびシミュレーションを進めている。新型光電子増倍管については、最適化等、最終デザインを行っているところである。これらをふまえ、予算要求をすぐにも始められる状態となっている。

これらに平行して、0.1ton 検出器で得られたデータを用いたバックグラウンドの理解、解析手法の改良、それらによって得られる暗黒物質信号等の探索、そして改修を通じたさらなる低バックグラウンド環境の構築技術の習得等を進めている。なお、0.1ton 検出器で用いている放射線遮蔽用の水タンクやキセノンのハンドリングに用いられる装置やコントロールシステムなどはそのまま本計画に流用することができ、その分迅速に計画を進められることは特筆すべき点である。

4.3.9 天文学・宇宙物理学分科会からのコメント

計画の学術的意義

暗黒物質の存在は今やほぼ疑う余地のないほどに確立した科学的事実と言えよう。その正体を特定することは、宇宙物理学、素粒子物理学は言うまでもなく、現代科学の基本的な謎を解明するという第一級の意義を持つ。その意味において、本計画は世界的な競争のもとで、高い緊急度をもって推進されるべきものである。

経費、スケジュールの妥当性

経費は妥当ではないかと判断されるが、年次計画に関してはあまり具体性がなく、予算申請と合わせてより詳細な検討を積み重ねる必要がある。また、世界的な競争が激化している現状では、とにかく先んじるというのみではなく、それらの進行状況に合わせてどのような相補的な科学を展開して行くかも含めたロードマップが欲しいところである。

技術成熟度

バックグラウンドの低減が、本計画の成功の鍵を握るが、それに関する記述が弱い印象が否めない。その点をクリアできれば、より高い評価が得られるであろう。

計画実施体制の妥当性

すでに主体となるグループが明確である点は評価できる。

学術コミュニティでの合意状況

宇宙線研究者会議を通じて、学術コミュニティの間でその重要性は認識されている。

共同利用体制の妥当性

宇宙線研究所のグループが主体である事からも、共同利用体制に関する問題はないものと考えられる。

総合評価

本計画の学術的意義は高く、ぜひとも速やかに実行されることを期待する。そのためにはやはり、もっとも本質的であるバックグラウンド信号の低減化がどの程度具体的に可能であるのかを実証することが鍵となろう。現時点ではその点にやや説得力が弱いような印象を受ける。また、韓国のグループとの国際共同実験となっているが、その分担と協力関係があまり明確に記述されていない。もう少し積極的に国際協力の枠を広げるように努力する事も可能性として考えるべきではないか。

4.4 JEM-EUSO: 国際宇宙ステーション日本実験棟に設置する極限エネルギー宇宙天文台

4.4.1 計画の概要

地球を見下ろす「地文台」とも言うべき口径約 2.5m の広視野 (60 度) 望遠鏡を開発して国際宇宙ステーション日本実験棟に搭載し、直径約 400 km にわたる広範囲の地球大気における宇宙線空気シャワーの発光現象を一度に監視する極限エネルギー宇宙天文台計画を JEM-EUSO ミッションとよぶ。このミッションでは宇宙における最高のエネルギーをもった粒子の源とその発生機構を探索し、宇宙における基本的相互作用の限界を観測する。現在までに観測された宇宙線粒子の最高エネルギーは、加速器で到達できる最高エネルギー (約 10^{13} eV) を遥かに超えて 10^{20} eV に達している。このような極限エネルギー宇宙線がどこで生じ、どのようにして加速されたか、また、そのエネルギーに限界があるのか否かは、現代物理学の解明すべき大きな課題である。極限エネルギー ($E > 10^{20}$ eV) 粒子は、銀河磁場によってあまり曲げられずに、地球に到達するため、その到来方向から起源天体を特定できる。ミッション運用の最初の 3 年で、 5.5×10^{19} eV 以上のエネルギーを持つ粒子の観測事例は約 500 例に達し、到来方向解析によって起源天体を特定できる臨界量に至る。また大局的な異方性に関する正確で頑健な議論をするためには、JEM-EUSO が実現する全天にわたるほぼ一様な露出が肝要である。

JEM-EUSO は、宇宙からの空気シャワー観測という新しい観測手法を開拓し、人類未踏の観測に挑戦する。これにより、稼働中の地上の観測施設の限界を超えた観測領域の飛躍的拡大が実現される。望遠鏡は三大陸にまたがった 13 ヶ国の協力で製造する。

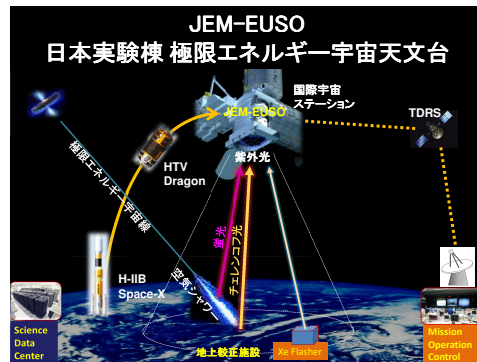


図 4.3 JEM-EUSO ミッション

4.4.2 科学的意義

JEM-EUSO は極限エネルギー (10^{19} eV $< E < 10^{21}$ eV) 粒子を用いた新天文学の開始を基本目的としている。宇宙で最高のエネルギーを持った粒子の起源と発生機構を探索する。このような粒子は、銀河磁場によって数度以下しか曲げられずにほぼ真直ぐに地球に到達するため、その到来方向から起源天体を特定できる。数百個の極限エネルギー粒子を観測したとき、その到来方向解析によって異方性を検出することで、その起源が明らかになる。例えば、近傍の活動的銀河核 (Cen-A や Virgo-A など) の方向に集中すれば、これらが線源である。もしくは超銀河面に弱く集中すれば、近傍の銀河が線源であることを示唆する。あるいは、まったく等方的な場合は、線源が宇宙論的な距離にあることを意味し、GZK 過程の存在を疑わなければならない。これらは、Pierre Auger 天文台の 10 倍以上の観測領域を持ち、南北天球に渡ってほぼ均一な感度を持つ JEM-EUSO で初めて可能になる。また、複数の天体が極限エネルギー宇宙線の

線源として同定されれば、線源同士のスペクトルの比較などにより、その加速機構が解明される。報告されているスペクトルの急峻化が理論の予測どおり GZK 過程によるものであれば、同定された天体の距離と急峻化の強さが強く相関するはずである。これにより GZK 過程の最終確認が可能になる。さらに、同定された天体の周りのより低エネルギーの事象の分布を調べることで、銀河磁場の分布と強度を推定できる。その他、極限エネルギーガンマ線やニュートリノの探査、相対論や量子重力効果の検証、夜光や大気内放電現象、流星などに関する発見的探査研究が可能である。

ビッグバン宇宙の証拠である宇宙背景放射が発見された 1965 年の翌年、地球に到達する宇宙線のエネルギーは 10^{20} eV あたりに、宇宙背景放射との相互作用による「上限」(GZK 限界)があると理論的に予測された。1990 年代前半になって、日本の AGASA 実験が定常的な観測を行っていた。しかしながら、有効検出面積が 100 km^2 程度では十分な事例数を得ることができず、確定的な結論に至らなかった。この状況を克服するため、Pierre Auger 天文台と Telescope Array 実験が現在運用中である。両者とも GZK 限界と矛盾しないスペクトルの急峻化を確認したが、最高エネルギー領域の宇宙線事象の検出数は、当初の想定に比べずっと少ない数に留まっている。また、米国コロラド州に建設が計画されていた北 Auger 実験は、米国での予算獲得ができずに、無期延期になった。この結果、飛躍的に統計量を上げられる JEM-EUSO の実現が強く望まれることとなった。国際宇宙ステーションの運用は、2020 年まで公式に延長された。さらに 2028 年まで運用延長が技術的には可能なことが確認されている。

4.4.3 所要経費

打ち上げ費用を除くミッション費用：約 180 億円（内、日本負担分約 60 億円）。日本は、ホスト国として、光学系 (10)、光電子増倍管 (5)、大気モニタ用レーザー (2)、望遠鏡の組立・試験 (10)、科学データセンター (3)、ミッション組み上げ・試験 (30) を担当し、ミッション経費約 180 億円の約 3 分の 1 を負担することが想定されている（括弧内の数字は日本負担分の概算。億円単位の内訳）。

4.4.4 年次計画

- 2014 年 Phase-B、基本設計、光電子増倍管製造開始、レンズ製造開始、レーザー基本設計
- 2015 年 Phase-C、詳細設計、光学系組立・試験、レーザー詳細設計・製造
- 2016 年 Phase-D、望遠鏡製造・組立・試験
- 2017 年 Phase-E、打ち上げ、科学データセンター運用開始
- 2017-2020 年 観測第一期
- 2020-2022 年 観測第二期

4.4.5 実施体制

国内実施体制

理化学研究所（全体取りまとめ、光電子増倍管、レンズ製作、レーザー、科学データセンター）、甲南大学（観測機器、Frontend ASIC）、埼玉大学（シミュレーション）、東大宇宙線研究所、大阪市立大学、東京工業大学（TA-EUSO 試験、較正装置）JAXA（ミッションとりまとめ）

国際協力

JEM-EUSO は 13 か国（日本、米国、フランス、イタリア、ドイツ、スペイン、スイス、ロシア、ポーランド、スロバキア、ブルガリア、メキシコ、韓国）が参加し、ほぼ対等な立場で協力して遂行する国際プロジェクトである。各機関の役割分担は以下のように合意されている：MSU-SINP（伸展機構、望遠鏡構造：ロシア）、INFN-ASI（焦点

面検出器：イタリア)、IN2P3-CNES (Frontend ASIC、校正システム、気球テスト観測：フランス)、Univeristy of Tuebingen (第2トリガ電子回路：ドイツ)、KIT (PDM 電子回路：ドイツ)、コロラド鉱山大学 (地上校正線源：米国) 梨花女子大 (第1トリガ回路：韓国)、UNAM (HK システム：メキシコ)、CSEM (レーザー偏向装置：スイス)、UAH-Spain (IR カメラ：スペイン) 等

ISS 参加宇宙機関である NASA、ヨーロッパ宇宙機関、ロシア宇宙機関、イタリア宇宙機関、フランス宇宙機関などが参加の予定。

4.4.6 学術コミュニティの合意状況等

日本国内においては、宇宙線研究者会議が2011年3月にまとめた「宇宙線分野の将来計画について」において、推進すべき計画とされた。2012年には、タウンミーティングが5回にわたって実施され、推薦すべきプロジェクトについての議論が行われた。その結果 JEM-EUSO は学術会議天文・宇宙物理分科会に推薦された。現在進めている TA-EUSO 計画、EUSO-Balloon 計画の進展により、JEM-EUSO で用いる検出器技術の検証が期待されている。

国際的には、ESA Fundamental Physics-Roadmap Team、The European ASPERA Roadmap、そして、OECD Global Science Forum、Astro-particle Physics International Forum (APIF) のいずれのロードマップにも組み入れられている。

4.4.7 大学共同利用

宇宙線および大気モニタデータは、一定の準備期間の後、科学データセンターを通して、データベースの形で学術コミュニティに公開することが計画されている。また、宇宙線観測に使えない満月期の一部については、特定の対象に絞った地球観測提案を公募する予定である。

4.4.8 プロジェクトの現状

理研は宇宙ミッションと国際プロジェクト遂行に実績のあるローマ大学トルベルガータ校の Picozza 教授を国際 PI に選任した。理研と甲南大学は、理研課題予算、学内基金、科研費等で準備研究を進めてきた。3枚のフレネルレンズ (中心部分 1.5m 径) を試作し、米国での性能検証で良好な結果を得た。これは、1m を超える大口径で、広視野と高い紫外線透明度をともに実現できることを示すものである。理研が試作した 64 画素光電子増倍管に、フランスが開発した読み出し ASIC と韓国が開発したトリガ回路を結合して動作を確認した。1m 角レンズと 36 個の光電子増倍管を使った望遠鏡を製作し、東大宇宙線研究所が主導して運用中の Telescope Array 実験サイトに設置し (2013 年 3 月)、電子ビーム光源を使った校正と空気シャワーの同時観測を行っている (TA-EUSO)。さらに、気球を使って 40km 上空から観測し、検出器の動作、紫外背景光の測定、空気シャワー検出を行う気球試験実験 (EUSO-Balloon 計画) が、フランス宇宙機関のもとで Phase-B 研究として進行中である。2014 年春に初回飛行を計画している。

日本では、2009 年 10 月に、国際宇宙ステーション・きぼう利用推進委員会において 2015 年頃の有望ミッションとして位置づけられた。米国チームは 2012 年 3 月に NASA の APRA 公募に提案書を提出し、評価委員会において高い評価を得て採択された。ヨーロッパにおいては、3つの委員会 (ESA Physical Science WG、ESA Astrophysics

WG、European Science foundation) で高い評価を得て、ELIPS (European Program for Life and Physical Science, ESA) 研究プールに組み入れられた。

4.4.9 天文学・宇宙物理学分科会からのコメント

計画の学術的意義

宇宙線のエネルギースペクトルは 10^{20} 電子ボルトまで延びている。そのような極高エネルギーの粒子がどのように生成されているのか、すなわちそのような粒子の加速天体の同定、その加速機構と伝搬過程の物理の解明をすることが JEM-EUSO の研究の目的である。

本学術分野では最近 10 年間に北半球の Telescope Array 実験と南半球の Pierre Auger Observatory の成功によって大きな進展が見られた。両実験によって $10^{19.5}$ 電子ボルト付近でエネルギースペクトルが急激に折れ曲がり、それ以上の宇宙線のフラックスが急激に小さくなっていることが確認された。データは宇宙線陽子と宇宙背景放射のマイクロ波との衝突によっておこると予想されていた現象 (GZK カットオフ) と矛盾ないが、このメカニズムでフラックスが急激に小さくなったと結論するには至っていない。またこれらの極高エネルギー宇宙線加速天体については同定されていない。JEM-EUSO によって極高エネルギー宇宙線の観測数を一桁以上改善して、これらの未解決の重要問題の解明が期待される。

経費、スケジュールの妥当性

2013 年に予定されている国際宇宙ステーションの「きぼう」暴露部の公募に応募し、採択されれば 2017 から 18 年頃の打ち上げが予定される。スケジュール的には、2013 年の公募に採択されれば、2017-18 年頃の打ち上げは可能であろう。ただし、大規模な国際共同研究によって装置の建設を予定しており、参加各国がほぼ同時に装置の建設費用を得て実機の製作に取りかかる必要があり、強力な推進組織のもとでスケジュール管理を徹底して行うことが必要と考えられる。

同様に、装置建設の経費総額が 180 億円と見積もられ、日本分担がその約 3 分の 1 であることから明らかなように、参加各国から建設経費をほぼ同時に得ることが求められる。この点をクリアするためには様々なレベルでの国際間の強い連携が不可欠であろう。

技術成熟度

JEM-EUSO を目指した開発研究は既に 5 年以上に亘って進められてきた。基本的な技術については、確認されつつあると言えよう。しかしながら本計画は地球大気中に入射した宇宙線が生成する空気シャワーの大気蛍光を宇宙から大立体角で観測する世界で初めての試みである。そのため様々な試験によって、その技術的実現性を証明していく必要がある。この点について、JEM-EUSO では実機と同じ技術をもちいたテスト機を製作して、Telescope Array 実験サイトでの Telescope Array との同時観測、また気球でのテスト観測計画などを進めている。これらの試験の予定通りの遂行と、その結果の実機へのフィードバックが重要である。

計画実施体制の妥当性

JEM-EUSO 計画は日本を含め世界 13 カ国、280 人の研究者 (2012 年 12 月の時点) が分担して装置を製作していく計画である。そして理研がプロジェクトとりまとめ機関として実機の製作を推進する必要がある。そのため、理研の役割は極めて重い。この役割を果たすため、理研の JEM-EUSO の推進組織をより強化・充実していくことが望まれる。

学術コミュニティでの合意状況

JEM-EUSO 計画は宇宙線コミュニティの内部で検討されてきた。宇宙線コミュニティでは 2011 年から 2012 年にかけて 5 回コミュニティのタウンミーティングを開催して、主に中規模計画を中心に将来計画を議論してきた。JEM-EUSO 計画は大型計画という方が正しいであろうが、日本の資金分担の観点から中規模計画として議論されてき

た。その結果 JEM-EUSO 計画は「今回は最優先とはしないが、展望を持って進めるべき計画」として、高位に位置づけられた。

共同利用体制の妥当性

本計画は、理研がホスト研究機関となって進める多国間の国際共同研究である。天文学分野で一般的な望遠鏡などと違うので、共同利用体制についての評価は難しいが、個人研究ではなく、多くの研究者による共同研究という意味で適切と結論できる。

総合評価

JEM-EUSO 計画は、極高エネルギー宇宙線が生成する空気シャワーの大気蛍光を宇宙から大立体角で観測することを主目的にした計画である。 10^{20} 電子ボルトに到達する極高エネルギー宇宙線がどのような天体でどのようなメカニズムで加速されるのかは大きな謎であり、JEM-EUSO によってこの問題の解決に向けた大きな進展が期待される。

JEM-EUSO 計画は日本を含め世界 13 カ国、280 人の研究者が分担して装置を建設していく大型計画である。日本の資金的な貢献は約 3 分の 1 とはいえ、日本はホスト国としてプロジェクト全体を取りまとめることが求められる。特に世界各国で製作した機器をまとめて JEM-EUSO として実機を組み上げて設計通りに動作させ、打ち上げ可能な状態を実現すべき理研のホスト機関としての責任は極めて重い。プロジェクトの遂行に問題のないよう、強力な体制を構築して JEM-EUSO を推進することを期待する。

4.5 CTA 国際宇宙ガンマ線天文台

4.5.1 計画の概要

高エネルギーガンマ線による宇宙の研究は、現在稼働中の地上チェレンコフ望遠鏡により、銀河系内外に 150 を超える多種多様な天体が発見され、ここ数年の間に大きく進展し、天文学のあらたな一分野を形成した。この分野の研究を飛躍的に発展すべく、日米欧を中心とする国際共同により、従来の装置の 10 倍の感度と広い光子エネルギー領域を観測できる究極的ともいえる高エネルギーガンマ線観測施設・チェレンコフ望遠鏡アレイ (CTA) の建設へ向けて準備をすすめている。CTA は北半球と南半球に設置される 2 ステーションから構成され全天観測を行い 1000 を超える天体の観測を可能とする国際宇宙ガンマ線天文台である。

北半球ステーションは 1km^2 に展開されたおよそ 30 基の望遠鏡群、南半球は 3km^2 に展開された 60 基の望遠鏡群から構成される。それぞれの中央部には大口径 23m チェレンコフ望遠鏡 4 基を配置し、その周囲に中口径 12m 望遠鏡、小口径 6m 望遠鏡を配置し、効率的に広いエネルギー領域の宇宙ガンマ線を高精度で観測する。CTA 南北のサイトは複数の候補の中から現在選考中であり、気象、地形、安全性などを総合的に検討し 2013 年末に決定する予定である。東京大学宇宙線研究所にサブデータセンターを設置し、このサブセンターを通して国内研究者にデータ、解析ツールを配布し、共同利用に供する。

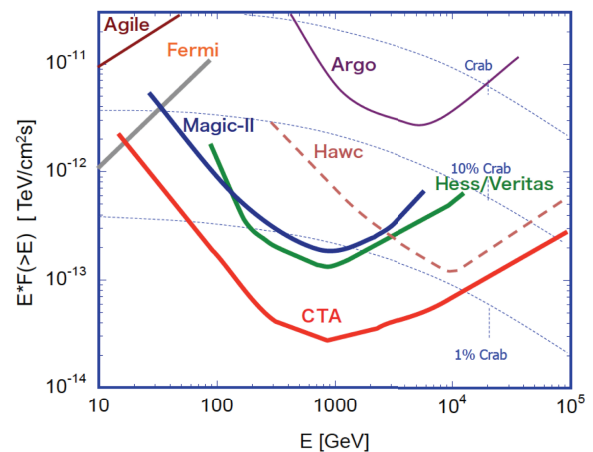


図 4.4 左図：CTA 国際宇宙ガンマ線天文台のイメージ。手前に見えるのが、23m 大口径望遠鏡。右図：CTA の設計感度曲線。従来の装置と比べ桁高い感度と、20GeV から 100TeV のエネルギー領域をカバーする。

4.5.2 科学的意義

CTA で観測される天体からのテラ電子ボルトの光子は、人類が作り出した史上最高の人工加速器 LHC による衝突エネルギーに匹敵、またはそれを超える。宇宙では驚くべき高エネルギー現象がさまざまな場所で起きている。CTA は感度の向上と、より広いエネルギー領域の観測により、多種多様な天体で起こる高エネルギー現象の高精度観測を行い、宇宙で起こっている非熱的物理現象、粒子加速の研究を行う。宇宙論や基礎物理学の探求として、宇宙を満たす暗黒物質を今までにない高感度、高精度で探索する。また、宇宙論的な距離を伝播する高エネルギー光子を使い、時間・空間の量子的な揺らぎを研究する。

CTA は 10 倍の感度向上とエネルギー帯域を 20GeV から 100TeV と拡げ、1000 を超える銀河系内外の天体を観測する。高エネルギーガンマ線による観測は赤方偏移 $z=4$ まで延び、宇宙ガンマ線の観測を宇宙論的なスケールにまで拡げる。活動銀河中心にある超巨大ブラックホールの進化、宇宙の構造形成・星形成史が明らかになる。また、銀河内のおよそ 200 の超新星残骸をすべてサーベイし、超新星残骸の宇宙線加速器としての進化、放出総エネルギー量を明らかにし、100 年来の大問題である宇宙線起源に決着をつける。また、銀河中心、近傍銀河団にハロー状に広がる暗黒物質崩壊・対消滅から放射される高エネルギーガンマ線を探索する。CTA は、人類の想像をはるかに超えた宇宙の極限的な姿を明らかにするとともに、宇宙の構成物質、時空間の量子的な振る舞いを従来にない高い精度で研究する。CTA の科学は、宇宙物理、宇宙論から基礎物理にわたり、その科学的意義は極めて高いといえる。

4.5.3 所要経費

CTA は、23m 大口径チェレンコフ望遠鏡 8 基、12m 中口径望遠鏡 40 基、6m 小口径望遠鏡 40 基からなり、予算総額 180MEuro(200 億円)と推定されている。日本グループ CTA-Japan は、望遠鏡アレイ中央部に位置し、CTA の要といえる 23m 大口径チェレンコフ望遠鏡 8 基の建設を主導的に行なう。

総額 200 億円 (日本分担 40 億円)

日本分担	内訳	個数	金額
23m 大口径チェレンコフ望遠鏡	主鏡	8 式	14 億円
23m 大口径チェレンコフ望遠鏡	光検出器	8 式	10 億円
23m 大口径チェレンコフ望遠鏡	電子回路	8 式	12 億円
他付帯部品、電子回路・輸送費・建設費			4 億円

4.5.4 年次計画

2013	サイト決定
2014	サイト準備開始
2015	望遠鏡エレメント製作開始
2016	プロトタイプ現地テスト、望遠鏡設置開始
2017	CTA の部分的運用開始
2020	CTA 完成
2020-2039	CTA 国際宇宙ガンマ線天文台として運用

4.5.5 実施体制

国内実施体制

日本グループ CTA-Japan は東京大学宇宙線研究所を中心とする大学連合、27 大学 92 名の科学者からなり、CTA の正式メンバー国として装置開発・デザイン・試作、サイエンスの検討を進めている。CTA-Japan の中心である東京大学宇宙線研究所は全国共同研究拠点・全国共同利用研として、CTA 計画を主として推進するとともに、共同研究者・研究者コミュニティの研究活動をささえ、かつ共同研究を進めている。CTA-Japan の主要な参加大学・研究機関としては、東京大学、京都大学、名古屋大学、青山大学、茨城大学、近畿大学、高エネルギー加速器機構、甲南大学、埼玉大学、東海大学、徳島大学、広島大学、山形大学等があげられる。

国際協力

CTA Consortium が実施機関・運用機関の中心であり、日米欧を中心とする 27 カ国 1000 名を超える科学者からなる。日本は、2008 年には CTA Design Study 覚書、2012 年には CTA DoI PCP (Declare of Interest in the

Pre-Construction Phase) に調印し、CTA の主要メンバー国として準備研究に活躍している。また、CTA-Japan の科学者から、CTA 大口径チェレンコフ望遠鏡建設プロジェクト責任者 (スポークスマン)、および、カメラ、電子回路、オプティックスのコーディネーター等の主要な任務を引き受け居ており、CTA Consortium の運営にも深く関わっている。

4.5.6 学術コミュニティの合意状況等

世界中の高エネルギーガンマ線天文学、また X 線、光赤外、電波天文、高エネルギー素粒子物理学、理論物理学を進める科学者が集まり、次世代の国際宇宙ガンマ線天文台として策定されたのが CTA である。CTA コンソーシアムは、27 カ国 1000 人をこえる研究者の組織からなる。欧州では、ESFRI(European Strategy Forum on Research Infrastructure), ASPERA (ヨーロッパ宇宙素粒子物理コミュニティ)、ASTRONET (ヨーロッパ天文宇宙コミュニティ)、また米国の Decadal Survey (10 年毎の天文宇宙分野のサーベイ)、さらには、国際機関である OECD の APIF において、高い優先度で推薦されている。国内では宇宙線研究者会議 (CRC) コミュニティーにおいて数年にわたり議論され、その諮問委員会である宇宙線将来計画検討小委員会の報告にて、CTA を「最優先で進める計画」として、高いプライオリティーで推薦している。

4.5.7 大学共同利用

CTA 国際ガンマ線天文台は、公開天文台として運用される。観測時間は、各国の建設・運用経費への貢献に比例して配分され、公募観測プロポーザルに従い観測がおこなわれる。日本グループはおよそ 20% の貢献を予定しており、およそ年間 200 時間 (北半球 200 時間/年、南半球 200 時間/年) の観測時間を得ることになる。CTA は完成後、国内的には東京大学宇宙線研究所の共同利用施設の一つとして位置づけられ、200 時間の観測時間の枠において共同利用に供される。また膨大な観測データ (Archival Data) は宇宙線研究所のサブデータセンターに蓄積され、共同利用者に供される。

4.5.8 プロジェクトの現状

CTA 計画は 2006 年に EC(European Commission) ESFRI のロードマップに採択、推薦される。その後、コミュニティでの議論を経て、2008-2010 年にかけて EU Design Study を完了し、現在 2010-2014 年の EU Preparatory Phase(予算 4 MEuro) の段階である。Preparatory Phase では、各国が技術開発のための予算を獲得し、各グループが準備研究を進めている。特に大口径望遠鏡の準備研究としては、ドイツ・マックスプランク物理学研究所が 4MEuro、スペイン・バルセロナ高エネルギー研究所が 1MEuro、CTA-Japan が特別推進研究 (高エネルギー宇宙ガンマ線による極限宇宙の研究、代表者：手嶋) 4 億円を予算化しており、プロトタイプ望遠鏡の建設を開始している。ドイツは望遠鏡構造体を、スペインは望遠鏡ドライブシステム、望遠鏡土台を、日本が光検出器、読み出し回路、望遠鏡鏡、Actuator をそれぞれ担当して、設計・製作をすすめている。

ドイツの CTA 建設予算は、マックスプランク協会 (MPG, MPI, MPIK)、ヘルムホルツ協会 (DESY)、BMBF(ドイツ文科省) の連合で総額 50MEuro が予定されている。すでに、マックスプランク協会の 2014 年からの予算化 (およそ 10MEuro) が 2013 年 7 月の時点で決定した。ヘルムホルツ協会、BMBF からの CTA 建設費も、今後 1 年以内に予算化されると期待される。

4.5.9 天文学・宇宙物理学分科会からのコメント

計画の学術的意義

CTA は、従来の地上高エネルギーガンマ線実験に対し、その感度を約 10 倍に、また対象エネルギー範囲を上端、下端とも約 1 桁近くに拡大することを目指す国際プロジェクトである。それにより、1. 銀河宇宙線の起源・加速・伝搬、2. 銀河内高エネルギー天体、3. 銀河系外からの高エネルギー宇宙線の起源・加速・伝搬、4. 銀河系外高エネルギー天体、5. 活動銀河 (AGN)、ガンマ線バースト (GRB) からのガンマ線を使った宇宙論、6. 銀河中心、矮小銀河、銀河ハロー、銀河団などからの暗黒物質の対消滅、崩壊ガンマ線の探索、7. プランクスケールでのローレンツ不変性のテスト、などの研究の進展が期待される。CTA の対象は、高エネルギー天体物理学の各分野ばかりでなく、宇宙論、素粒子的宇宙物理学にまで及んでおり学術的価値は極めて高い。

経費、スケジュールの妥当性

CTA 実験のタイムスケジュールは 2010 年までにデザイン設計を終了し、2010 年から 2014 年までは準備研究が進行中であり、2015 年に建設開始、2017 年に部分的な観測開始を予定している。総予算は南北サイト合わせて 1 億 9 千万ユーロ (2012 年の時点でおおよそ 200 億円) であり、日本はその約 20% である 40 億円の分担を目標にしている。全体として妥当な計画であるが、競争的資金の獲得、ホスト機関である宇宙線研究所からの概算要求による資金の獲得が必要である。

技術成熟度

望遠鏡は LST (Large Size Telescope)、MST、SST の三種類あり日本の担当の中核は LST であり、鏡および撮像カメラモジュール (光電子増倍管およびエレクトロニクス部分) を担当する。LST の要求仕様は最も厳しく、日本の技術的貢献が求められているが、技術的に極めて大きな開発要素はなく、日本の技術で十分遂行可能と考えられる。

計画実施体制の妥当性

CTA-Japan は東京大学宇宙線研究所を中心とする大学連合、27 大学 92 名の科学者からなり、CTA の正式メンバー国として装置開発・デザイン・試作、サイエンスの検討を進めている。宇宙線研究所は全国共同研究拠点・全国共同利用研として、CTA 計画を主として推進するとともに、共同研究者・研究者コミュニティの研究活動をささえ、かつ共同研究を進めている。しかし、望遠鏡及び検出器の建設、検出器部品のマスマプロダクション、およびデータ解析全般にマンパワー不足が懸念される。

学術コミュニティでの合意状況

CTA は世界中の高エネルギーガンマ線天文学、また X 線、光赤外、電波天文、高エネルギー素粒子物理学、理論物理学を進める科学者が集まり、次世代の国際宇宙ガンマ線天文台として策定された。日本においては、宇宙線研究者会議 (CRC) は 5 回のタウンミーティングを開催するなど将来計画を議論し、その将来計画検討小委員会は、CTA を「最優先で進める計画」として、高いプライオリティーで推薦している。

共同利用体制の妥当性

CTA は完成後、国内的には東京大学宇宙線研究所の共同利用施設の一つとして位置づけられ、200 時間の観測時間の枠において共同利用に供される。また膨大な観測データ (Archival Data) は宇宙線研究所のサブデータセンターに蓄積され、共同利用者に供される。妥当な体制である。

総合評価

CTA は日米欧を中心とする 27 カ国 1000 名を超える科学者からなるプロジェクトであり、日本は、主要メンバー国として準備研究に活躍している。宇宙線コミュニティが、1 年を越える議論を経て、学術的意義が高く、もっともプライオリティが高い計画として掲げているプロジェクトである。また、ホスト機関である宇宙線研究所将来検討委員会においても宇宙線研究所が中心となって推進していくべき計画としてトップに掲げられているものである。しかし一方で、全般にマンパワー不足を懸念され、本プロジェクトの推進、成功のためには宇宙線研究所のスタッフ体制構築も早急に行う必要があると思われる。さらに関係する大学研究室との連携のもとに、CTA で活動・活躍できる大学院生、若手の育成が必要であろう。

4.6 超高エネルギー宇宙線望遠鏡 TA2

4.6.1 計画の概要

宇宙線のエネルギーは、加速器で到達したエネルギー (4×10^{12} eV) を遙かに超えて 10^{20} eV に達している。宇宙線のエネルギーに限界があるのか、極高エネルギー宇宙線はどこで生成されて、どのようにして加速されたかは、現代物理学の大きな課題の1つである。

現在米国ユタ州に 507 台の地表検出器を 1.2km 間隔で設置し、約 700km^2 をカバーし、それを見込むように 3 箇所 に大気蛍光望遠鏡を建設したテレスコープアレイ (TA) 実験が稼働し、 10^{18} eV 付近以上の超高エネルギー宇宙線の空気シャワー観測を行っている。TA2 計画では、1 万台の地表検出器を 2.08km 間隔で設置し、現在のテレスコープアレイ (TA) 観測装置の 60 倍である 4 万 km^2 の超高エネルギー宇宙線望遠鏡を建設し、最高エネルギー領域 ($\sim 10^{20}$ eV) の宇宙線の空気シャワーを観測する。さらに地表検出器アレイ領域の視野をカバーするように大気蛍光望遠鏡を設置し (ハイブリッド) 観測を行い、エネルギースケールの確認および粒子識別を行う。最高エネルギー領域の宇宙線の統計量を飛躍的に上げて観測し、そのエネルギースペクトル、組成、到来方向を測定する。

最高エネルギー宇宙線は、銀河磁場・銀河系外磁場にあまり曲げられずに地球に到達するので、その到来方向を用いて起源天体を特定できる。現 TA の最初の 5 年間で 5.7×10^{19} eV 以上のエネルギーをもつ宇宙線による空気シャワー現象を約 50 事象観測しており、TA2 計画の最初の 2 年で到来方向解析によって起源天体を特定できる臨界量である約 1000 事象の観測が期待できる。異方性・点源探索を行い、最高エネルギー宇宙線の起源・宇宙極高現象を探り、荷電粒子による天文学を開拓する。宇宙線の粒子識別の情報を加えて、発生機構・伝播機構も解明する。

地上観測のメリットは高分解能でのエネルギー、到来方向の測定、粒子識別が可能であること、従来の測定器をインフィルアレイとして用いて同件事象の観測の相互比較によって、TA で確立したエネルギースケールを確認できること、最高エネルギー宇宙線の観測を低エネルギーの結果へスムーズに接続できることなどが挙げられる。その点で JEM-EUSO 計画とは相補的である。

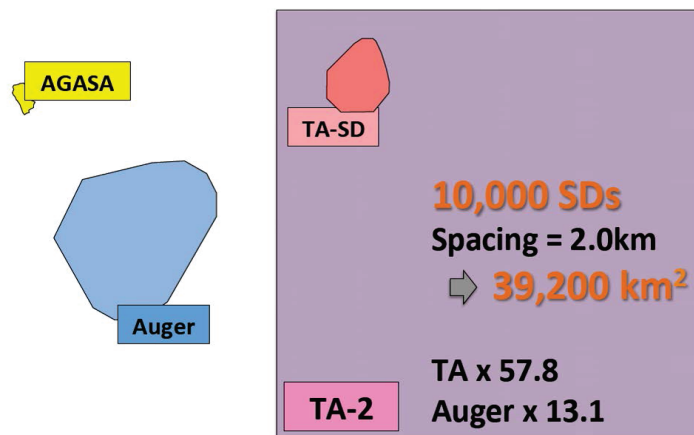


図 4.5 TA 2 : 紫色の四角形を TA2 とした場合に、TA の地表検出器 (桃色)、AGASA (黄色)、Auger (青色) の大きさを相対的に示す。

4.6.2 科学的意義

北半球の HiRes、TA、南半球の Auger において、GZK の理論的境界と矛盾しないエネルギー値付近以上で宇宙線フラックスの急激な減少を観測した。ただし、この減少がどのような過程で起きているかは、このエネルギー領域の

宇宙線の核種にも依存する。TA の大気蛍光望遠鏡による空気シャワーの縦方向発達の観測では、フラックスが急激に減少するエネルギー以下付近までは宇宙線の主成分は陽子であるという結果が得られているが、それ以上のエネルギーでは統計的に核種は分かっていない。TA2 では格段に観測の統計数を増やしてこの疑問を解決する。

また宇宙線の加速には上限があり、これによってフラックスの急激な減少が観測されている可能性がある。この急激な減少が、陽子宇宙線と宇宙背景放射光子による π 中間子生成反応の場合には、さらにエネルギーが上がるとスペクトルの傾きが緩くなる可能性があり、この測定も GZK 過程の重要な確認の一つである。たとえば加速限界が GZK 限界より十分高い場合には TA2 で 10 年観測して $10^{20.5}$ eV の加速限界を 6σ で棄却できると期待される。

超高エネルギーガンマ線、ニュートリノの探索によって、起源天体からのガンマ線、ニュートリノが観測される可能性があるとともに、GZK 機構で予想されるガンマ線、ニュートリノのフラックスが観測されれば、GZK 機構の確証となる。そのフラックスが GZK 予想より多い場合はエキゾチックな現象の可能性もある。

宇宙線フラックスの急激な減少が GZK 過程によるものであれば、GZK 限界以上のエネルギーの宇宙線の到来方向分布に大きな異方性が見られることが期待される。この限界エネルギーを超える宇宙線は遠方からは到来できず、起源天体は地球の近傍（100Mpc 以下程度のスケール）になければならず、宇宙の局所的な大規模構造に起因する異方性が見られるはずである。最高エネルギー宇宙線はほぼ直進するので、その到来方向から起源天体を特定できる。特徴的な天体があれば、その発生機構が解明できる。TA の観測では、宇宙の局所的な大規模構造および活動的な銀河核（AGN）との相関を調べると統計的には必ずしも有意ではないが、一様等方分布からのずれを示唆するような結果も出ており、TA2 による大統計での観測結果が期待される。また TA では宇宙線同士の到来方向の相関解析では、 2° 程度の小さなスケールでの有意なクラスタリングは観測されていない。起源天体密度が小さくないことを示唆しているが、TA2 では起源天体密度が 2×10^{-3} Mpc $^{-3}$ 程度の場合でも 3 年で 5σ 以上の優位性で一様分布からのずれを観測できると予想される。さらに、荷電粒子は磁場で偏向を受けるので、同定された起源天体の周辺のより低いエネルギー（と言っても 10^{19} eV 以上）の宇宙線の到来方向を用いて銀河磁場・銀河系外磁場中の伝播機構も解明できる。

4.6.3 所要経費

計画全体予算が 100 億円である。地上検出器が 90 億円で、大気蛍光望遠鏡が 10 億円である。日本負担分が 30 億円である。

4.6.4 年次計画

年次計画は以下のとおりである。

- 2009 年 4 月－2014 年 3 月 現 TA の運用（2013 年 5 月で 5 年 TA データ分を取得）
- 2014 年 4 月－2019 年 3 月 TA 運用継続を含んだ 4 倍 TA 計画（5 億円程度の科研費獲得を想定）
 - － 宇宙線データ統計の増加（TA で取得したデータと合わせて、2019 年 3 月までに 20 年 TA データ分取得予定）
 - － TA と Auger の結果の違いの解明
 - － TA2 装置の開発・試験
 - － TA2 サイト調査・サイト決定
- 早ければ 2019 年 4 月より TA2 の建設開始
 - － 平均して年に 2000 台の SD 製作、逐次設置、運用、較正を行っていくので、建設開始より 2 年目ぐらいから成果創出予定
 - － 5 年程度で装置完成
- 装置完成後 10～20 年運用

4.6.5 実施体制

日本では東京大学宇宙線研究所を中心機関とする体制を組み、TA グループと Auger グループの結果・経験を活かし、これまでのグループの枠組みを超えた世界的な協力体制を組んで進めていく。

国内実施体制

東京大学宇宙線研究所を中心として、現 TA グループを核としつつ、国内の共同研究者ネットワークを拡大して進めていく。主たる大学・機関は東京大学宇宙線研究所、大阪市立大学、東京工業大学であり、それぞれ研究全体統括、地表検出器、大気蛍光望遠鏡を担当する。

国際協力

日本欧州米国を中心とした世界各国の大学機関との国際協力によって本計画を実行し、大気蛍光望遠鏡および地表検出器の製作設置を分担する。海外の主な大学としては、カールスルーエ工科大学が地表検出器を担当し、ユタ大学とシカゴ大学は大気蛍光望遠鏡を担当する。なお、海外動向として 2012 年 2 月の CERN で、TA、Auger、HiRes グループ、その他が集まった超高エネルギー宇宙線シンポジウム (UHECR2012) で将来に向けた装置がいくつか提案された。

4.6.6 学術コミュニティの合意状況等

平成 24 年度に宇宙線研究者会議 (CRC) のシンポジウムで TA2 計画を発表し、コミュニティにおいて「展望を持って進めるべき計画」との評価を得た。今後新規科研費での 5 年の運用期間内で、エネルギースペクトルおよび質量組成に関する TA と Auger の結果の食い違いを解明し、宇宙線の統計を増やして、最高エネルギー宇宙線の起源の解明を進めつつ、次世代の測定器の開発・決定に対してフィードバックを行い、TA2 計画を進めるべきである、というコメントも受けた。

4.6.7 大学共同利用

参加する大学・機関の研究者は TA2 実験グループに所属し、実験の建設および装置の維持を担当しつつ、実験データを解析するという形で本プロジェクトが共同利用される。

4.6.8 プロジェクトの現状

TA と Auger グループの結果でエネルギースペクトルと質量組成の結果が違っている。また、TA は北半球を、Auger は南半球を主な視野としている。エネルギーに関しては Auger が開発した標準光源の大気蛍光望遠鏡による観測を TA サイトおよび Auger サイトで実施し、質量組成に関しては Auger の結果から予想される組成モデルを TA の解析を通してどのように見えるかの検討を行い、異方性に関しては両者のデータを合わせた全天解析を行い、2013 年の宇宙線国際会議で共同発表を行うなど、具体的な共同研究を始めた。測定器に関しては、TA と Auger グループなどがまずそれぞれ次世代測定器へ向けた提案を練り、それらを集めて近々国際ワークショップを開くことを考えている。それをもとに、今後 5 年で測定器の開発研究を行い、次世代の測定器を決定し、TA2 の実現を図る。

4.6.9 天文学・宇宙物理学分科会からのコメント

計画の学術的意義

およそ 10^{18} eV 以上の超高エネルギー宇宙線が天体起源であるのかどうかを調べ、天体ならばそこにおける加速機構と地球までの伝播について、その物理過程を解明することを通じ、宇宙線の起源という謎に迫るのが目的である。最近になって Auger 実験と Telescope Array (TA) 実験により、宇宙線スペクトルが $10^{19.7}$ eV 以上で宇宙マイクロ波背景放射のため急激な減少を示すはずであるという「GZK カットオフ」の存在は確立されたといえるが、 10^{20} eV を超えるまで達する宇宙線の加速機構とその組成（陽子か原子核か）は依然大きな謎のまま残されている。荷電粒子は銀河磁場で偏向を受けるため、起源天体の特定には統計的な議論が可能になる十分な数の観測例が必要であり、宇宙から広範囲に大気を観測して超高エネルギー宇宙線の統計を稼ぐ JEM-EUSO 計画が狙っているポイントはそこにある。しかし、宇宙からの観測では検出可能な宇宙線の最低エネルギーは高くなってしまい、低エネルギー側との連続性が弱まることに加え、宇宙線の組成を決めることは困難である。Auger North 計画が 2012 年に見送りとなった現状も鑑みると、次世代計画としてより広大な面積を覆う地上の精密観測装置の必要性が減じるものではない。

経費、スケジュールの妥当性

経費については現在稼働中の装置の建設経験をもとに算出されている数値であり、積算根拠は十分である。しかし、提案に示されている 2019 年に建設開始というスケジュールは、後述のような JEM-EUSO（2017 年打ち上げ、第 1 期観測 3 年間）後の精密観測という新たな位置付けを考えると、現実的には数年遅らせざるを得ないと思われる。

技術成熟度

現在稼働中の装置を拡張することを基本にしているため、技術的にはさほどの困難はないと考えられる。ただし、広域にわたり配置される装置の効率的な維持運営については、長期にわたり安定して観測を行う上での検討事項となろう。

計画実施体制の妥当性

稼働中の TA 実験のメンバーを中心に、日本・欧州・米国の国際協力グループとして構成されている。準備段階では妥当と考えられるが、実際に建設と観測運用の段階となれば、さらなる研究グループの増強が必要となるであろう。

学術コミュニティでの合意状況

この章の最初に述べられている CRC のタウンミーティングの第 3 回では、超高エネルギー宇宙線観測分野に絞った議論が行われた。計画の重要性が認識されるとともに、これらの議論は計画提案にフィードバックされ、JEM-EUSO 計画との関係が整理され、TA2 は JEM-EUSO の後を受けた精密観測であると認識されるとともに、TA の一部のメンバーが JEM-EUSO に参入するなどの協力関係も築かれた。タウンミーティングでの議論と平行して、CRC 将来計画検討小委員会で詳細な議論が行われ、2012 年 9 月の中間報告では「今回は最優先とはしないが、展望を持って進めるべき計画」とされ、2013 年 9 月の最終報告では、学術的評価 A、緊急性 A、各分野での検討 S という評価で、CRC から学術会議物理学委員会天文学・宇宙物理学分科会に報告された。

共同利用体制の妥当性

東京大学宇宙線研究所という全国共同利用研究所を中心に日本グループは組織されており、必然的に共同利用体制は確立されているといえよう。ただし、観測データの配布までは想定されていないようであり、解析後のイベント毎のデータなどを統計解析などに利用しやすいよう公開することを検討されたい。

総合評価

超高エネルギー宇宙線の起源を探ることは、宇宙線物理学の根本的な謎の解明を目指すことであり、今後も10年以上にわたり重要なテーマであり続けることは疑いない。しかし、この大規模なTA2計画が提出された後に既に情勢の変化があり、2013年5月の日本学術会議分科会公開シンポジウムと2013年7月の宇宙線国際会議では、中間的な段階とでもいうべき「TAx4」計画が提案されている。これは、Telescope Arrayを現在の4倍の面積に拡張するもので、60倍にするTA2計画の前に、小規模の予算で早期の実現を目指すものとして、CRC将来計画検討小委員会の最終報告書でも触れられている。JEM-EUSOやNorth Augerの状況にもよるが、いずれも国際協力実験であり、研究グループを超えた情報交換と計画のさらなる検討を行い、実現に向けた戦略を練ることが望まれる。

第 5 章

高エネルギー宇宙物理連絡会からの提案

5.1 議論のまとめ

高エネルギー宇宙物理連絡会(以降高宇連)とは、主に飛翔体を用いた高エネルギー宇宙の観測、およびその関連分野の研究者で構成される団体で、現在会員数はおおよそ 160 名である。観測の手段として、JAXA/ISAS の人工衛星・ロケット・気球や ISS などを利用し、必要であれば海外の衛星なども利用する。従って、高宇連の将来計画は、打ち上げ手段を持つ JAXA/ISAS, NASA, ESA などのプログラムとの整合性をとらねばならないという特殊性がある。

5.1.1 長期計画議論

2013 年 7 月現在、高宇連には将来計画委員会のようなものが常設されていない*1。これまでの将来計画の検討は、毎年一度開催される高宇連研究会、および宇宙科学研究所で毎年開催される宇宙科学シンポジウムなどを通して行ってきた。例えば 2012 年 3 月 28 日-30 日に開かれた第 12 回高宇連研究会は、「高エネルギー宇宙物理学の将来計画とサイエンス」と題して、将来計画に焦点を絞ったものであった。

2013 年 7 月現在、特に X 線天文学においては、ASTRO-H 衛星以降の明確な長期計画は、世界的にも存在しない。例えば、元々は XEUS 衛星と呼ばれていた日欧の将来計画は、米国の合流で IXO 衛星となり、再び米国が離れて Athena 衛星となったが、2020 年代初頭の L1 ミッションには採択されなかった。そこでさらに変更が加わり Athena+ となって 2020 年代後半の ESA L-2 ミッションを目指す、という変遷を繰り返している*2。高宇連の長期の将来計画は、このような国際的な情勢の変動に、必然的に大きく影響される。

5.1.2 中規模計画議論の経緯

2012 年 6 月、日本学術会議天文宇宙物理分科会より高宇連に対し、中規模将来計画立案の要請があった。そこで 2012 年 8 月 3 日に宇宙科学研究所にて、高宇連主催で、宇宙 X 線研究者間の将来計画検討会を開催した。その後、2012 年 8 月 6 日に、高宇連から会員に対して、中規模計画の公募を行った。この公募に対し、表 5.1 に示す 6 件の応募があった。

これらの応募に対し、高宇連歴代会長を中心にした 8 名からなる審査委員会を設置し、各計画に対して、2012 年 10 月に書類とヒアリングで審査を行った。評価の観点はこの 6 点である。(A) サイエンスが cutting edge 的か、(B) 技術や手法に独創性があるか、(C) 緊急性はあるか (e.g. 他波長の計画に照らして)、(D) 日本が世界をリードしているか (出来るか)、(E) 予算、マンパワー、時間の観点から feasible か、(F) 当該分野の全体戦略との間に、明確なビジョンがあるか。各計画に対する評価は表 5.2 の通りである。この評価の中では、大規模計画である ASTRO-H 衛星との関

*1 2013 年度中に発足予定である。

*2 2013 年 11 月に L2 ミッションが決定される予定

表 5.1 応募のあった 6 件の計画

計画名	主要機関	代表者	開発開始 FM 製作開始 運用開始	概要	手段
CAST	東大 JAXA	中澤和洋 (東大)	2008 2017 2020	半導体コンプトンカメラで MeV 領域初の全天探索、粒子 加速	ISS / 相乗 り
DIOS	首都大 名大 JAXA	大橋隆哉 (首都大)	1999 2014 2018	4 回反射鏡と TES カロリメー タで未検出バリオン WHIM 探索	小型衛星
FFAST	阪大 名大	常深博 (阪大)	2010 2013 2016	硬 X 線ミラーと編隊飛行で硬 X 線の広天査、CXB の起源	小型衛星
Hi-Z GUNDAM	金沢大 JAXA 東工大	米徳大輔 (金沢大)	2012 2015 2019	High Z の GRB を検出し X 線で位置決め、赤外線ですら 追跡	小型衛星
PolariS	阪大 JAXA 山形大	林田清 (阪大)	2009 2015 2018	硬 X 線ミラーとトムソン散乱 偏光検出器で初の X 線偏光観 測	小型衛星/ 相乗り
WF-MAXI	東工大 JAXA 理研	河合誠之 (東工大)	2012 2014 2017	MAXI の改良。同時に見える 軟 X 線視野を広げ GRB を検 出	ISS

表 5.2 各研究計画に対する評価

計画名	ASTRO-H との相補性	既存技術活用	マンパワー
CAST	AH が感度を持たない $E > 600\text{keV}$ をカバー	AH コンプトンカメラを転用	やや厳しいが拡大可能
DIOS	広視野で、狭視野 AH と相補的	AH 冷凍機技術を転用	厳しいが国際協力有り
FFAST	広い領域をカバー。AH と若干重複	AH 硬 X 線ミラー、CCD を転用	やや厳しい
Hi-Z GUNDAM	広視野で突発現象を探索。相補性高。	—	独立遊撃隊で進む
PolariS	AH は偏光検出感度低。相補性高。	AH 硬 X 線ミラーを転用	米国との協力が可能
WF-MAXI	広視野で突発現象を探索。相補性高。	MAXI 技術の継承	やや厳しい

連についても言及している。

これらの中から、以下の理由で、最優先で進めるべきプロジェクトとして、DIOS、PolariS を選出した。

DIOS 4 回反射の広視野 X 線ミラーと無冷媒の冷凍機を用いたカロリメータ（新規開発の TES）により、広視野と高エネルギー分解能を実現し、未検出バリオンの筆頭候補である Warm Hot Intergalactic Medium (WHIM) の検出を目指す。この科学目的は、宇宙物理学に対して、トップレベルの重要性を持つと言える。また、Post ASTRO-H ミッションに発展的につながる可能性もあり、一定の緊急性も持つ。ただし、重量、電力、マンパワー、技術開発スケジュールなどが懸念材料である。

PolariS X 線偏光検出は、X 線天文学で未開拓の分野であり、X 線偏光検出技術の研究者が日本には多い。X 線偏光検出は、日本が開拓すべき方向の一つである。ところが、同じく偏光検出を狙った米国の計画 GEMS が突然キャンセルになった。GEMS には、理研・名大が鍵技術を持って参加していた。GEMS の成果を PolariS が受け継ぐという図式が崩れ、PolariS 開発と GEMS 復活を同時に進めざるを得なくなった。そこで高宇連では、この緊急の動きをサポートすべきと判断し、PolariS と日本の GEMS 関係者に対し、両者を融合させるべく交渉を進めることを奨励した。

CAST, FFAST, Hi-Z GUNDAM, WF-MAXI は、最優先とすべき課題にはならなかったが、いずれも中規模計画として価値の高いミッションであると評価された。

5.2 広天域突発 X 線天体監視 WF-MAXI

5.2.1 計画の概要

WF-MAXI (広天域 X 線監視装置) は、短い X 線トランジェント現象の発見と位置即時通報を目的とする宇宙ステーション搭載ミッションである。その最大の目標は、2018~20 年ごろに初めて直接検出されると期待される天体重力波現象に対して、電磁波対応天体を見つけることである。この重力波初検出が期待される 2010 年代末に間に合うように最短で運用を開始するため、既存の技術を最大限活用して開発するとともに、すでに運用されている国際宇宙ステーション日本実験棟「きぼう」曝露部を搭載プラットフォームとする。

他のミッションとの関係： 現行のトランジェント探索ミッションである MAXI と Swift 衛星は重力波検出が可能になる時期以前に寿命を迎えるため、代替ミッションが是非とも必要である。さらに、WF-MAXI は監視天域が広く (MAXI の 10 倍、Swift の 2 倍)、超新星や中性子星連星合体で予想される軟 X 線放射に対して今までで最大の感度をもつ。海外の 2020 年までの計画で、これほどの広視野と軟 X 線感度を持つものはない。

観測装置： 主観測装置である 軟 X 線大天域カメラ (SLC) は、0.7–10 keV に感度を持ち、全天の 20% を常時観測して突発 X 線源の位置を 0.1° の精度で速報する。MAXI/SSC (CCD スリットカメラ) および ASTRO-H/SXI (軟 X 線撮像カメラ) の国産 CCD および冷却技術を最大限活用し、CCD アレイに符号化マスクを組み合わせる。副検出器である 硬 X 線モニター (HXM) は、CsI シンチレーターを APD で読み出し、20 keV–1 MeV の硬 X 線～軟 γ 線の強度とスペクトルを計測する。東工大で開発したガンマ線バースト偏光観測用超小型衛星 TSUBAME (2014 年打上予定) 搭載ガンマ線バースト監視装置 WBM のシステムを継承して大型化する。さらに、補助センサーとして、星姿勢計と時刻参照用 GPS 受信機を搭載する。バス部は既開発の「きぼう」曝露部ミッションである MAXI と CALET の技術資産を継承して開発する。きぼう曝露部ミッションとしての機器配置の検討例を図 5.1 に示す。

他の大規模計画との関係： 最も重要なのは、建設が進められている重力波望遠鏡 KAGRA との協調である。位置決定能力の乏しい (誤差領域 $\approx 100 \text{ deg}^2$) 重力波観測が天文学・天体物理学となるために必要とされるのが WF-MAXI ミッションである。WF-MAXI によって誤差領域を数分角以下に狭め、すばる、EVLA、ASTRO-H、JWST、TMT 等の大望遠鏡による観測を可能にする。また、銀河系近傍の超新星が重力波源の場合にはスーパーカミオカンデ等のニュートリノ観測との連携も非常に重要である。

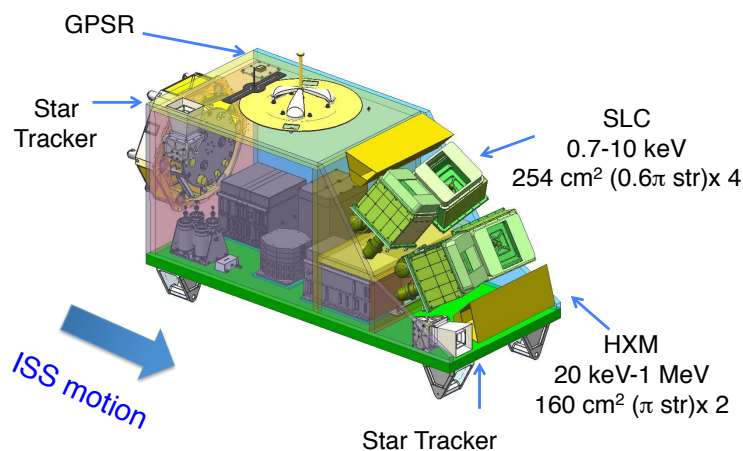


図 5.1 WF-MAXI の観測装置の配置検討の一例。国際宇宙ステーションの日本実験棟「きぼう」の曝露部ミッションとして概略検討を行った結果の一つである。軟 X 線広天域カメラ (SLC) 4 台、硬 X 線モニター (HXM) 2 台、星姿勢計 (Star Tracker) 2 台、GPS 受信機 1 台、電源、データ処理装置、熱制御系が搭載されている。

5.2.2 科学的意義

KAGRA の重力波検出を天体物理学に結びつける： ついに重力波望遠鏡 KAGRA の建設が始まり、数年以内の重力波初検出が確実となった。目標感度が達成されると中性子星連星合体による重力波は年間 10 個という頻度で検出される。重力波が検出された中性子星連星の距離を独立に知ることができると、(1) 重力波発生と伝搬に関する一般相対性理論の検証、(2) 中性子星の大きさや質量の測定に基づく中性子物質の状態方程式の解明、(3) ブラックホール形成の機構、(4) 合体後に飛散する中性子星物質からの r 過程元素合成、(5) ショート GRB の放射機構、などをはじめとする基礎物理学および天体物理学の画期的な研究が可能になる。しかしながら重力波そのものの到来方向決定精度は極めて低い（誤差領域面積 $\approx 100 \text{ deg}^2$ 、しかも全天に散らばる）。発生源の位置を正確に決定し、既知の天体と関連づけるためには、X線・可視光等の広天域観測により、重力波と同時に発生するトランジェントの検出が不可欠である。さらに、天体観測の歴史上、新しい観測の窓が開くたびに予想を超えた天体や現象（たとえば電波パルサー、ブラックホール X 線連星、ニュートリノ振動など）が発見されたことを考えると、重力波事象が検出された場合、その源を明らかにし、物理を理解するためには重力波以外の確立された方法で発生源を直ちに明らかにする必要がある。

対応天体探索における X線・ γ 線の重要性と利点： 突発的な重力波の発生が期待されるのは、中性子星連星の合体や、恒星の重力崩壊など破局的な天体現象であり、必然的に重力波とともに様々な形態のエネルギーが放射される。特に重力波放射の原因となる激しい質量の動きのエネルギーは、ガンマ線バーストで観測されるように、衝撃波を形成して電波から X線にわたる広い波長域で放射されることが物理学的必然として予想される。中性子星連星合体起源の可能性が高いショート・ガンマ線バーストの一つ GRB050709 ($z=0.16$ の銀河で発生) からは、1 秒足らずの γ 線放射に加えて 100 秒間の軟 X線放射と数日にわたる可視光残光が検出されている (Villasenor et al. 2005, Fox et al. 2005)。この GRB を 280Mpc の遠方（中性子星連星合体による重力波の観測限界距離）に置くと、100 秒間続いた軟 X線放射は「かに星雲」の 7 倍という強い強度になる。放射異方性などの要因で強度が 1/100 に弱くなったとしても、これは本研究で開発する有効面積 100 cm^2 程度の比較的小さな X線監視装置で十分に検出・位置決定可能である。WF-MAXI は 0.1° の精度で X線トランジェントの位置を決定して全世界に速報することによって、可視光望遠鏡あるいは X線望遠鏡による詳細観測へ橋渡しし、距離の決定と発生環境、母天体の同定へ導く。また、運良く銀河系内または近傍の超新星が発生すれば、ニュートリノ観測とも連携して、超新星の非対称爆発の機構解明に寄与する。重力波検出から電磁波による重力波源の同定までの手順を図 5.2 に示す。

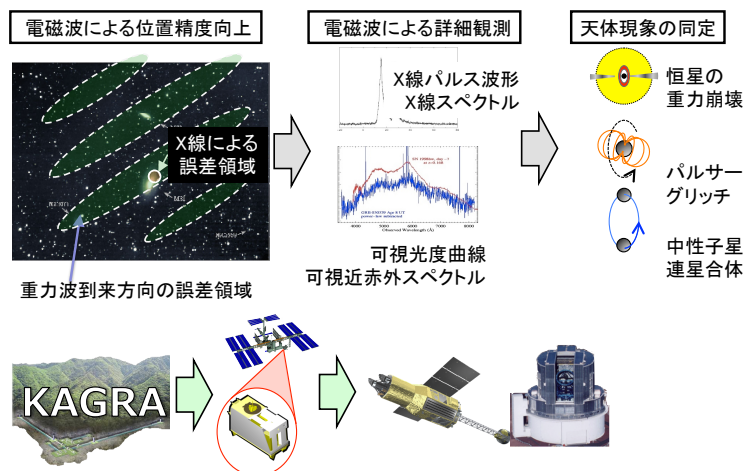


図 5.2 重力波検出から X線による位置精度の改善、可視光や X線の大型望遠鏡の追跡詳細観測による母天体と発生環境の解明、そして重力波発生源の同定へのシナリオを示す。

5.2.3 所要経費

基礎開発のために、科研費（新学術領域「重力波天体の多様な観測による宇宙物理学の新展開」計画研究「重力波天体からの X 線・ γ 線放射の探索」平成 24 年～28 年、総額 194 百万円）を獲得済みである。ISS 搭載品の開発経費は約 32 億円（天体観測装置 12 億円、バス部とデータ処理装置 20 億円）、運用経費は 5 億円（年間 1 億円×5 年間）と概略推定している。この他に HTV による ISS への輸送費用が必要である。海外からの寄与は現時点では想定していない。

5.2.4 年次計画

2012 年 ミッション全体の概念設計開始、バス部基礎的検討開始
2013 年 観測装置 (SLC, HXM) 試作品設計・製作、バス部基礎的検討
(2013 年? きぼう曝露部ミッション公募発出、応募。)
2014 年 観測装置試作品試験・搭載品設計、バス部搭載品設計
2015 年 観測装置搭載品製作・試験、バス部搭載品設計・製作
2016 年 観測装置試験、システム総合試験、運用ソフトウェア開発
2017 年 観測運用開始

5.2.5 実施体制

現行の MAXI チームを中心とし、さらに ASTRO-H/SXI および超小型衛星のチームメンバーが加わって WF-MAXI の開発チームが構成されている。参加機関と担当は次のとおり。

- ・全体の統括 東工大
- ・軟 X 線大天域カメラ JAXA・阪大（センサー、冷却系、回路）、工学院大（遮光）、理研（符号化マスク）
- ・硬 X 線モニター 東工大（センサー、回路）
- ・観測・解析ソフトウェア 理研・青学大・日大・京大
- ・バス部 JAXA（熱・構造、電源、姿勢、データ処理系）

5.2.6 学術コミュニティの合意状況等

高宇連、天文学会、ISAS 宇宙科学シンポジウム等においてミッション提案を発表し、X 線天文学コミュニティで議論を重ねてきた。さらに、2012 年より新学術領域「重力波天体の多様な観測による宇宙物理学の新展開」として、X 線 γ 線天文に加えて、光赤外天文学、ニュートリノ物理学、重力波観測、重力理論、高エネルギー天体理論を擁する分野横断型の研究コミュニティを立ち上げ、2 ヶ月ごとに研究会を行なって重力波天体観測の研究戦略を練り上げている。

5.2.7 大学共同利用

現行の MAXI や Swift 衛星同様に、WF-MAXI が独自に検出した X 線突発天体の位置情報と光度曲線は迅速に（最短～10 秒）でウェブやメールなどの手段で制限なく公開する。それ以外のデータもアーカイブ化して公開する。

5.2.8 プロジェクトの現状

科研費（新学術領域）によりミッションの基礎的検討、および観測装置の基礎設計・試作を 2012 年度から開始した。ISS「きぼう」曝露部ミッション公募に向けて提案書を作成するために、基礎的な検討をメーカーとともに進めている。

5.2.9 天文学・宇宙物理学分科会からのコメント

計画の学術的意義

重力波望遠鏡 KAGRA の建設が始まり、数年以内に重力波が発見されるのが予想される状況で、重力波と同時に発生すると考えられるトランジエント X 線源の検出が最大の目標となる。このトランジエント X 線源の同定は、重力波源の同定につながりその科学的意義はたいへん大きいことになろう。MAXI の後継として、重力波を伴わない各種 X 線源の観測に対しても、突発現象の発見や長期変動の監視等に成果をあげることが期待される。

経費、スケジュールの妥当性

すでに科研費により基礎開発のための二億円近い資金が用意されていることは評価でき、技術的な面での、搭載品開発経費、開発スケジュールの見積りに大きな無理はないと思われる。

技術成熟度

観測装置としては、大きな新規開発部分はないと思われ、実現可能な範囲にあると思われる。ISS 搭載やそのインターフェイスに関わる部分についても MAXI の経験が活かされるものとする。

計画実施体制の妥当性

現行の MAXI チームを中心とした開発チームが構成されており、我が国の高エネルギー天文学グループの中で、次期 X 線天文衛星 Astro-H 開発への関わりが比較的ゆるい人員が主力になっている。

学術コミュニティでの合意状況

高エネルギー宇宙物理学コミュニティの中で、ミッション提案がなされ、議論が重ねられてきている。現状では、高エネルギー宇宙物理学グループ関係のいくつかの中規模計画の中で、最優先のものとは見なされていないが、価値の高いミッションと評価されている。

共同利用体制の妥当性

現行の MAXI の運用を通じて、X 線突発天体情報の世界の研究者への迅速な通報や、データのアーカイブ化とその公開について、十分な経験を積んでおり、共同利用体制への備えは問題ないと評価する。

総合評価

初検出が期待される重力波観測体制の立ち上がりに合わせて、重力波源に対応するトランジエント X 線源の観測を行う体制を用意することの重要性は高い。MAXI の後継機としても、新規突発現象の発見や通常の X 線源モニター観測において、着実な成果をあげることが期待される。

5.3 ダークバリオン探査衛星 DIOS

5.3.1 計画の概要

DIOS (Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor) は、数 100 万度という中高温の銀河間物質として、宇宙の大構造に沿って分布すると考えられているダークバリオンを、赤方偏移した酸素輝線でマッピング観測することを目指す計画である。多くのバリオンの存在形態を確認するだけでなく、銀河間物質を調べることで、宇宙の熱史と構造形成の歴史を知ることができる。星や銀河の形成とは異なった角度から宇宙の進化を知るという意味で、ダークバリオン観測の意義は大きい。DIOS の観測系は、広視野軽量X線望遠鏡、TES カロリメータ、無寒剤の冷凍機からなり、ダークバリオン以外にもさまざまなスケールの高温ガスダイナミクスの観測が可能である。2018 年ごろの打ち上げを目指して、2013 年に予定される小型科学衛星へのミッション提案へ向け準備を進めている。

2012 年度には、高エネルギー宇宙物理学連絡会によるミッション評価で最高の S 評価を受け、引き続き日本学術会議の天文学・宇宙物理学分科会が推薦する 8 件の計画の一つとしてマスタープランへ提案されている。

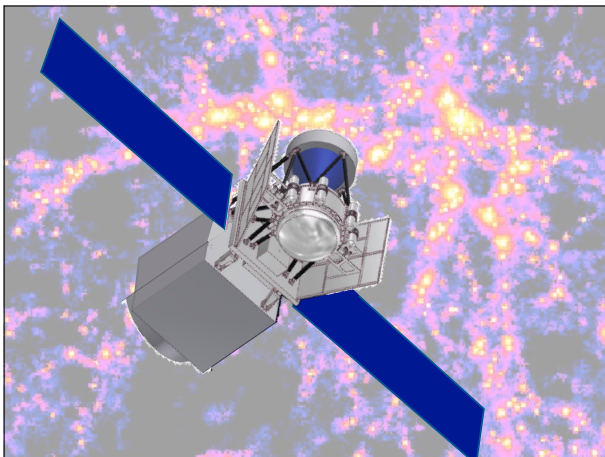


図 5.3 DIOS 衛星の想像図。太陽電池パドルの差し渡しが約 6 m。

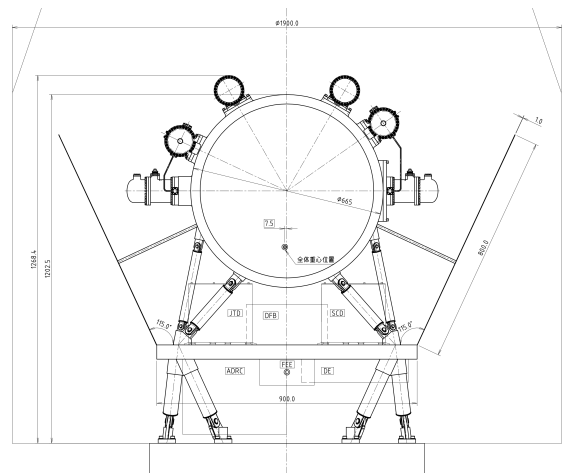


図 5.4 検討中の DIOS のデューアを正面から見た図。胴体の直径が 66.5 cm、放射板に角度がつけられている。

5.3.2 科学的意義

DIOS の最大の目的はダークバリオンの検出である。バリオン (陽子、中性子などでできた通常物質) の半分以上は、現在の宇宙で未検出となっており、温度 100 万度ほどの中高温銀河間物質 (Warm-Hot Intergalactic Medium: WHIM) として宇宙の大構造に沿って分布すると考えられている。DIOS は、50 分角の広視野と $\Delta E < 5$ eV という高いエネルギー分解能の X 線観測で、赤方偏移した酸素輝線をマッピングし、WHIM の分布を探る。宇宙の平均密度の 100 倍を超えるガスはほぼ検出可能であり、OVII, OVIII からの 2 つのラインにより 1 平方度あたり 100 をこえるラインペアを検出することでダークバリオンの数 10% を検出できる (Yoshikawa et al. 2003, PASJ 55, 879; Takei et al. 2011, ApJ 734, 91)。DIOS はまた、ASTRO-H SXS の数 100 倍という視野立体角により、宇宙に存在するさまざまなスケールのプラズマのガスダイナミクスを明らかにすることができる。銀河系内の高温ガス、超新星残骸、スターバースト銀河などのほか、地球磁気圏や太陽系天体からの電荷交換 X 線も新たな対象となる。

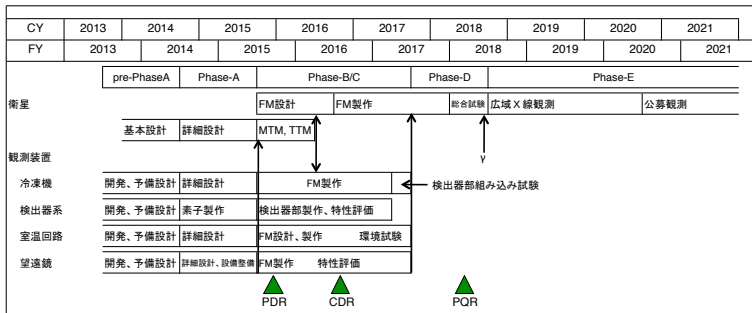


図 5.5 DIOS の年次計画。2018 年の打ち上げを予定している。

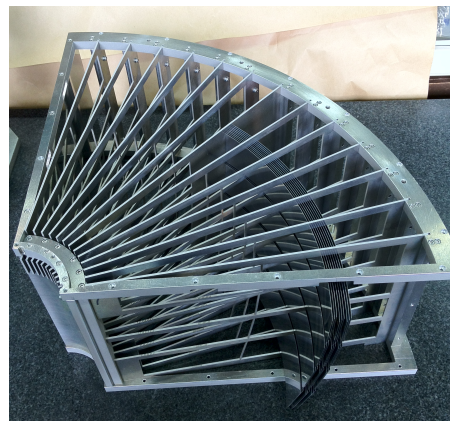


図 5.6 口径 60 cm の 4 回反射 X 線望遠鏡の 1/4 分割部の新しいハウジング。4 段一体型アライメントプレートが用いられている。

5.3.3 所要経費

現段階での所要経費としては、打ち上げ費用 30 億、衛星バス 25 億、ペイロード全体として 26 億円を見込んでいる。ペイロード費用のうち 10 億円は国際協力によって海外（米国、オランダ、イタリア）の負担を考えている。海外負担分としては、TES カロリメータ、断熱消磁冷凍機、データ処理回路が主たる内容として検討を進めている。

5.3.4 年次計画

DIOS の年次計画を図 5.5 に示す。2014 年に小型科学衛星 3 号機として選定されることを想定したスケジュールとなっている。打ち上げは 2018 年である。フライトモデルの製作が 2015 年の末からであり、マンパワー的にも ASTRO-H との重複は避けられる計画である。DIOS の観測としては、ダークバリオンのサーベイ（5 度× 5 度の領域）に 2 年を要し、その他の銀河団、銀河、超新星残骸等の観測に 3 年を予定している。

5.3.5 実施体制

国内実施体制

国内の実施機関と主たる役割は下記の通りである。計画全体は首都大の大橋が代表であり、ペイロードの製作は、首都大と宇宙研が TES カロリメータシステムを、名古屋大学が X 線望遠鏡を責任担当している。

氏名	(所属)	担当と役割
大橋隆哉	(首都大学東京)	計画全体 責任者 (研究代表)
田原 謙	(名古屋大学)	X 線望遠鏡責任者 (副代表)
山崎典子	(JAXA 宇宙研)	衛星システム 責任者 (副代表)
石崎欣尚	(首都大学東京)	検出器システムとりまとめ
江副祐一郎	(首都大学東京)	X 線検出器、検出器冷却系
三石郁之	(首都大学東京)	X 線検出器、検出器冷却系
小波さおり	(首都大学東京)	X 線検出器、検出器冷却系
佐々木 伸	(首都大学東京)	観測計画、シミュレーション
満田和久	(JAXA 宇宙研)	衛星システム、検出器冷却系
竹井 洋	(JAXA 宇宙研)	観測計画、X 線検出器
石田 学	(JAXA 宇宙研)	X 線反射望遠鏡、光学ベンチ
古澤彰浩	(名古屋大学)	X 線反射望遠鏡
桜井郁也	(名古屋大学)	X 線反射望遠鏡
杉田聡司	(名古屋大学)	X 線反射望遠鏡
藤本龍一	(金沢大学)	X 線検出器、検出器冷却系
米徳大輔	(金沢大学)	X 線検出器、検出器冷却系

氏名	(所属)	担当と役割
須藤 靖	(東京大学)	観測計画 責任者
河原 創	(東京大学)	観測計画、シミュレーション
山田真也	(理化学研究所)	X 線検出器、検出器冷却系
石川久美	(理化学研究所)	X 線検出器、検出器冷却系
篠崎慶亮	(JAXA 研開本部)	検出器冷却系
鶴 剛	(京都大学)	観測計画、X 線検出器
吉川耕司	(筑波大学)	観測計画、シミュレーション
北山 哲	(東邦大学)	観測計画、シミュレーション
佐藤浩介	(東京理科大)	X 線検出器、検出器冷却系
松下恭子	(東京理科大)	観測計画、シミュレーション
馬場 彩	(青山学院大)	観測計画、シミュレーション
澤田真理	(青山学院大)	観測計画、シミュレーション
田村隆幸	(JAXA 宇宙研)	観測計画、シミュレーション
田代 信	(埼玉大)	機上データ処理
河合誠之	(東京工業大学)	衛星システム、姿勢系検討
片岡 淳	(早稲田大学)	機上データ処理

国際協力

DIOS の製作は下記の国際パートナーと協力して進めることにしており、これまで議論と検討を行ってきた。

1. 米国 (NASA ゴダード宇宙飛行センター, R. Kelley): TES カロリメータアレイ、信号処理回路、断熱消磁冷凍機
2. オランダ (SRON, J.-W. den Herder): デジタル処理回路、熱設計など
3. イタリア (IASF-Rome, L. Piro): 処理回路、バックグラウンド除去など

最重要パートナーの R. Kelley 氏のグループとは、「すざく」、ASTRO-H のマイクロカロリメータの協力を 20 年ほど続けている。米国は 128 素子の TES カロリメータを搭載したロケット実験を 2014 年に計画しており、そのシステムが DIOS のベースラインデザインとなる。米国は DIOS のために NASA から 5 億円規模の経費を得るために別途提案する予定にしている。オランダ、イタリアも DIOS と同目的の計画 EDGE, Xenia, ORIGIN を共同提案してきた経緯があり、予算獲得を含めて DIOS への協力を研究者レベルで合意している。

5.3.6 学術コミュニティの合意状況等

高エネルギー宇宙物理連絡会は 2012 年秋に、提案された 6 つの X 線計画の評価を実施し、DIOS は Polaris とともに最高の S 評価を得た。その後、他の波長の計画も合わせて日本学術会議物理学委員会、天文学・宇宙物理学分科会から 8 つの計画が推薦されることとなり、DIOS は唯一の X 線計画として大型計画等のマスタープランへ提案された。

5.3.7 大学共同利用

ダークバリオン探査を中心とする約 5 年間にわたる DIOS の観測はチームとして実施する予定であるが、得られたデータは 1 年を経た後公開する予定である。5 年目以降も観測が可能な場合、ゲスト観測による共同利用を考える。

5.3.8 プロジェクトの現状

■**衛星設計および熱設計** 2013 年度に予想される小型科学衛星 3 号機の募集へ向けて、衛星の検討を進めている。冷凍機と観測系を合わせた電力が 300 W 近くになり、衛星全体としては 700 W ほどを見込む必要がある。従来の 3 枚パドルでは電力の余裕がなく、今後 4 枚構成の検討を進めている。重量も軽量化へ向けて努力はしているが、ペイロード 280 kg、衛星全体で約 600 kg が予想値である。この他、バスとペイロードの間の熱のやり取りや、機器配置についても検討を進めた。また、TES カロリメータのデューワー (図 5.4) は、音響問題や地上試験を実施可能性などを考えて真空気密にする案とした。ASTRO-H と同様の 2 段式スターリング冷凍機とジュールトムソン冷凍機を使う前提で、熱的には成立することが確認できており、固有振動の点でも要求を満たす設計となっている。

■**4 回反射望遠鏡 (FXT)** 2012 年度のはじめに、1/4 分割の 4 回反射鏡 1 枚を入れた状態のものの X 線ビーム試験で HPD 5.4 分角が得られ、要求値 5 分角、目標の 3 分角に近い性能となっている。新しいハウジング (図 5.6) が昨年製作され、鏡の保持方法にも 4 段一体型のアラインメントプレートを用いるなど新しい方式が用いられた。2013 年度にはこのハウジングに 4 回反射鏡をセットして X 線ビーム試験を行う予定である。

■**X 線撮像分光検出器 (XSA)** 首都大、宇宙研で検出器素子を自作し、積層配線を用いて 1 cm 四角内に 20 × 20 素子の TES カロリメータを作成している。超伝導転移特性がなまっており、X 線で信号が出るに至っていなかったが、積層配線の作る段差が Ti-Au の二層薄膜にダメージを与えていると考えられ、産総研とも協力し段差をスロープ状に削ったものを製作している。衛星搭載用の TES カロリメータについて NASA ゴダード宇宙飛行センターで打ち合わせを行い、米国で実績のあるデザインをもとに、日米の協力で DIOS の検出器を設計製作することとしている。

5.3.9 天文学・宇宙物理学分科会からのコメント

計画の学術的意義

現在の宇宙バリオンの大きな割合を示すのが銀河団間空間にある Warm Hot Inter cluster Matter (WHIM) である。その存在は背景 AGN の紫外線吸収線などの観測で既に示唆されてきた。本計画は逆に WHIM が出すはずの軟 X 線輝線を検出してその存在を確定し、さらにその輝線のグローバルな強度分布を測定することにより宇宙バリオンの大規模構造を決定しようとする野心的な計画であり、其の学術的意義はきわめて高い。

経費、スケジュールの妥当性

経費はかなり多額であるので、国際協力を強力におすすめて外国からの経費負担なども最大限求めることが望ましい。このグループは Astro-H の主要機器 SXS の担当者と重複し、2015 年打ち上げ予定の Astro-H の規模から判断すると、本計画のスタート 2014 年、打ち上げ時期 2018 年のスケジュールで遂行するには、厳しい調整が必要であろう。

技術成熟度

基礎技術はほとんど Astro-H SXS そのものであるから、最低限の技術は保障されている。特に冷凍機の技術は日本が誇るものであり、他波長天文衛星（赤外、電波）などへの応用も広い。さらに本計画を通して、TES カロリメタアレイなどの新技術の開発、実現が期待できる。

計画実施体制の妥当性

担当者はいずれも経験豊富で陣容は問題ないが、Astro-H と重複するのでさまざまな調整が必要であろう。

学術コミュニティでの合意状況

マイクロカロリメーターは X 線天文の将来の鍵を握る検出器であり、Astro-H 後、より視野を広くした Dios 計画でこの流れを継続発展することは、日本のみならず世界のコミュニティの総意に沿うものといえる。

共同利用体制の妥当性

コアプログラム終了後、国際的に共同利用が開かれる。計画自身も国際共同プロジェクトであるから、その経験、実績はその後の国際共同プロジェクトにも貢献するだろう。

総合評価

科学的価値、日本の強み、将来への展望など、総合判断からもっともすぐれた計画であり、ぜひ推進すべきであろう。

5.4 ガンマ線バーストを用いた初期宇宙探査計画 HiZ-GUNDAM

5.4.1 計画の概要

将来の可視光・赤外線・サブミリ波観測では、赤方偏移 $7 < z < 12$ における初代銀河や第一世代星の観測、宇宙再電離時期の解明などを重要課題のひとつとして掲げている (図 5.7 の $7 < z < 12$)。すばる望遠鏡などが発見してきた $z \sim 7$ の銀河を分光し、詳細な物理情報を得ることで、初期宇宙の理解が飛躍的に進むと期待されている。

一方で、高エネルギー天文学 (X 線・ガンマ線天文学) における宇宙進化の研究では、赤方偏移 $z < 1$ の濃いダストに隠された活動銀河核の進化や、 $z \sim 0.3$ の近傍銀河団の分光観測などを主題としている (図 5.7 の $z \sim 0.5$)。これらの観測も重要ではあるが、他波長域と協力して天文学の大テーマである「初期宇宙の解明」に貢献することは難しい。

そこで、我々は宇宙最大の爆発現象であるガンマ線バースト (GRB) を用いて、宇宙暗黒時代の終焉と天体形成の幕開けの時代を観測する人工衛星 HiZ-GUNDAM (High- z Gamma-ray bursts Unraveling the Dark Ages Mission) を立案している (図 5.7 のガンマ線バースト欄)。戦略としては、

1. 強い赤方偏移の効果を受けた GRB を X 線帯で観測することで方向を特定し、発生情報を通報する。
2. 自律制御で衛星姿勢を変更し、約 1 分後から同時に搭載している近赤外線望遠鏡で追観測を行う。
3. 詳細な発生方向 (約 1 秒角の精度) と高赤方偏移であるかどうかを通報する。

ここまですべてを本プロジェクトの目標としている。その後、大型望遠鏡と協力して高赤方偏移 GRB の高分散スペクトルを取得する。特に、これまでに十分な観測が行われていない $z > 7$ の GRB を観測することで、宇宙再電離の時期の測定や、宇宙最初の重元素組の精密観測、星形成率の歴史的な変遷など、初期宇宙形成史の解明に寄与する。

本プロジェクトは、高エネルギー天文学分野において、初期宇宙観測をテーマとして掲げた唯一の計画である。可視光・赤外線コミュニティと分野横断的に連携したいと考えている。高エネルギー天文学分野の次世代大型計画は、これから本格的に議論されるが、大口径 X 線望遠鏡と撮像型カロリメータ分光装置を主軸とした計画が重要視されるだろう。その場合、やはり $z < 1$ の観測が主体となるため、大型計画と相補的なプロジェクトとなっている。なお、本計画の体制には大型計画の PI は含まれておらず、科学目標と体制の両面において独立に遂行できると考えている。



図 5.7 各コミュニティが主題として掲げる観測領域 (宇宙進化の観点から)

5.4.2 科学的意義

天文学全体にわたって、宇宙で最初の星が生まれた頃の初期宇宙を探査し、宇宙進化を解き明かすことが大きな目標となっている。特に赤方偏移 $z > 7$ の頃は、第一世代星の誕生、宇宙再電離、重元素合成、宇宙最初のブラックホール

の誕生など、観測的宇宙論としての重要課題が多い。第一世代星の形成は宇宙の大規模構造形成の原点であり、誕生した星からの紫外線放射が宇宙再電離に寄与したと考えられる。星の核融合によって水素・ヘリウムばかりだった宇宙に、重元素という新たな構成要素が付け加えられた。したがって $z > 7$ の時代は、宇宙の進化を決定付ける要因が多く、観測する意義は極めて大きい。

図 5.8(左) に、これまでに分光観測で確認されたクエーサー、銀河、GRB の最高赤方偏移の年代推移を示している。GRB は 1997 年に最初の赤方偏移が確認されてから、急速にその記録を伸ばし、現在では宇宙の再遠方を観測するための天文現象として重要視されている。Swift 衛星の観測結果から、高赤方偏移 GRB ($z > 6$ 程度) は 1 イベント/年程度であると考えられる。ただし、Swift 衛星は 15 keV 以上で GRB を観測しているため、強い赤方偏移を受けて 10 keV 以下の X 線帯で輝く GRB に対しては感度が悪い。したがって、HiZ-GUNDAM では、1 keV 程度の X 線帯で、Swift 衛星よりも 1 桁程度高い感度で観測することを目標としている。これにより、年間 100 例程度の GRB を検出し、そのうち、10 例程度が高赤方偏移 ($z > 7$ 程度) であると見込んでいる。

また、X 線撮像検出器で捉えたほぼ全ての GRB に対して、近赤外線望遠鏡で追観測を実施する。これまでの残光の光度関数から見積もると、追観測を実施した高赤方偏移 GRB のうち約半分は検出できるため、年間に 5 例程度の高赤方偏移 GRB 候補を見つけ、アラートを出すことができるだろう。これにより、大型望遠鏡に対して複数回の観測機会を与えることができ、高分散分光観測を実施できると想定している。

本プロジェクトの主題は高赤方偏移 GRB を観測する事であるが、近傍で発生する GRB と類似した X 線フラッシュや、超新星爆発の shock breakout など、星の終焉の多様性を研究できる。Short GRB (重力波検出の有力候補) や、ブラックホールに星が飲み込まれる際の潮汐破壊現象からは、強い重力場での物理現象を研究できる。GRB 待機時の近赤外線観測から、2MASS カタログを越える感度で広域のカタログを作成し、遠方クエーサーの探査などに貢献できるよう、サイエンスを検討している。

可視光・赤外線・サブミリ波分野では、これまでに知られている $z \sim 7$ の銀河の分光観測を実施し、TMT や SPICA によるディープサーベイ観測で、さらに初期宇宙の物理状態について多くの知見が得られると期待できる。ただし、初期宇宙の銀河は矮小である可能性が高く、十分に成長した明るい銀河にバイアスを受けた観測となる可能性もある。その点、GRB は矮小銀河に付随している事が多いため、GRB ならではの貢献も期待できる。

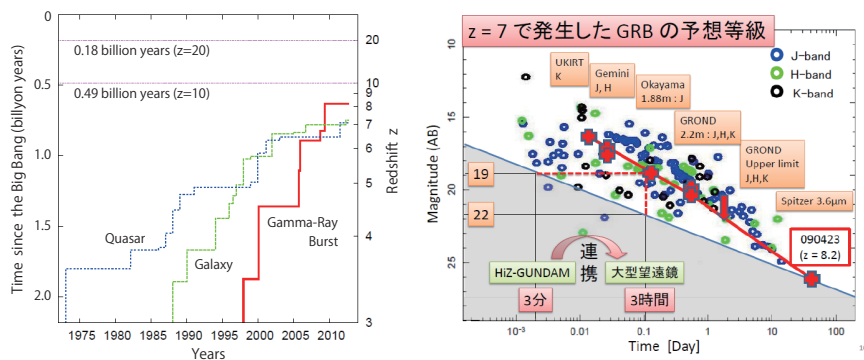


図 5.8 (左) 分光観測で確認されたクエーサー、銀河、GRB の最高赤方偏移の年代推移、(右) これまでに観測された残光が $z = 7$ に存在した場合の予想等級

5.4.3 所要経費

小型科学衛星クラス 80~90 億円を想定している (打ち上げ費用、衛星バス開発、ミッション機器開発すべて含む)。現状では国内のメンバーのみで計画を推進しているが、後述するように、将来的には国際協力も視野に入れている。

5.4.4 年次計画

小型科学衛星 3 号機または 4 号機への提案を考えている。最短スケジュールとしては、2014 年度のプロジェクト発足後、衛星システムの詳細検討を行い、2016 年度からフライトモデルの開発、2018～2019 年度の打ち上げを想定している。年間約 100 例の GRB アラートを発信し、そのうちの 5 例程度は高赤方偏移 GRB であると予想している。

5.4.5 実施体制

国内実施体制： 本プロジェクトは国内の 19 機関から 38 名の研究者 (スタッフ,PD) が集まり、ワーキンググループを構成している。X 線・ガンマ線検出器は、米徳大輔 (金沢大) および三原建弘 (理研) を中心に 13 名が担当し、近赤外線望遠鏡は、川端弘治 (広島大学)、松浦周二、津村耕司 (ISAS/JAXA)、松本敏雄 (台湾中央研究院) を中心とした 9 名が担当している。

国際協力： 現時点では国際協力の交渉は行っていない。ただし、GRB のアラート情報を取得する地上局の設置やその運用を、国際協力として展開する可能性は視野に入れている。

5.4.6 学術コミュニティの合意状況等

HiZ-GUNDAM 衛星は、2009 年から少数のメンバーで検討を始め、GRB 研究会や高エネルギー宇宙物理連絡会 (以下、高宇連) にて講演を行い、プロジェクトの内容を周知してきている。その後、2012 年度に国内の GRB 研究者の大半の合意を得て、ワーキンググループを発足させた。

2012 年度に高宇連で議論された次期中規模計画の中では、ワーキンググループが発足した直後で検討が十分でないこともあり、最優先課題としては選ばれなかったが、科学的意義は認められ、それに準ずる課題として評価を受けている。現在、稼働している Swift 衛星の運用が終了すると、それを引き継ぐ GRB 観測衛星は無く、GRB の研究を継続するためには緊急性の高い課題であるとも認識されている。

5.4.7 大学共同利用

本プロジェクトでは、プロジェクトメンバが主導する観測のみを行う予定である。プロポーザル制は採用しないが、他プロジェクトとの共同観測が重要であると判断できる場合は、共同観測を実施することを想定している。

本プロジェクトからのプロダクトとしては、科学観測データとアラート情報の 2 種類が存在する。GRB が発生した際のアラート情報は、リアルタイムで観測者間で共有できるようにし、誰でも利用できるようにする。科学観測データのうち、X 線観測データについては随時アーカイブ化を行う。近赤外線データは、プロジェクトが主導して広域カタログを作成した後、打ち上げ後 1 年を目処にアーカイブ化を行う。

5.4.8 プロジェクトの現状

2012 年 4 月に HiZ-GUNDAM ワーキンググループの設置が宇宙科学研究所によって認可され、JAXA ミッションデザイン支援グループおよび、ISAS システムエンジニアリング室の協力の下で検討を進めている。

X 線撮像検出器は金沢大学・理化学研究所を中心に開発を進めており、2013 年度中にエンジニアリングモデルによる撮像実験を行う予定である。近赤外線望遠鏡については、宇宙赤外線背景放射を観測する CIBER-2 計画の望遠鏡と設計が近いことから、ISAS および台湾中央研究院を中心としたグループで検討を進めている。

5.4.9 天文学・宇宙物理学分科会からのコメント

計画の学術的意義

宇宙論的距離で発生するガンマ線バーストは、遠方にある最も明るい天体であり、これを背景にして現在までの空間を吸収スペクトルから探査するアイデアは大変魅力的である。ガンマ線観測でバースト発生を検出、赤外線望遠鏡で正確な発生位置を確定し、大型光学望遠鏡をガイドする。これまでカバーできていないパラメータ領域を探査できれば科学的に重要な寄与が可能であろう。

経費、スケジュールの妥当性

機器についての経費見積もり、申請のスケジュールを実現するには、研究推進体制の強化が必須である。マンパワー、経費について、国際的な協力体制の検討も必要である。

技術成熟度

ガンマ線検出器については既に他のミッションで導入されているシステムに近い。また可視／赤外線望遠鏡も特殊な物ではない。いずれも実現可能な技術であるが、このサイズと予算のミッションで実現するには工夫が必要だと思われる。このミッションでは二つの光学系が組み込まれるので、ジャイロ、スターカメラを含めて、構造強度、熱設計、光学軸合わせとその保証についての明確なスキームの確立を勧める。バースト発生後の高速の姿勢制御法の手法と精度の確立も課題である。

計画実施体制の妥当性

上記の様に、検出機器は個々には確立された技術であるがそれぞれのハードウェアのエキスパートが本格的に参加することが必ず必要である。開発のコアとなるグループの充実が求められる。

学術コミュニティでの合意状況

コミュニティにその存在は知られ、科学的な興味を持つ人も少なくないが、このミッションをコミュニティ全体で推進を支援するという合意はまだ形成されていない。

共同利用体制の妥当性

共同観測については、ガンマ線のアラートを受けて、大望遠鏡を3時間以内に向けるためのネットワークを作る必要がある。特に重要なイベント数は限られるので（年間1回～数回）、十分なりハーサル（テストイベント）などが必要だと思われる。共同利用は、ガンマ線バーストに対応する以外の観測時間は共同利用が可能である。

総合評価

既に述べた様に、このミッションのサイエンスの重要性、緊急性、国際的な卓越性を磨き、コミュニティの理解を得ることと、ハードウェアのエキスパートをチームに取り込むことが望まれる。またこの種のミッションは諸外国でも検討されていると思われるが、その協力の導入や、諸外国のミッションへの合流などを模索することがここで目指すサイエンスの実現には早いと思われる。

5.5 X線ガンマ線偏光観測計画 PolariS

5.5.1 計画の概要

PolariS(Polarimetry Satellite)は、天体のX線ガンマ線偏光観測に特化した小型衛星である。偏光観測は、宇宙の磁場構造やブラックホールまわりの降着円盤など、直接撮像が不可能な天体の構造を明らかにする手段として、X線ガンマ線天文学の創生期から期待されてきた。しかし、技術的困難から現在でも未開拓な分野である。PolariSは、気球や人工衛星に向けて開発、実証してきた、国内の独自技術を組み合わせ、硬X線領域に重点をおいた偏光観測を実現する。観測対象は、ブラックホール連星系、中性子星連星系、パルサー、超新星残骸、活動銀河核、さらにガンマ線バーストと、高エネルギー天文学の主要な対象を網羅する。スペクトル、時間変動観測という従来の観測手段で組立られてきた、これらの天体に関する描像を、偏光という新たな次元からかきかえることを目指している。

高い偏光度が期待されるのは非熱的放射であり、それがより顕著に現れるのは硬X線領域である。このため、PolariSでは、10-80keVの硬X線領域での偏光観測に主眼においている。X線天文分野の大型プロジェクト、ASTRO-H衛星でも非熱的宇宙の探査は主目的のひとつで、硬X線撮像観測で従来より二桁近い高い感度の達成が期待されている。両者の相乗効果で宇宙の非熱的現象の理解を一気にすすめる。ASTRO-H衛星に搭載されている軟ガンマ線検出器(SGD)は60-500keVの領域の偏光検出能力をもっており、PolariSとの同時観測で10-500keVの偏光観測が実現する。ただし、PolariS衛星は、衛星全体を10分間に1回転の割合で、視野軸まわりに回転させ、偏光観測の系統誤差を最小限におさえる工夫をしている。このような運用はASTRO-H衛星では不可能で、専用の小型衛星でこそ可能な点である。技術的には、PolariS衛星に登載予定の硬X線望遠鏡はASTRO-H衛星登載のモデルを1/2に縮小したものであるし、6m伸展式光学台もそのデザインを踏襲する(図5.9参照)。硬X線望遠鏡の製作施設を含め、ASTRO-H衛星の技術資産を最大限に利用する。

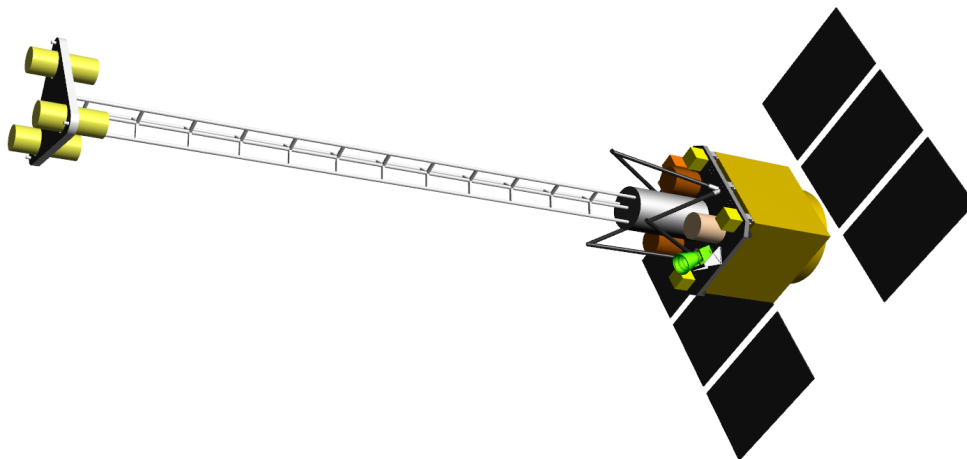


図 5.9 PolariS 衛星の概観。6m の光学台を進展した状態。3 台の硬 X 線反射望遠鏡の焦点面に撮像偏光計を設置して天体の硬 X 線偏光観測を行う。広視野のガンマ線バースト偏光計も搭載する。

5.5.2 科学的意義

X線ガンマ線天文学の創生期から、様々な天体に対する偏光観測の重要性は指摘されてきた。例えば、放射がシンクロトロン放射によっている場合、磁場の方向に垂直な偏光が期待される。X線、ガンマ線の偏光観測によって磁力線の方向及びその整列度がわかり、宇宙における加速現象における磁場の役割が検証できる。具体的な対象としては、超新星残骸、ブレーザーなどがあげられる。もうひとつの例として、無偏光な連続X線が降着円盤にあたり、散乱X線が放射

されるケースがある。この場合、円盤がフェイスオンでない限り、高い偏光度が期待される。偏光度の X 線エネルギー依存性を調べることで、直接観測は困難な降着円盤の傾きまで制限することができる。さらに、超強磁場パルサーからの X 線偏光、ブラックホールまわりの降着円盤からの熱放射の X 線偏光に関する理論的予想も提示されている。X 線偏光観測の結果と照合することで、それぞれ、量子電磁力学、一般相対性理論の観測的検証になると主張されている。

しかしながら、現時点までの観測で有意な偏光が検出されているのは、10keV 以下の X 線領域ではかに星雲のみ、数 10keV から MeV の軟ガンマ線領域では、それに加えてはくちょう座 X-1、及び、数例のガンマ線バーストという状態である。この状況を打破し、硬 X 線領域ではじめての偏光検出を、数 10 天体に対して目指すのが PolariS の目的である。観測対象としては、かに星雲の 1/100 以上の明るさの天体で、ブラックホール連星系、中性子星連星系、パルサー、超新星残骸、活動銀河核を含む。観測には 3 台の硬 X 線反射望遠鏡とその焦点面に設置した撮像可能な偏光計を利用する。PolariS の第二の目的は、広視野ガンマ線偏光計によるガンマ線バーストの偏光観測で、年間 10 バースト程度の偏光検出を目指す。IKAROS/GAP で端緒をつかんだガンマ線バーストジェット中での磁場構造に関して、統計的議論ができるまでもっていく。IKAROS/GAP の観測結果から示された CPT 非対称性の上限値をより下げることが可能だろう。

5.5.3 所要経費

ロケット打ち上げ費用を除いて、合計 55 億円。小型衛星バス (カスタマイズ費用をふくめて) 25 億円、反射望遠鏡と伸展式光学台 10 億円、撮像偏光計とエレキ 6 億円、ガンマ線バースト偏光計 2 億円、ミッション系試験費 3 億円、運用 4 億円、国際協力費 5 億円。

5.5.4 年次計画

2006 年末にワーキンググループ結成以降、これまでに、概念デザインと検出器の基礎開発をすすめてきた。JAXA 小型衛星 3 号機の公募が 2013 年度中、その選出が 2014 年と仮定した場合の最速のスケジュールは、2014 年概念設計、2015 年詳細設計、2016 年フライトモデル製作、2017 年衛星試験、2018 年打ち上げとなる。観測期間は性能確認期間を含めて 1 年間として、成果は 2019 年より創出される。

5.5.5 実施体制

PolariS 計画は 2006 年末に発足した JAXA 小型衛星ワーキンググループのひとつとして計画を推進している。

国内実施体制

ワーキンググループのほとんどは国内の研究機関のメンバーで構成される。大阪大学で計画のとりまとめを行なっている。焦点面撮像偏光計の開発は、大阪大学、山形大学、理研、京都大学を中心に、ガンマ線バースト偏光計は山形大学、金沢大学を中心に行なっている。両者は共通部分も多い。データ処理装置、及びシミュレーションが広島大学、硬 X 線反射望遠鏡は名古屋大学が担当である。姿勢系、伸展式光学台を含めたシステムとのインターフェースは、宇宙研と大阪大学が担当している。理研、宇宙研はまた、GEMS チームとの国際協力の窓口でもある。ハードウェアの開発チームに加えて、高エネルギー天体物理の理論家の参加も得ており、観測対象の選定、検出器の仕様確定にアドバイスを得ている。

国際協力

10keV 以下の軟 X 線偏光観測の小型衛星として、NASA/GSFC を中心に日本からも JAXA、理研、名古屋大学が参加してすすめられていた計画が GEMS である。2014 年打ち上げに向けて開発がすすめられていたところ、予算超

過の懸念を理由に2012年一旦プロジェクトとして停止された。しかし、フライト品あるいは同等品の製作まで進んでおり、プロジェクト再開が世界的にも期待されている。GEMSは軟X線領域を対象としており、PolariS衛星とは検出器の原理も異なることで、相補的な関係にある。2012年末より、PolariSチームとGEMSチームの間で相互相乗りも含めた協議をすすめている。

5.5.6 学術コミュニティの合意状況等

2012年、高エネルギー宇宙物理連絡会において、優先的にすすめるべき中規模将来計画に関して6プロジェクトに関して議論、審査が行われ、PolariS計画はDIOS計画とともにS判定を獲得した。偏光観測が、X線天文学の分野において推進すべきフロンティアのひとつであることは、アメリカ、ヨーロッパ、アジアそれぞれで複数のX線偏光観測小型衛星が検討されていることから明らかである。偏光観測の意義が高いと評価されていることに加えて、大型化を免れない分光撮像主体のX線天文台と比較して、小型衛星のリソースでも大きな成果が望めることが背景にある。しかしながら、高エネルギー天文衛星として実現できる数は、ますます限られるのが世界的状況で、国際的な協力体制をとることが偏光観測衛星実現のために必要である。高エネルギー宇宙物理連絡会の議論でも、GEMS衛星との協調を模索することが要求されていた。これにそって、2012年末より相乗りの可能性を含めた協議をすすめている。

5.5.7 大学共同利用

観測計画の策定プロセスとデータ公開方法は検討中であるが、観測対象の選定にPolariSチーム外からの意見を求めること、観測後出来るだけ早く観測データを公開することが必要であると考えている。本プロジェクトは観測手段としては偏光観測に特化した小型衛星計画であるが、高エネルギー天文学の様々な観測対象を網羅し、多くの研究者の参加が期待される。このような点で、観測天体の絶対数では少ないものの、あすか衛星、すざく衛星のような国際的に利用される形態をモデルとしたい。

5.5.8 プロジェクトの現状

PolariSワーキンググループでは、2006年末のグループ結成以来、JAXA小型衛星をプラットフォームに想定し、搭載する観測装置の基礎開発とミッション部の概念デザインをすすめてきた。伸展長6mの光学台に関しては、ASTRO-H搭載の6m三角マスト伸展台のデザインを踏襲することで、剛性、重量とも問題ないことをメーカーの協力で確認している。硬X線反射望遠鏡は、ASTRO-Hの焦点距離12mのそれを直径、焦点距離とも1/2に縮小した構造でデザインしシュミレーションで有効面積を算出している。内径を縮小した反射ホイルを実際に製作し、X線で性能評価することは今後の課題である。焦点面に設置する撮像偏光計は、プロトモデルを製作し、放射光施設における性能評価を実施して、偏光検出の感度指標のひとつ、Modulation Factorが0.5-0.6と高いことを確認している。ガンマ線バースト偏光計に関しては、IKAROS/GAPの成功に引き続いて、改良型の開発をすすめている。姿勢制御と姿勢検出に関してもメーカーを交えた概念設計をすすめており、必要なオプション変更を洗い出している。

PolariSワーキンググループとしては、JAXA3号機に応募する方向で準備をすすめている。ただし、上述したように、2012年末よりGEMSチームとの協力に関して協議をすすめており、現在、GEMS衛星のアメリカ側での次回提案にむけて、ガンマ線バーストの偏光観測を目的にした広視野の偏光計を日本側が提供し搭載する可能性を検討している。逆に、PolariS衛星提案時に、軟X線偏光観測を担当するGEMS検出器を搭載する可能性もオプションにあげている。

5.5.9 天文学・宇宙物理学分科会からのコメント

計画の学術的意義

PolariS は、*ASTRO-H* の開発資産などを利用し、硬 X 線ミラーの焦点にトムソン散乱型の X 線偏光計を搭載して、未開拓な X 線の偏光観測に挑戦するもので、非熱的放射におけるシンクロトロン機構の同定、パルサーやマグネターの磁場構造の定量化、ブラックホール周りの降着円盤における時空の歪み探査など、他の手段では難しい一連の優れた天体物理学の研究が期待される。JAXA のイプシロンロケットによる打ち上げを想定する一方、米国 SMEX プログラムで進行していた軟 X 線偏光ミッション GEMS (日本が鍵技術を持って参加) が、コスト超過のためキャンセルされ、2014 年に再挑戦の機会を狙っている。PolariS チームはコミュニティなどの助言に従い、日米の GEMS チームと協力し、GEMS 再挑戦機に PolariS の一部を合体させる方向も、並行して検討している。

経費、スケジュールの妥当性

チーム側は、打上費用を除き、衛星バス部 25 億円、それに衛星ミッション部や、運用諸経費などを加算し、合計 55 億円と見積っている。このうちバス部は、PolariS チームの責任ではないが、一般的に 15 億円ほどの増額が見込まれるため、総計で 75 億円+打ち上げ費用(約 40 億円)と試算される。他方、GEMS が米国で再び採択され、PolariS (の一部) をそこに吸収できた場合は、最終形態にも依るが、日本側の経費は~20 億円のオーダーにまで減らせるであろう。

チーム側のスケジュール見通しは、PolariS 単独の場合、2014 年度にプロジェクト開始、2018 年に観測開始と考えているが、数年の遅れは覚悟せざるをえまい。他方、GEMS はフライトモデル製作の直前でキャンセルされたことを考えると、それが 2014 年度に再び採択された場合は、2018~2019 年頃の打ち上げは、より確実と思われる。

技術成熟度

PolariS では、硬 X 線領域のトムソン散乱型偏光計を用いる。この技術はすでに、ソーラーセール実証衛星 IKAROS に搭載された相乗り装置 GAP(金沢大、山形大など)、気球実験 PHENEX (山形大、阪大、理研など)、同じく気球実験 PoGO (広島大など) などで実証されつつあるので、技術的な成熟度は高い。GEMS 衛星に対しては、理研や名大が、軟 X 線偏光計の心臓部であるガス電子増幅フォイルなどを提供しており、技術的に世界を牽引する水準をもつ。

計画実施体制の妥当性

ASTRO-H との重複はやむを得ないが、キーメンバーの一部が他の中規模計画にも参加しており、背水の陣になっているとは言い難い。早急な整理が望まれる。

学術コミュニティでの合意状況

すでに 2012 年の秋、高エネルギー宇宙物理連絡会では、PolariS を含む 6 計画の評価を行い、DIOS と PolariS の 2 計画を「S」評価とした。このようにコミュニティからは一定の支持を得ている。

共同利用体制の妥当性

チームとしては、早い時点でのデータ公開、また国際的な観測参加の体制を検討中で、ほぼ妥当と評価できる。

総合評価

日米が技術的にも科学的にも世界を牽引しており、PolariS または GEMS のどちらかが世界のトップを切ることが強く望まれる。それには、日本の参加により GEMS 計画を強化するとともに、それが不採択に終わった場合のバックアップとして、イプシロン打ち上げによる PolariS の設計を、より厳しく絞り込んで進めることが必要であろう。

5.6 MeV/sub-MeV 全天サーベイ CAST 計画

5.6.1 計画の概要

CAST (Compton Telescope for Astro and Solar Terrestrial) 計画は、未だ精密な観測の存在しない 200 keV から ~2 MeV の帯域で、全天観測を行い、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¹。ここに、電波から、X 線、GeV、TeV のガンマ線に至るまで、宇宙観測の技術は飛躍的に進歩し、多くの新発見をもたらすようになって来た。その天体現象の正体を探るには、多波長の観測結果の組み合わせが鍵を握る。しかし、2000 年に観測を終了した COMPTEL 検出器以降、MeV ガンマ線の観測は行われておらず、観測に大きな穴があいたままである。

CAST は、シリコン (Si) とテルル化カドミウム (CdTe) を組み合わせた広視野の半導体コンプトンカメラという、日本発の新技術^{2,3}を主検出器に用いる (図 5.10 参照)。半導体の優れたエネルギー分解能を活かし、COMPTEL(0.5–10 MeV) の 1/5 ほど、0.2–2 MeV の sub-MeV 帯域でのコンプトン撮像を実現する。sub-MeV 帯域の全天観測は世界で初めてであり、光子一つ一つのエネルギーが減る分その数が増えるため、より小型の検出器で COMPTEL と同等数以上の天体を検出できる。さらに、コンプトンカメラの基本的な性質から、明るい天体に対しては、全天の偏光サーベイも初めて実現する。

CAST は、sub-MeV に特化することで、小型のミッションを実現している。姿勢制御の要求も高くないため、大型衛星のサブ機器として、または小型科学衛星として軌道に上げ、全天を監視することを狙う。観測のない MeV 帯域のうち、この 1–10 MeV (GeV 衛星の下限エネルギーまで) は、将来のより大型の検出器が必要である。CAST は MeV 天文学再開の第一歩目であり、将来の更なる発展も検討している。

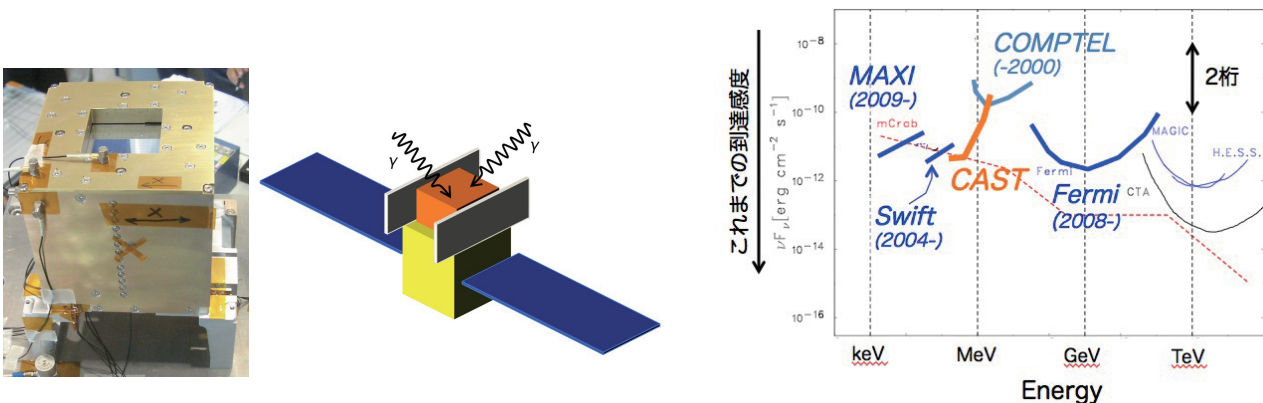


図 5.10 (左) ASTRO-H/SGD 検出器の Si/CdTe コンプトンカメラ。10 cm 立方の検出器の中に、13,000 ch の半導体検出器が収まっている。(中) CAST の概念図。主検出器と回路部、ラジエータで構成される。本図では小型専用衛星オプション (下半分がバス部) の場合を示した。(右) 2000 年代の主要な X 線ガンマ線の全天観測装置の検出感度。CAST の観測帯域と、2 年間の運用で期待される到達感度を示した。

5.6.2 科学的意義

21 世紀に入り、赤外、可視光から、X 線、GeV ガンマ線に至るまで、全天サーベイが精力的に行われている。Fermi GeV ガンマ線衛星や、Swift ガンマ線バースト衛星 (100 keV X 線) は、その帯域での高エネルギー天体の高精度の時間平均スペクトルをもたらすと同時に、ほぼ全天を観測できるその特性から、かに星雲のフレアや宇宙ジェット天体の突発的な増光などを次々に捉えてきた。特にこれらの突発的な増光は、その速い時間変動と明るさ、スペクトルから、従来のモデルを覆す新発見が多く、これらの天体の粒子加速と放射機構の理解に大きな進展をもたらしている。しかし激

しく粒子加速を行っているこれらの天体の観測において、MeV 帯域のスペクトル情報が存在しないことが、放射モデルの確定に大きな不定性を残している。CAST はここを解決することを狙う。具体的には、これらパルサーや、宇宙ジェット天体に加え、マグネターやブラックホール連星などの MeV での姿を、継続して監視、観測する。他にも、近傍で超新星爆発が起きた場合には、 ^{56}Co などの輝線探査を行うとともに、太陽フレアからの MeV 放射も観測する。

CAST は、地球低軌道上で運用し、広視野のコンプトンカメラでおおよそ 100 分に一度、ほぼ全天を観測する。このデータを積分し、月～年オーダーの時間平均スペクトルを高い精度で得ることができる。コンプトン散乱を検出原理としており、同時に全天の sub-MeV 偏光マップが得られるため、宇宙ジェットの放射機構などを知る上で、新たな次元の観測結果を開拓する。

5.6.3 所要経費

CAST 主検出部のコンプトンカメラは、2015 年打ち上げ予定の ASTRO-H 衛星に搭載される、軟ガンマ線検出器 (Soft Gamma-ray Detector) SGD の技術を発展させた物である。主検出器は 50 cm 四方で重量 100 kg 強のサイズを持ち、消費電力は 200 W である。これに基づくコスト見通しを、表 5.3 に示した。ASTRO-H/SGD の実績に基づく検出器開発経費と、運用経費、JAXA 小型科学衛星ワーキンググループ内での初期検討に基づく、衛星開発と打ち上げ経費を元に算出した。一見して分かるように、サブ機器案の場合には、独立した衛星システムを持たない分、コストメリットが大きいですが、サイズ、運用に制約が避けられない。専用衛星案であれば最適な観測運用が実現でき、衛星質量に由来する MeV ガンマ線バックグラウンドも減るため、感度の上でも有利である。このように両案を比較検討した上で、現在は、早期の実現を重視し、サブ機器案を原案として検討を進めている。

表 5.3 CAST のコスト見通し

項目	大型衛星のサブ機器 (原案)	専用の小型科学衛星 (オプション)
主検出器	25 億円 *	25 億円 *
衛星本体	—	20 億円 *
打ち上げ	0–10 億円	30 億円
運用	5 億円	5–8 億円
合計	30–40 億円	~80 億円

* 試験費含む

5.6.4 年次計画

表 5.4 CAST の年次計画

項目	年度	備考	項目	年度	備考
基礎技術開発	~2008	SGD 詳細設計	打ち上げ	2020	目標
詳細設計開始	2015		運用期間	1 年以上	ベースライン 2 年
試作品 (EM) 製造開始	2016				Goal は 5 年
衛星搭載品製造開始	2017		全天マップ公開	2022	目標

CAST は ASTRO-H の技術を発展させたものである。そこで得られる開発経験と宇宙実績を最大限に利用すること、およびマンパワーの重複を避けるために、その打ち上げを待って本格的な開発に移行する。このため現行最速の予

定で 2020 年打ち上げ予定である。

5.6.5 実施体制

国内実施体制

東京大学 (プロジェクト代表、サイエンス推進、検出器開発)、JAXA 宇宙科学研究所 (プロジェクトマネジメント、CdTe 検出器開発、エレクトロニクス開発、衛星運用)、名古屋大学、広島大学 (シリコン検出器開発)、埼玉大学、理研、大阪大学、SLAC (エレクトロニクス開発、サイエンス推進)

国際協力

現時点で明確な合意は存在しない。世界の MeV 研究者と将来研究会は複数開催しており、CAST プロジェクトを実行した場合、解析ソフト、サイエンス推進において、協力体勢をとる約束をしている。

5.6.6 学術コミュニティの合意状況等

JAXA 小型科学衛星の提案候補として、2006 年に基本コンセプトが提案され、ワーキンググループとして活動。高エネルギー宇宙物理連絡会において、6 つの将来計画の一つとして提案、議論されている。

5.6.7 大学共同利用

CAST は全天観測をするもので、原則として特定の天体にポインティングをしないため、原則として観測の公募は行わない。得られたデータは、全天の MeV マップとしてまとめ、有力天体はそのスペクトルと偏光も併せ、国内はもとより全世界に公開する方向で検討を進めている。詳細にデータ解析するには、ソフト開発とドキュメント、サポート体制の整備が課題であるため、原則としてチーム内 (国外パートナーを含む) での使用を前提とし、処理前データの公開はしない。しかし、国際/国内パートナーの合意に基づく支援により、ソフト等の公開準備が進展すれば、最終的には全データの公開を目標とする。

5.6.8 プロジェクトの現状

CAST 計画は詳細検討段階にある。検出器の実装技術、宇宙実証は、ASTRO-H/SGD の開発により大きく進展している。あわせて、CAST 衛星のコンフィグレーションの最適化⁴とコンプトンカメラのデータ選別アルゴリズムの最適化⁵も進められている。地上における広視野の MeV 撮像観測の実証も行っており⁶、これらを総合して観測システムの最適化を進めている。

[参考文献]: 代表的なもののみ

1. K. Nakazawa et al. "Concept of a small satellite for sub-MeV & MeV all sky survey: the CAST mission", *Proc. SPIE*, 8443, (2012)
2. T. Takahashi et al. "Hard x-ray and gamma-ray detectors for the next mission", *New Astronomy Reviews* **48** (2004).
3. S. Watanabe et al. "A si/cdte semiconductor compton camera" *IEEE TNS* **52** (2005).

4. 武田伸一郎 博士論文 "Experimental Study of a Si/CdTe Semiconductor Compton Camera for the Next Generation of Gamma-ray Astronomy" 東京大学 (2009)

5. 一戸悠人 修士論文 「ASTRO-H 衛星搭載軟ガンマ線検出器におけるコンプトン再構成アルゴリズムの開発」東京大学 (2013)

6. http://www.jaxa.jp/press/2012/03/20120329_compton.j.html

5.6.9 天文学・宇宙物理学分科会からのコメント

計画の学術的意義

X線帯域は集光系が適用でき、GeV 領域は 2 次粒子の軌跡から位置が決定できるが、MeV はそれらの狭間にあり、集光や撮像できないため感度が最も低い帯域である。一方 MeV は核ガンマ線のエネルギーや、パイオンの対消滅エネ

ルギーにあたり、宇宙核物理学や宇宙線粒子加速のなどに関して重要な情報を担う。研究対象としては突発 MeV 天体（ガンマ線バーストを含む）、粒子加速天体、超強磁場中性子星、その他未知の高エネルギー天体などが期待され、本計画はこれら分野で高エネルギー天文の新しい窓をひらくであろう。数は限られるが、明るい天体では偏光も検出可能なので、高エネルギー天文の新たな軸、非熱的宇宙を張る新ベクトルを加えるであろう。

経費、スケジュールの妥当性

Astro-H 打ち上げ後（2015）1 年あけて計画がスタートし、5 年間で完成させるスケジュールは妥当な計画だろう。予算も国際宇宙ステーションなどの搭載機器としては妥当な枠内と考えられる。

技術成熟度

シリコンとテルル化カドニウムを組み合わせたコンプトンカメラや関連する解析ソフトは Astro-H 打ち上げの計画と同じである。したがって Astro-H 打ち上げで技術的成熟度は実証されるだろう。

計画実施体制の妥当性

計画実施は Astro-H の軟ガンマ線検出器 (SGD) チームの主力メンバーがほぼ全員参加し、経験実績には問題ない体制であろう。

学術コミュニティでの合意状況

このグループは X 線天文と高エネルギー物理の出身者からなる境界領域的な分野である。両コミュニティ内で合意は取れていると思う

共同利用体制の妥当性

MeV データの全天マップは web 等に公開されるので、高エネルギー天文全般のみならず他波長の研究者からも利用されるであろう。逆にデータは膨大なものになるので、データ有効に生かされるためにも、広い分野からの協力や参加が重要になろう。

全体的にバランスのとれたよい計画であり、実現性は高い。

5.7 硬 X 線サーベイ計画 FFAST

5.7.1 計画の概要

137 億年前のビッグバンで始まった宇宙は、多様な現在の姿に進化した。10 keV 以下 (低エネルギー) の X 線観測では、あすか、チャンドラ、ニュートンにより、X 線天体の分布は宇宙の果てにまで及び、図 5.11 左に示す宇宙背景放射 (CXB) の起源もその ~ 80% が巨大ブラックホールを持った活動銀河核 (AGN) であると判った。低エネルギー領域では、多数検出されている AGN の光度関数を赤方偏移ごとに決めることで宇宙進化の変遷が議論できる。

一方、吸収の効かない 10 keV 以上 (高エネルギー) の CXB のエネルギーフラックススペクトルは 30 keV あたりにピークを持っており、低エネルギー領域の CXB を説明するモデルの単純な外挿では高エネルギー領域の CXB は説明できない。まさに高エネルギー領域は未知の世界が広がっている。しかも、すぐくの観測により、ガスや塵に深く埋もれているため低エネルギー領域では暗いが高エネルギー領域で明るい AGN の多数あることが判明しつつある。これらこそ、巨大ブラックホールと銀河との共進化を理解する上で鍵となるものと推測されている。最近ではスーパーミラーを利用した高エネルギー領域で撮像する望遠鏡や、それに対応する検出器の開発が進み、NuSTAR や ASTRO-H で精密観測が始まる。CXB の全貌を知るには、精密観測以外に広い領域の走査観測が欠かせない。FFAST は高エネルギー領域で、ASTRO-H などではカバーできない広い天空を観測し、Swift などの全天観測衛星より暗い天体を検出し、これらの衛星観測と合わせて宇宙進化の解明を目指す。つまり、FFAST は ASTRO-H 衛星と相補的な役割を果たす。

以上の観測を実行するために、長い焦点距離の硬 X 線望遠鏡と感度の高い大面積 X 線検出器を組み合わせる。我々は望遠鏡と検出器とを別の小型衛星に搭載し、望遠鏡衛星と検出器衛星とし、編隊飛行させることで機動性の高い観測装置を実現する。

FFAST の硬 X 線望遠鏡は 2015 年度打上予定の ASTRO-H 搭載のスーパーミラーを原型とし、 $S\Omega$ を大きくするように修正したものである。同じく、検出器は ASTRO-H 搭載の X 線 CCD カメラの検出感度を硬 X 線まで延ばした CCD カメラである。いずれも衛星搭載に向けた完成度は高い。二衛星は、それぞれ姿勢制御機能を持つ。さらに検出器衛星は、小型スラスターを備え、望遠鏡衛星との距離を一定に保持する機能を持つ。この編隊飛行技術は、「おりひめ」と「ひこぼし」で検証された技術を基にしており、その達成度は世界トップである。

サイエンスで要求される観測を達成するために、ミッションの最初の半年はスラスターを多用したポインティング観測を進め、検出限界を下げ、走査観測衛星では見えないような暗い AGN を観測する。この観測ではポインティングによる観測をするために、検出器衛星はケプラー軌道から外れるように制御し、搭載燃料を大量に使用する。その後は二衛星ともにケプラー軌道で衛星間距離を一定にできるレコード盤軌道に入る。こうして、ほとんど燃料を使用せずに長期間にわたり広い領域を観測する。つまり、宇宙進化を解明する理学と、長期編隊飛行を実現する工学との融合ミッションが FFAST である。

5.7.2 科学的意義

宇宙史の解明に欠かせないのが、銀河中心に潜む巨大ブラックホール (BH) の進化である。その成長現場である活動銀河核 (AGN) の検出には、X 線観測が有効だが、これまで技術的な制限から、吸収の少ない AGN だけが観測されてきた。近年、吸収の大きな「深く埋もれた」AGN が多数あるとの示唆が得られつつある。吸収の大きな AGN は、吸収の少ない AGN とは別種の天体であり、銀河の合体に伴って急成長しつつある BH であるという可能性も指摘されている。これらは、「巨大 BH を作るプロセスは降着か合体か」という基本問題や、銀河・BH 共進化のメカニズムを理解する上で鍵となる天体である。

しかし、これまでの吸収の大きな AGN の観測は不十分で、その数密度や進化はほとんど分かっていない。最近、巨大 BH のダウンサイジングが提唱され、宇宙進化の理解に躍進をもたらしたが、これは吸収の小さな AGN の観測だ

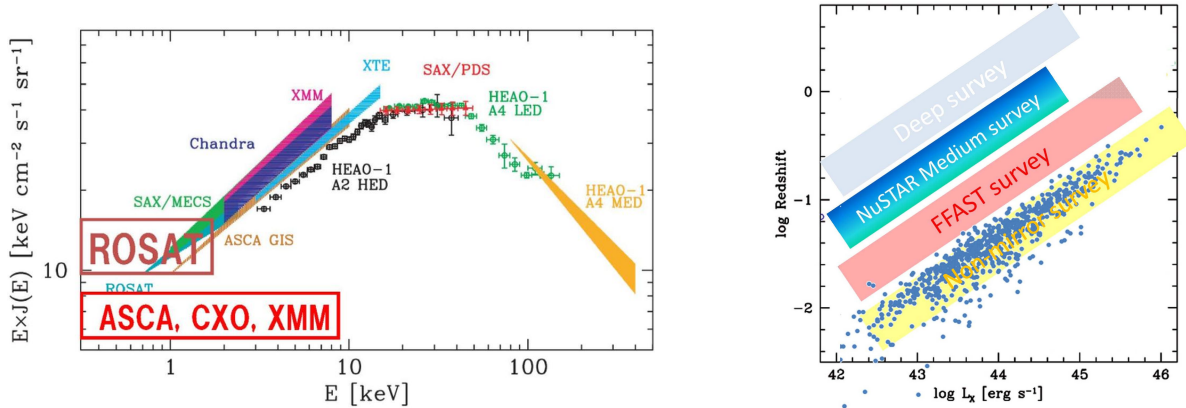


図 5.11 左：宇宙 X 線背景放射のスペクトル (Frontera 2007)。10 keV 以下の領域はいくつかの衛星 (ROSAT, ASCA, CXO, XMM) で詳しく観測されているが、10 keV を越える領域の観測はこれからである。右：硬 X 線での L_x -Z 面上での AGN の観測領域を示す。Swift/BAT は明るい領域の観測を行いその結果を図に示している (Baumgartner 2013)。NuSTAR は暗い領域、FFAST はその間を埋める観測をする。

けを基にしている。例えば、AGN よりも急速な進化が示唆されている超高光度赤外線銀河に、もれなく埋もれた高光度 AGN が存在すれば、この描像が覆されるかもしれない。そこで、AGN の光度関数の進化を突き止めるために、10 keV 以上の硬 X 線による観測を進め、吸収の大きな AGN の無バイアス探索を実行したい。そのためには、異なる検出感度と探査面積を組み合わせた観測を系統的に行なわなければならない。図 5.11 右には硬 X 線での L_x -Z 面上での AGN の観測領域を示す。見かけの光度の明るい AGN については、Swift/BAT による全天探査が既に進んでいる。見かけの光度の暗い AGN については、Nu-STAR による探査が進められている。また、近く打ちあがる ASTRO-H の HXT もこの種の観測が可能である。しかし、これらの観測ではカバーしきれない AGN が残る。我々の提唱する FFAST 衛星は、Swift/BAT よりも 10 倍高い検出感度で、Nu-STAR よりも 10 倍広い領域をくまなく観測することができる。FFAST による「深くて広い」観測は、赤方偏移 0.1-1 の範囲にわたって、表面数密度の小さな「埋もれた高光度 AGN」の系統的探査を、唯一可能にする。

5.7.3 所要経費

望遠鏡衛星関係 29 億、 検出器衛星関係 51 億、 運用 5 億

以上の見積もりは衛星メーカーが ASTRO-H などの科学衛星に対する信頼性と同等のものを確保した場合である。ASTRO-H などの科学衛星は運用を 3 年保証するスタイルになっており、それに基づくこれまでの実績でいえば、実働は 5-10 年である。これに対して、FFAST は当初の重点観測期間の半年の稼働で必要な観測を達成できるようにデザインされている。現在は、このような制限を基に経費見積もりの改訂を進めている。

5.7.4 年次計画

FFAST の建設からの詳細なフローから主要マイルストーンを以下に抽出する。望遠鏡や検出器は ASTRO-H の完成が基本となるので、カッコで示した ASTRO-H のスケジュールよりも 1 年程度遅くなっている。

2013(第 1 年度)	概念設計をすすめ MDR/SRR を行う、基本設計開始	(ASTRO-H FM 製作)
2014(第 2 年度)	基本設計終了後 PDR、詳細設計開始	(ASTRO-H 総合試験)

2015(第 3 年度)	詳細設計終了後 CDR、FM 製作開始	(ASTRO-H 打上)
2016(第 4 年度)	システム PFT、その後 PQR、射場作業/打上	
2017(第 5 年度)	ポインティングによる集中観測 (半年)、レコード盤軌道による延長観測開始	
2018(第 6 年度)	レコード盤軌道による延長観測継続	

5.7.5 実施体制

国内実施体制

FFAST の PI		常深 博 (阪大)
検出器衛星	PI	常深 博 (阪大)
	検出器	中嶋 大、薙野 綾 (阪大)、森 浩二 (宮崎大)
	信号処理	林田 清、穴吹直久 (阪大)、池田博一 (ISAS)
	冷凍機	幸村孝由 (工学院)、平賀純子 (東大)
	バス部	尾崎正伸 (ISAS)、能町正治 (阪大)、NEC
	軌道/FF 制御	河野 功、山元 透、巳谷 真司、池永敏憲 (JAXA)
望遠鏡衛星	PI	國枝秀世 (名大)
	望遠鏡	松本浩典、古澤彰浩 (名大)、岡島 崇 (GSFC)、小賀坂康志 (JST)
	バス部・姿勢制御	尾崎正伸 (ISAS)、NEC
観測計画検討		上田佳宏 (京大)、伊藤真之 (神戸大)、小山勝二 (京大) 馬場 彩 (青学大)、海老沢 研 (ISAS)

国際協力

現状では衛星開発において国際協力は想定していない。

5.7.6 学術コミュニティの合意状況等

FFAST に関係する研究者の多くは高宇連 (高エネルギー宇宙物理連絡会) に属している。2007 年に FFAST の構想が誕生して以来、シンポジウムや学会などを通じて議論してきた。さらに、高宇連総会では種々比較検討がなされた。2012 年度には学術審議会からの指示で、高宇連傘下から出ている 6 種のプロジェクトの一つとして審議されたが、そこで強く押された二つのプロジェクトには含まれなかった。なお、FFAST プロジェクトの鍵となるスーパーミラーと検出器開発のための特別推進研究 (23000004) が 5 か年計画で 2011 年からスタートしている。

5.7.7 大学共同利用

FFAST による観測は広い領域の無バイアスサーベイであり、特定のターゲットを狙うことは予定していない。得られたデータは、リダクションした後は一般に公開することになる。つまりデータはウェブを通して共同利用となる。

5.7.8 プロジェクトの現状

検出器とスーパーミラーについては特別推進研究で準備を進めている。衛星本体に関しては、イプシロンロケットを使った小型科学衛星計画の 3 号機を目指している。3 号機の計画公募が発出され次第応募する。そこで採択されると、概ね年次計画通りとなる。もともと 2012 年度内に計画公募が出る予定であったが、諸事情で遅れている。

5.7.9 天文学・宇宙物理学分科会からのコメント

計画の学術的意義

次期X線天文衛星 Astro-H のためにすでに開発が進められてきている硬X線反射望遠鏡の技術を用い、硬X線反射望遠鏡に必要な長い焦点距離を、反射鏡部分と焦点面部分を分乗させた2台の小型衛星の編隊飛行で実現させ、衛星ペアが同一高度の軌道を回るとつれ自然に実現する広い領域の硬X線走査観測をこれまでにない高い感度で行おうとするもので、その着想はたいへんおもしろい。理学的意義としては、吸収の大きい活動銀河に対し、他計画では実現できないパラメーター領域の無バイアス探査が実現され、工学的意義としては、焦点距離を一定に保持する二衛星編隊飛行技術の開発とその軌道上実証が期待される。

経費、スケジュールの妥当性

衛星を2機用意する必要があるが、経費・スケジュールにはそれなりのインパクトがあろう。

技術成熟度

ミッション部については、Astro-H に向けて開発されてきた技術を使っており、科研費により基礎開発も進められている。編隊飛行についても、JAXA にはオリヒメ・ヒコボシ実験の実績がある。

計画実施体制の妥当性

ミッション部については、それぞれの装置の開発・衛星搭載の経験のある人たちにより実施体制が構成されている。これらの人たちには、Astro-H 衛星の開発に深く関わっている人が多いが、Astro-H 衛星開発の進展を見ながら、FFAST 衛星の開発を進める計画になっている。一方、編隊飛行技術等の、宇宙工学的技術開発の部分については、JAXA の技術者が加わっているが、開発要素は多いと考えられ、そのあたりの陣容が拡充されると、実施体制がより万全となろう。

学術コミュニティでの合意状況

高エネルギー宇宙物理学に関わる計画としては、高エネルギー宇宙物理学コミュニティにおける議論が積み重ねられてきている。現状では、高エネルギー宇宙物理学グループ関係のいくつかの中規模計画の中で、最優先のものを見なされてはいないが、価値の高いミッションと評価されている。一方、編隊飛行等の宇宙工学としての計画の側面について、もう少し広い支持が得られると、計画のより強い推進力を得ることになる。

共同利用体制の妥当性

得られたデータが、共同利用に供されることに、大きな問題はなからう。

総合評価

硬X線望遠鏡の反射鏡の部分と、焦点面検出器の部分とを、2台の小型衛星に分乗させ、同じ高度の軌道を焦点距離を保ちながら編隊飛行することで、広い空の領域を走査観測する計画は、たいへん独創的で理学・工学の両面でたいへんおもしろい。工学的意義も大きいと考えられ、その面からの計画の意義・開発項目・実施体制等が、さらに強く示されると、計画のアピール度をさらに強めることとなる。

第 6 章

太陽研究者連絡会からの提案

6.1 議論のまとめ

現代太陽物理学の重要課題は、(1) フレアの発生機構、(2) コロナ加熱機構、(3) 黒点磁場の起源（太陽活動長期変動）に集約できる。これらの問題を解明するために、わが国は、1981年に「ひのとり」衛星、1991年に「ようこう」衛星、2006年に「ひので」衛星を打ち上げ、世界の太陽スペース観測をリードしてきた。一方、太陽地上観測では、1990年代初頭以後、京大飛騨天文台と国立天文台太陽観測所（三鷹）が可視光で、国立天文台野辺山太陽電波観測所が電波で、スペース観測と相補的な観測を行ってきた。以上の経緯をふまえ、わが国の太陽分野コミュニティでは、5年ほど前から、太陽将来計画検討WG（主査、末松芳法）を立ち上げて、わが国の太陽観測の将来計画を慎重に検討してきた。以下の議論は、それをふまえたものである。

6.1.1 長期計画議論

2010年3月の時点（学術会議天文学・宇宙物理学分科会による「天文学・宇宙物理学の展望と長期計画」のまとめの文書）では、「ひので」衛星（Solar-B）の次の衛星計画であるSolar-C計画のミッションプランには2案あった：A案（太陽極域探査ミッション）と、B案（高分解能撮像ミッション）である。その後、国内、国外の太陽分野コミュニティにおける度重なる議論と、A案は現状では技術的な困難が多いという検討結果もふまえ、最終的に、2011年3月の日本Solar-Cワーキンググループで、B案がSolar-C計画として選定された。一方、A案もSolar-D計画としての実現を目指して検討を継続することが決められた。（以下の図のロードマップ参照）

6.1.2 中規模計画議論の経緯

上記の長期計画議論を背景として、2012年の中頃から中規模計画の議論を始め、2012年9月に太陽観測将来計画ワークショップを三鷹で開催した。そこでは6件の計画案が提案されたが、中規模計画の規模に満たないもの、大学間連携計画として融合できるもの、計画内容が萌芽的なものなどが含まれていたため、4件に絞り込んだ。さらに、9月22日の太陽研究者連絡会（於：大分大学（天文学会秋季年会））において議論を行なった結果、最終的に以下の3件にまとめた。

1) 「次世代太陽圏環境変動観測ネットワーク計画」

推進機関（名古屋大学太陽地球環境研究所、国立天文台、京都大学）、責任者（草野完也、徳丸宗利、花岡庸一郎、上野悟）、予算（20～50億円）、計画希望時期（2010年代前半建設開始、2010年代後半に運用開始）、目的（太陽活動とそれに伴う太陽圏環境変動の実態と原因の解明）、装置概要（惑星間空間シンチレーション観測装置及び太陽周期活動観測装置群）

2) 「次期地上太陽望遠鏡計画」

推進機関 (国立天文台、京都大学)、責任者 (花岡庸一郎)、予算 (20 億円)、計画希望時期 (2017 年建設開始、2020 年運用開始)、目的 (太陽磁場と関連する磁気プラズマ現象の解明)、装置概要 (2m クラスの地上太陽 (+ 恒星) 望遠鏡)

3) 「野辺山電波ヘリオグラフの運用延長計画」

推進機関 (国立天文台、名古屋大学)、責任者 (増田智)、計画希望時期 (2015 年 4 月から 5 年間)、目的 (太陽フレア、太陽長期変動の解明) 装置概要 (既存の野辺山電波ヘリオグラフの運用延長)

これらのうち、1) の「次世代太陽圏環境変動観測ネットワーク計画」は、太陽全体の長期変動観測 (シノプティック観測) という観点から、スペース観測や 2m 級望遠鏡による高解像度観測などと相補的であり、大学間連携事業として緊急に推進すべき課題とされた (S 評価)。2) の「次期地上太陽望遠鏡計画」は、日本のコミュニティにとって、いづれ必要とされる装置であろうが、Solar-C の開発やシノプティック観測装置の拡充等に比べると緊急性は低い。よって A (または B) 評価とされた。3) の「野辺山電波ヘリオグラフの運用延長計画」は、運用体制として責任を持って引き受ける機関があるかどうかが一番の問題であり、そのような機関が出現すれば、運用延長計画を中規模計画として学会会議に推薦することにしたが、結局、11 月末までにそのような機関は現れなかった。

以上により、太陽分野として学会会議に推薦する中規模計画は以下の 2 計画とした。

1) 「次世代太陽圏環境変動観測ネットワーク計画」: S 評価 (緊急性も S) (大学間連携)

2) 「次期地上太陽望遠鏡計画」: 学問的には A 評価だが、緊急ではない (したがって、そこは B 評価)

その後、2013 年 2 月 17 日 - 18 日の学会会議天文学・宇宙物理学将来計画シンポジウムの際のコメントを取り入れ、野辺山太陽電波ヘリオグラフの延長を、1) の次世代太陽圏環境変動観測ネットワーク計画に組み込んだ形に修正した。以下に紹介する計画はこの修正を経て、5 月 29 日の学会会議シンポジウムの際に再提案されたものである。

6.1.3 大規模計画との関係

図 6.1 に大規模計画としてのスペース観測 (Solar-C 計画とその後の Solar-D 計画) と中規模計画としての地上観測のロードマップを示す。Solar-C 計画は、ひので (Solar-B) の後継ミッションとして、彩層の磁場観測とコロナの高解像度観測により、太陽の磁気活動の全貌を明らかにしようという計画であり、2020 年打ち上げを目指して準備が進められている。ここに提案されている中規模計画は、Solar-C 計画とは相補的な役割を果たすものである。すなわち、わが国の太陽分野の観測の将来計画としては、Solar-C 計画を最も重要な計画と位置づけ、それを実現するためには、わが国全体の太陽分野コミュニティの裾野を広げることが重要という観点から、狭い意味での太陽観測だけでなく、太陽物理学と地球物理学の境界分野の太陽圏地上観測を行っている大学の計画も、太陽圏環境変動ネットワーク計画に含めるようにしている。本中規模計画を通して、Solar-C 計画を推進する人材を関連する大学で幅広く育成し、Solar-C ではカバーできない観測を地上で行うための準備を進めることが、現在の緊急の課題である。

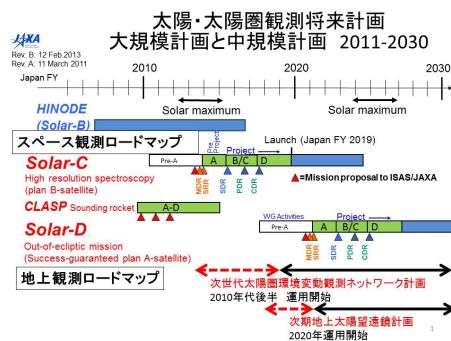


図 6.1 日本の太陽スペース観測と太陽地上観測のロードマップ。

6.2 次世代太陽圏環境変動ネットワーク観測計画

本計画は人類の生存環境である太陽圏のダイナミクスを理解しその変動予測を実現することを目指して、包括的な地上観測網と学際研究センターを構築し、衛星観測計画との密接な協調及び地球環境研究との有機的な連携のもとで次世代太陽圏環境研究の全日本体制を構築するものである。

6.2.1 計画の概要

太陽活動の変動は太陽圏と共に地球環境及び人間社会にも影響を与える。本計画はこの太陽圏環境変動を包括的に捉えるための全国的な地上観測ネットワークと学際研究センターを構築するものである。このため、本計画は以下の3項目を主たる目的として実施される。

1. ひので、Solar-C、及び Solar-D など衛星計画との密接な協調のもとで、我々が住む環境としての太陽・太陽圏システムの包括的な研究を組織的に実現し、宇宙天気及び宇宙気候の理解とその変動予測の実現に貢献する。
2. 大学及び関連研究機関における太陽・恒星分野の人材育成と施設整備を相互に協力して効果的に実現する。
3. 地球環境研究と太陽・恒星研究の学際連携の主たる担い手として、分野間連携を推進する。

6.2.2 科学的意義

本研究では図 6.2 にあるように、宇宙天気（数分から数十日程度の短期的な宇宙環境変動）及び宇宙気候（数か月から数十億年に渡る長期的な宇宙環境変動）に関する科学研究をそれぞれ実現する。

- **宇宙天気研究:** 太陽フレアの発生を予測するスキームを開発すると共に、太陽高エネルギー粒子 (SEP) やコロナ質量放出 (CME) などによる宇宙天気現象の正確な影響評価を実現するために必要な観測ネットワークを整備する。これにより、太陽・太陽圏擾乱のメカニズムを理解すると同時に信頼性の高い宇宙天気予報の実現に貢献することができる。

このため、光学観測によるフィラメント放出の磁場・速度場測定（京都大学、茨城大学）、衝撃波伝搬の連続電波観測（NICT, 東北大学）、惑星間空間シンチレーション (IPS) 電波測定によるコロナ質量放出 (CME) 3次元構造の観測的再現（名古屋大学）、全地球的なミュオン測定（信州大学）による磁気雲接近の前兆観測などを実現する。さらに、太陽フレアと恒星フレアの詳細な比較研究により、これまでに観測されていない巨大な太陽フレアの可能性とその地球影響についても明確化する。

- **宇宙気候研究:** 太陽活動長期変動と地球気候の間には様々な時間スケールで相関があることが見出されているが、その因果関係を支配するメカニズムは未解明である。本計画では太陽黒点活動と太陽放射スペクトル及び太

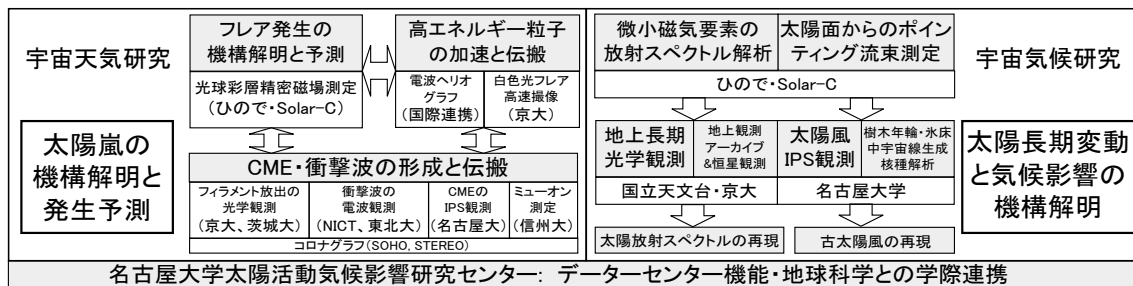


図 6.2 次世代太陽圏環境変動ネットワークの研究課題と連携体制

表 6.1 各計画のロードマップと所要経費 (5 年分)

グループ	機関	計画	観測開始年など	予算 (円/5年)
光学	茨城大学	H α 望遠鏡 (NICT より移設)	2015 年観測開始	0.2 億円
	国立天文台	太陽磁場長期観測システム (新設)	2016 年観測開始	8.5 億円
	京都大学	太陽磁場活動望遠鏡 (SMART) (改修)	2016 年観測開始	2.8 億円
	京都大学	ペルー・フレアモニター望遠鏡 (更新)	2015 年観測開始	1.4 億円
電波・ 宇宙線	東北大学	高感度太陽電波受信システム AMATERAS-II (新設)	2018 年観測開始	1.5 億円
	NICT	新電波バースト監視システム (建設中)	2014 年観測開始	別予算
	国立天文台	電波ヘリオグラフ (既設)	2020 年まで継続	別予算
	名古屋大学	次世代 IPS 観測システム (開発)	2018 年実証機完成	2.5 億円
	信州大学	グローバルミュオン観測ネットワーク (拡張)	2015 年観測開始	0.7 億円
センター	名古屋大学	太陽活動気候影響研究センター (新設)	2014 年度設置	2.0 億円
			合計	19.6 億円

陽風ダイナミクスの関係を決めるメカニズムを明らかにすることにより、太陽活動が地球気候に大きな影響を与えたと考えられるマウンダー極小期の太陽放射及び太陽風の再現を行うためのデータを獲得する。

このため、ひので及び Solar-C 衛星による太陽表面高解像度観測と惑星間空間シンチレーションによる太陽風観測との詳細な比較を行うと共に、太陽表面磁場の長期高精度観測 (国立天文台)、過去 100 年間のアーカイブデータが蓄積 (京都大学、国立天文台) されている Ca II 線の地上観測 (京都大学) 継続し、太陽類似星の観測データとも比較することで太陽活動の長期変動影響を明確化する。

6.2.3 所要経費

本計画を構成する各項目の所要経費 (5 年分) とその合計は表 6.1 の通りである。これらの経費を大学間連携予算として措置することにより、効率的に観測体制を構築することができる。このうち、情報通信研究機構 (NICT) の新電波バースト監視システムは 2012 年度の補正予算にてすでに措置されている。また、国立天文台の電波ヘリオグラフ (現在稼働中) は 2015 年に閉鎖予定であるが、国際コンソーシアムを設立し、海外からの財政支援を得て運用を延長 (最長 5 年) する可能性について 2013 年後半に結論を出す。

6.2.4 年次計画

各項目に関して、表 6.1 の観測開始年までに装置の開発整備を進め、順次観測を開始する。これにより、2018 年までに全ての観測装置の稼働を実現し、2019 年度打ち上げを予定している次期太陽観測衛星 Solar-C と連携して次期太陽周期 (サイクル 25) の包括的な観測を実現することができる。一方、太陽活動気候影響研究センター (名古屋大学) を 2014 年度に設置することで、多様なデータの蓄積と学際研究のための体制を早期に整備する。太陽活動は現在、現代天文学が経験したことのない特異な活動の低下を示している可能性が高く、本計画の実現は緊急の課題である。

6.2.5 実施体制

国内実施体制

本計画は以下の 3 グループの有機的な協力によって実施される。

1. 太陽地上光学観測ネットワーク： 京都大学太陽磁場活動望遠鏡 (SMART) の改修による彩層磁場全面観測、国立天文台太陽磁場長期観測システムの新設による太陽磁場長期変動観測、茨城大学と NICT の協力による H α

多波長観測を相互に協力しながら進めることにより、フィラメント放出の連続精密観測を実現し、宇宙天気擾乱の原因である CME の初期条件を正確に捉える体制を整える。また、彩層活動と黒点活動の関係を解明し、太陽活動の長期変動とその環境影響のメカニズムを明らかにするため、太陽磁場及び彩層輝度の長期観測を継続して実施できる体制を整える。

2. 太陽電波・宇宙線観測ネットワーク： 太陽フレアから CME の形成・伝搬までの全過程を異なる周波数で捉える電波観測ネットワークを組織の枠を超えて構築する。このため、太陽フレアによる高エネルギー粒子生成過程を国立天文台野辺山ヘリオグラフにて、フィラメント放出と CME の形成を NICT 新太陽電波バースト監視システム (70MHz-9GHz)、東北大学太陽電波望遠鏡 AMATERAS (既存装置、50MHz-500MHz) 及び AMATERAS-II (15MHz-150MHz) にて連続追跡する。さらに、新 phased array アンテナ技術を導入した名古屋大学次世代 IPS 観測システムの実証機を完成させて惑星間 CME の追尾性能を格段に向上させる。また、信州大学の次世代グローバルミュオン計測ネットワークを拡張し、地球周辺に接近する磁気雲を宇宙線観測によって事前に捉える体制を整える。
3. 太陽活動気候影響研究センター： 名古屋大学太陽地球環境研究所 (STE 研) と国立天文台が協力し、天文学と地球環境研究の学際連携を目指した新研究センターを STE 研に設立する。同センターは太陽圏ネットワーク観測の統合データセンターの役割を果たすと共に、Solar-C サイエンスセンターとして衛星データの学際的科学利用を推進する母体としての役割も果たす。

国際協力

太陽地上光学観測ネットワークの一環として、ペルー、サウジアラビア、アルジェリアにそれぞれフレア望遠鏡を設置し、連続した太陽面爆発の監視体制を整える。このうち、本計画ではすでに設置されているペルー望遠鏡のフィルター更新を実施する。また、信州大学による次世代グローバルミュオン計測ネットワークの整備のため、南アフリカにミュオン計 (検出面積 25m^2) を新設すると共にクウェートのミュオン計の検出面積を 9m^2 から 3 倍に拡充する。すでに各国のパートナーとは連携の枠組みがそれぞれ出来上がっている。

6.2.6 学術コミュニティの合意状況等

太陽研究者連絡会が主催し 2012 年 9 月に国立天文台 (三鷹) 及び大分大学、2013 年 4 月に京都大学、及び同 5 月に名古屋大学においてそれぞれ太陽研究将来計画シンポジウムを開催した。それらの議論をもとに本プロジェクトの計画は策定されている。また、本プロジェクトについては 2013 年 4 月に一新された太陽研究者連絡会運営委員会においても太陽研究将来計画の一環と位置付けることが了承されており、太陽コミュニティの合意のもとで計画されている。

6.2.7 大学共同利用

本プロジェクトは大学及び関連研究機関の連携プロジェクトであると同時に、全国の研究者の共同利用を前提とした計画である。このため、名古屋大学 STE 研に設置することが計画されている太陽活動気候影響研究センターはプロジェクト全体のデータを集約し全国の研究者へ供与する役割を担う。

6.2.8 プロジェクトの現状

現在、各参加組織にてそれぞれ設備整備の準備が進められている。2014 年度概算要求として、国立天文台の太陽磁場長期観測システム、名古屋大学の太陽活動気候影響研究センターの 2 件が提案されたが、予算化には至らなかった。現在、2015 年度の大学間連携予算として概算要求する準備が進められている。

6.2.9 天文学・宇宙物理学分科会からのコメント

計画の学術的意義・経費、スケジュールの妥当性

本計画は太陽-太陽圏活動の包括的な理解をもとに、人間社会に直接影響の大きな宇宙天気・宇宙気候を理解し、さらにその将来予測を行うことを目指したものである。宇宙天気は太陽フレアに伴い発生し、磁気嵐、放射影響や高エネルギー粒子の影響など多彩な形で地球に影響を与える。この課題へのアプローチは、社会的ニーズも高いことから、その意義は大きいといえる。フレア発生の機構解明と予測のための太陽面詳細観測をひのでや Solar-C を中心に行い、本計画においては、その発生を地球上における多様な形で観測することを主目的としており、適切な計画といえる。他方宇宙気候に関しては、観測可能な数ヶ月、数年という時間スケールから、10億年という地質学的なタイムスケールまでを想定している。この内、数百年スケールで現れるマウンダー極小期とそれに相関した環境変動などに特に注目した計画となっている。太陽活動と地球表層環境の関係は地球科学的に重要な問題とされており、太陽研究の視点からこの問題に取り組むのは有意義なことといえる。他方、これらの自然現象の間の関係は、相関があったからといってそれが直接的な原因と結果であるのかは自明ではない。他の物理現象が関与していないのかどうかの検証ぬきには、真に意味のある科学とすることは不可能と考えられる。

以上から、本計画は、現象のタイムスケールごとに得べきデータを明確にすることにより、より有意義な計画とすることが可能と考えられる。すなわち、フレアにともなう日単位の変化、太陽周期にともなう変化、観測記録の存在する100年スケールの変化、地質記録などに依存するそれ以上のタイムスケール等に応じた、データの種類や質を十分に検討し、単なる個別大学の個別研究を集めた以上の成果を生み出せるよう、それらの階層性の結合について、格段の取り組みを進めることが重要であろう。

技術成熟度

個別の大学における装置開発に関しては、技術的には問題はないと思われる。

計画実施体制の妥当性・学術コミュニティでの合意状況

本計画は大学連携である点に特徴があり、個々の計画は小規模なものがほとんどである。実施に当たっては、研究が分散的とならず、全体として高い成果をあげるための仕組みを、より一層明確化することが望ましい。

本計画はコミュニティの多くが関与することから、太陽研究者連絡会において高い優先度が付され、十分な合意が形成されている。

共同利用体制の妥当性

(共同利用研究所等が中心的な役割を果たすわけではないので、特別の評価は不要と考えられる)

総合評価

本計画は、太陽活動と地球環境変動の関係を多様なタイムスケールで理解するという重要な意義をもっている。本研究を真に有意義なものとするためには、各大学における研究の積み重ねをどのように大きな科学的成果に発展させるかについての継続的な取り組み、すなわち科研費等による個別研究を超えるスキームを意識的に作り上げることが重要であろう。

6.3 次期地上太陽望遠鏡計画

6.3.1 計画の概要

本計画は、2020年代における「中口径」レベルの次世代地上太陽望遠鏡の建設を提案するものである。太陽物理、太陽圏物理(+恒星物理)に貢献する計画で、口径2m程度を目標とする。活動現象を起こす磁場進化をその特徴的パラメーターに合わせ、小口径では難しい精密な観測を、大口径では困難なある程度の視野を確保しつつ行う。活動現象を起こす磁場進化の特徴的パラメーターから

- 活動領域をカバーする視野 $5'$ (20万 km)
- 空間分解能 $0.2''$
- 偏光測定感度 10^{-4}
- 数分～数十分程度の時間分解能
- 波長域 $0.3\sim 1.6\mu$ 、光球・彩層を合わせてとらえるため特に近赤外性能を重視

を同時に実現することが必要であり、このためには口径1~2mが最適として選択した。入射光子を最大限利用、多波長・多高度偏光観測により磁場進化と活動現象をとらえる装置であり、特に近赤外を重視するものとなる。図6.3に、本計画の概念に近いドイツが建設した1.5m太陽望遠鏡を参考として示した。設置場所は国内を念頭に入れつつ国際協力で海外の可能性も探る。目指す観測は活動現象の定常的な詳細観測が中心であり、また、恒星観測も視野に入れ、教育や装置開発のインフラとしても機能し、長期にわたる運用を目指すものである。

6.3.2 科学的意義

太陽フレアなど太陽表面での様々な現象は太陽表面において特徴的な広がりを持つ活動領域の中の磁場進化により起こり、地球や人類にも影響する太陽系のプラズマ環境変動の原動力となっていく。太陽地球圏環境を知るための基本データであるこのような現象のもととなる磁場進化の観測のため、必要な範囲の磁場構造を視野に収め、かつ十分な空間分解能と偏光測光精度での観測を実現するのが本計画の目的である。2010年代以降の光学赤外域における最先端の太陽観測では急速に大口径化が進み、Solar-Cや「太陽の顕微鏡」とまで言われるATST(口径4m地上望遠鏡)による詳細観測が行われ、また小口径望遠鏡による太陽全体の観測も幅広く行われるが、活動現象を起こす磁場進化をその特徴的パラメーターに合わせ、小口径では難しい精密さと詳細観測との両立が困難なある程度の視野の確保を同時に行う観測も必要となる。フレア、コロナ質量放出のような太陽圏へとつながる現象は、現在では磁場観測に基づくその発生機構の解明の物理的理解が進み、観測結果をもとに現象の予測を行っていくことも視野に入りつつある。予測のもととなる観測は活動領域磁場進化の観測であり、2020年代においては、太陽物理学が実際の観測とそれに基づく理論的な磁場発展の予測により太陽圏研究に貢献していくことになる。

6.3.3 所要経費

予算20億円を見込んでいるが、実際には大型科研費レベルから幅広く実現性を検討したい。

6.3.4 年次計画

太陽の地上観測グループとしては、当面(2010年代の数年間)太陽圏観測ネットワーク立ち上げに注力する。また同時期に太陽コミュニティとしてはSolar-C計画の実現と装置開発にも力を割くことになる。この間はしばらく京都大学のドームレス望遠鏡を引き続き主力装置とし、これをベースに基礎開発を行い、合わせてサイト調査や海外望遠鏡での

観測といった準備作業を通して次期望遠鏡の具体案を練る。2010年代末頃に状況を見つつ本計画の次期太陽望遠鏡の予算要求を行い、2020年代中に次世代最先端望遠鏡 (Solar-C、ATST) との相補的な活躍を目指す。

6.3.5 実施体制

国立天文台の岡山天体物理観測所 65cm 太陽望遠鏡、乗鞍コロナ観測所 25cm コロナグラフや、京都大学飛騨天文台 60cm ドームレス望遠鏡の後継にあたる装置であり、また太陽地上観測グループとして最大の将来計画である。現在太陽地上観測に携わっている機関が共同して計画の実現・装置運用に当たる。

6.3.6 学術コミュニティの合意状況等

もともと国立天文台・京都大学に加え名古屋大学なども含めたグループによる検討、提案が行われてきた計画であり、2008年の太陽将来計画検討書への盛り込み・2009年の学術会議の長期計画への提案を経て、今回の学術会議中規模計画に太陽研究者連絡会から提出した2つの計画のひとつとして提案を行ったものである。

6.3.7 大学共同利用

目指す観測は活動現象の定常的な詳細観測が中心であり、これは口径の大きい望遠鏡による先端的観測による物理の研究と、シノプティック (太陽全体) のモニター観測をつなぐ位置づけとなる。また、恒星観測も視野に入れ、教育や装置開発のインフラとしても機能し、長期にわたる運用を目指すものである。

6.3.8 プロジェクトの現状

望遠鏡の口径を拡大する上で解決すべき技術的課題の中で、わが国では近赤外観測や高度偏光測光など既に一部実現しているものもあるが、望遠鏡の冷却など太陽望遠鏡特有の機能、補償光学、サイト調査などは現在検討中・開発中であり、今後さらに詰めていく。

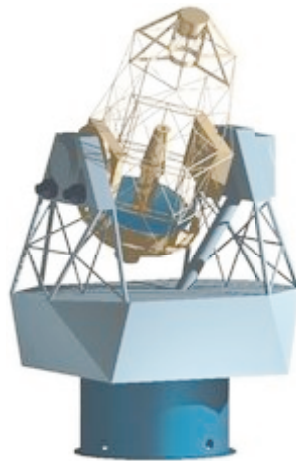


図 6.3 ドイツが建設した口径 1.5m の太陽望遠鏡。開放型望遠鏡技術による低コスト中口径装置であり、本計画の概念に近い先行装置であるので、参考として掲げる。

6.3.9 天文学・宇宙物理学分科会からのコメント

計画の学術的意義

本計画は、スペースからの可視光太陽観測と地上におけるシノプティック太陽全面観測の間に位置する観測として提案されたものである。スペース観測はリスクがあり、常時可能ではない。また、取得できるデータ量には限界がある。したがって、地上で取得可能な波長域の観測に関しては、地上で実験的な施設を持つことの学術的な意義は大きい。超高時間分解能（ミリ秒）可視光観測や、多波長高精度偏光観測など、大量のデータ取得をともなう特色ある「実験的」観測は、地上でしかできない。それが世界各国で中口径（1-2 m）太陽地上望遠鏡が近年相次いで建設されている理由である。また、口径4 m地上可視光太陽望遠鏡も米国で計画（ATST）が進みつつある。そのような情勢で、コミュニティの規模の小さい日本の太陽研究グループが、スペース観測（Solar-C計画）を進めつつ、2 m級地上太陽望遠鏡計画を実現し、成果を挙げることができるかどうか、大きな疑問がある。

経費、スケジュールの妥当性

経費、スケジュールについては、まだ詳細に検討・公表されていないので、厳密な評価はできない。ただし、提案されている予算規模、スケジュールは、諸外国の同程度の計画と比較すると、実現可能な範囲であると思われる。

計画実施体制の妥当性

国立天文台の太陽観測所と京都大学飛騨天文台が、本計画の実施機関となると想定されているが、ともに次期太陽スペース観測（Solar-C）の責任機関となることが想定されているので、そういう状況下で、地上太陽観測の新しい計画を推進するのは、きわめて困難であると考えられる。

学術コミュニティでの合意状況

現時点では、日本で2 m級太陽地上望遠鏡が必ず必要という合意はない。

共同利用体制の妥当性

これについては特に議論はないが、これまでの太陽地上望遠鏡と同様な共同利用がなされるものと考えられる。

総合評価

以上に書いたように、規模の小さな日本の太陽研究コミュニティがスペース観測（Solar-C計画）を推進しつつ、2 m級地上太陽望遠鏡を開発し、科学成果を挙げられるかどうか？これが最大の疑問である。現時点では、高分解能地上可視偏光観測については、京都大学飛騨天文台のドームレス太陽望遠鏡を今後10年間スペース観測の実験室として活用するのが、コミュニティの規模から考えた最善策ではなかろうか？

ただし、太陽だけでなく恒星も観測する太陽恒星両用望遠鏡が技術的に実現し、恒星可視光コミュニティも計画に参画するならば、日本の天文学の特色を発揮できる興味深い計画となる可能性は残されている。

付録 A

著者

A.1 第 22 期日本学術会議 物理学委員会 天文学・宇宙物理学分科会メンバー

本冊子は、以下のメンバーでとりまとめたものである。

役職	氏名	所属・職名
委員長	観山正見	広島大学学長室特任教授
副委員長	須藤靖	東京大学大学院理学系研究科教授
幹事	杉山直	名古屋大学大学院理学研究科教授
幹事	中川貴雄	宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所教授
	井上一	宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所名誉教授
	岡村定矩	法政大学工学部創生科学科教授
	奥村幸子	日本女子大学理学部数物科学科教授
	面高俊宏	鹿児島大学大学院理工学研究科特任教授
	海部宣男	自然科学研究機構国立天文台名誉教授
	梶田隆章	東京大学宇宙線研究所所長・教授
	國枝秀世	名古屋大学副総長・教授
	小山勝二	京都大学名誉教授
	佐藤勝彦	自然科学研究機構機構長
	芝井広	大阪大学大学院理学研究科教授
	柴田一成	京都大学大学院理学研究科附属天文台台長・教授
	永原裕子	東京大学大学院理学系研究科教授
	林正彦	自然科学研究機構国立天文台台長
	福島登志夫	自然科学研究機構国立天文台教授
	牧島一夫	東京大学大学院理学系研究科教授
	森正樹	立命館大学工学部教授

役職名は、2013 年 12 月現在のものである。

A.2 各プロジェクトの紹介

各プロジェクトについて、プロジェクトの紹介部分の著者と、プロジェクト紹介ホームページを、以下に記す。なお、各プロジェクトの紹介の最後の節「天文学・宇宙物理学分科会からのコメント」は、本分科会において記したものである。

1. 天文学・宇宙物理学分野における中規模将来計画の検討
著者: 天文学・宇宙物理学分科会
2. 宇宙電波懇談会からの提案
 - 2.1 議論のまとめ
 - 著者: 宇宙電波懇談会委員長 百瀬宗武 (茨城大学)
 - 2.2 ALMA Extended Array (アルマ拡張アレイ)
 - 著者: 亀野 誠二 (国立天文台チリ観測所 / Joint ALMA Observatory)
 - プロジェクト紹介サイト: <http://milkyway.sci.kagoshima-u.ac.jp/groups/workshopalmaextendedarray2012/>
 - 2.3 きゃらばん-サブミリ、銀河中心ブラックホール撮像装置 (CARAVAN-submm)
 - 著者: 三好真 (国立天文台)
 - プロジェクト紹介サイト: http://phyas.aichi-edu.ac.jp/~takahasi/Project_Horizon/meeting.html
 - 2.4 南極 10m テラヘルツ望遠鏡計画
 - 著者: 中井直正 (筑波大学)、市川隆 (東北大学)、本吉洋一 (国立極地研究所)、ほか南極天文連携コンソーシアム
 - プロジェクト紹介サイト: <http://www.px.tsukuba.ac.jp/home/astro/nakai/www0/study.html>
 - 2.5 CMB 偏光観測衛星 LiteBIRD
 - 著者: 羽澄昌史 (高エネルギー加速器研究機構)
 - プロジェクト紹介サイト: <http://cmb.kek.jp/litebird/>
 - 2.6 超広視野・広帯域の大口径ミリ波サブミリ波単一望遠鏡による暗黒宇宙の大規模構造の探査
 - 著者: 川邊良平 (国立天文台 野辺山宇宙電波観測所)
 - プロジェクト紹介サイト: なし
3. 光学赤外線天文連絡会からの提案
 - 3.1 議論のまとめ
 - 著者: 光学赤外線天文連絡会 前委員長 岩室史英 (京都大学)、委員長 川端弘治 (広島大学)
 - 3.2 京都大学 3.8m 新技術望遠鏡
 - 著者: 長田哲也 (京大理)
 - プロジェクト紹介サイト: <http://www.kusastro.kyoto-u.ac.jp/psmt/>
 - 3.3 南極赤外線望遠鏡計画
 - 著者: 市川隆 (東北大学)、中井直正 (筑波大学)、本吉洋一 (国立極地研究所)、ほか南極天文連携コンソーシアム
 - プロジェクト紹介サイト: <http://www.astr.tohoku.ac.jp/~ichikawa/antarctic/antarctic.html>
 - 3.4 すばる望遠鏡次世代広視野補償光学システム
 - 著者: 有本信雄 (国立天文台・ハワイ観測所)
 - プロジェクト紹介サイト: <http://www.naoj.org/Projects/newdev/>
 - 3.5 位置天文衛星・小型 JASMINE

- 著者: 郷田直輝 (国立天文台)
 - プロジェクト紹介サイト: <http://www.jasmine-galaxy.org/index-ja.html>
 - 3.6 東京大学アタカマ天文台 (TAO) 計画
 - 著者: 吉井謙 (東京大学)
 - プロジェクト紹介サイト: <http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/TAO>
 - 3.7 超広視野分光器 Prime Focus Spectrograph (PFS)
 - 著者: 村山斉、菅井肇、高田昌広 (Kavli IPMU)
 - プロジェクト紹介サイト: <http://sumire.ipmu.jp/en/2652>, <http://sumire.ipmu.jp/pfs/index.html>
4. CRC (宇宙線研究者会議) からの提案
- 4.1 議論のまとめ
 - 著者: CRC 実行委員長 神田展行 (大阪市立大学)
 - 4.2 ニュートリノレス二重ベータ崩壊探索 KamLAND2-Zen
 - 著者: 井上邦雄 (東北大学ニュートリノ科学研究センター)
 - プロジェクト紹介サイト: <http://www.awa.tohoku.ac.jp/kamland>
 - 4.3 ダークマター探索 XMASS
 - 著者: 鈴木洋一郎 (東京大学宇宙線研・カブリ IPMU)
 - プロジェクト紹介サイト: <http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/xmass>
 - 4.4 JEM-EUSO:国際宇宙ステーション日本実験棟に設置する極限エネルギー宇宙天文台
 - 著者: 戎崎俊一 (理化学研究所)、the JEM-EUSO collaboration
 - プロジェクト紹介サイト: <http://jemeuso.riken.jp/>
 - 4.5 CTACTA 国際宇宙ガンマ線天文台
 - 著者: 手嶋政廣 (東京大学宇宙線研究所)
 - プロジェクト紹介サイト: <http://www.cta-observatory.jp/>
 - 4.6 TA2 超高エネルギー宇宙線望遠鏡 TA2
 - 著者: 佐川宏行 (東京大学 宇宙線研究所)
 - プロジェクト紹介サイト: なし
5. 高エネルギー宇宙物理連絡会からの提案
- 5.1 議論のまとめ
 - 著者: 高エネルギー宇宙物理連絡会 委員長 松本浩典 (名古屋大学)
 - 5.2 広天域突発 X 線天体監視 WF-MAXI
 - 著者: 河合誠之、谷津陽一、有元誠 (東工大) 富田洋、上野史郎、木村公 (JAXA)、三原建弘、芹野素子 (理研)、吉田篤正、坂本貴紀 (青学大)、常深博 (阪大)、幸村孝由 (工学院大)、根来均 (日大)、上田佳宏 (京大) ほか WF-MAXI チーム
 - プロジェクト紹介サイト: <http://www.hp.phys.titech.ac.jp/wfmaxi/> (準備中)
 - 5.3 ダークバリオン探査衛星 DIOS
 - 著者: 大橋隆哉 (首都大学東京 理工学研究科)
 - プロジェクト紹介サイト: <http://www-x.phys.se.tmu.ac.jp/dios/>
 - 5.4 ガンマ線バーストを用いた初期宇宙探査計画 HiZ-GUNDAM
 - 著者: 米徳大輔 (金沢大学)、HiZ-GUNDAM ワーキンググループ
 - プロジェクト紹介サイト: <http://astro.s.kanazawa-u.ac.jp/~yonetoku/hiz-gundam/index.htm>
 - 5.5 X 線ガンマ線偏光観測計画 PolariS
 - 著者: 林田清 (大阪大)、郡司修一 (山形大)、玉川徹、三原建弘 (理研)、堂谷忠靖 (JAXA)、水野恒史、

高橋弘充 (広島大)、古澤彰浩 (名古屋大)、Keith Jahoda(GSFC/NASA) and PolariS-WG

– プロジェクト紹介サイト: <http://wwwxray.ess.sci.osaka-u.ac.jp/~polaris/>

● 5.6 MeV/sub-MeV 全天サーベイ CAST 計画

– 著者: 中澤知洋 (東大理)、高橋忠幸 (JAXA、東大理)、田島宏康 (名大)、釜江常好 (東大理)、国分紀秀、高島健 (JAXA)、田代信 (埼玉大)、玉川徹 (理研)、寺田幸功 (埼玉大)、能町正治 (阪大)、深沢泰司 (廣大)、牧島一夫 (東大理、理研)、水野恒史 (廣大)、三谷烈史、吉光徹雄、渡辺伸 (JAXA)、一戸悠一 (東大理、JAXA)、武田伸一郎 (JAXA)、内山泰伸 (立教大)、榎戸輝揚 (NASA) ほか CAST WG

– プロジェクト紹介サイト: なし

● 5.7 硬 X 線サーベイ計画 FFAST

– 著者: 常深博 (阪大)、國枝秀世 (名大)、河野 功 (JAXA)、上田佳宏 (京大)、伊藤真之 (神戸大)、FFAST チーム

– プロジェクト紹介サイト: <http://wwwxray.ess.sci.osaka-u.ac.jp/ffast/FFAST/Top.html>

6. 太陽研究者連絡会からの提案

● 6.1 議論のまとめ

– 著者: 太陽研究者連絡会 前委員長 柴田一成 (京都大学)、委員長 草野完也 (名古屋大学)

● 6.2 次世代太陽圏環境変動ネットワーク観測計画

– 著者: 草野完也 (名古屋大学)

– プロジェクト紹介サイト: なし

● 6.3 次期地上太陽望遠鏡計画

– 著者: 花岡庸一郎 (国立天文台)、ほか 次期地上太陽望遠鏡計画チーム

– プロジェクト紹介サイト: なし

役職名は、2013 年 12 月現在のものである。