

Chapter 1

Executive Summary

1.1 背景: すばる望遠鏡将来装置計画の検討

すばる望遠鏡は 1999 年のファーストライト、2000 年の共同利用開始以来様々な天文学の領域において従来の知見を大きく更新する優れた成果を挙げてきた。

世界には 8m 級の望遠鏡は既に多数存在しているが、すばる望遠鏡には、高度な制御技術とマウナケアの良好な環境による優れた像質と、主焦点にとりつける広視野観測装置 (Suprime-Cam, FMOS) という、他に類をみない特徴がある。また、4つの焦点に多彩な観測装置を備え、様々な観測の要求に応えられるシステムとなっていることも大きな特徴である。

ハワイ観測所と日本の光赤外天文学コミュニティは、すばる望遠鏡 第一期観測装置に加え、MOIRCS、AO188、FMOS など新たな観測装置の開発、運用を行ってきた。なかでも AO188 は高い大気ゆらぎ補正能力をもち、IRCS、HiCIAO 等と組み合わせた観測で活躍している。また LGS の導入により観測可能な天域が広がり、特に系外銀河の観測が盛んに行われるようになった。

今後もすばる望遠鏡が優れた成果を挙げ続けるためには、その特徴を活かした観測装置の開発が欠かせない。すばる望遠鏡の将来装置の在り方については、すばる小委員会が主導してまとめた提言書¹(2009 年 3 月) に以下の候補が挙げられていた:

1. 超広視野可視光カメラ
2. 広視野多天体分光器
3. 広視野近赤外線カメラ
4. 近赤外線面分光装置

これらのうち (1) については、Hyper Suprime-Cam が 2012 年内のファーストライトを目指しコミッションングフェーズに入っている。(2) については、かつて WFMOS として検討された成果をもとに、仕様を更新した PFS(Prime Focus Spectrograph) が、IPMU を中心とする国際協力で検討されている。一方、(3)、(4) はその重要性が以前からよく認識されているものの、具体的な装置計画としてこれまで検討が十分に進んでこなかった。

ハワイ観測所では、このすばる小委員会の提言に呼応する形で、将来装置の検討を進めてきた。その中で、広視野の補償光学 (Adaptive Optics; AO) 装置とそれに対応する広視野近赤外線装置が有力な候補の一つとして認識された。そこで、このような新装置の実現性をより具体的に検討するため、観測所外のメンバーにも加わって頂き、すばる望遠鏡次世代 AO 検討ワーキンググループ (以下 ngAOwg) を 2011 年 1 月に組織して、技術検討、サイエンス検討を開始した。さらにコミュニティから幅広いサイエンスへの可能性を掘り起こすため、2011 年 9 月に、大阪大学においてすばる望遠鏡次世代 AO ワークショップ² を開催し、広視野 AO で可能になるサイエンスについて発表、議論を行った。

本検討報告書は、このワーキンググループでの検討と、サイエンスワークショップでの発表 (その後の検討も含む) をまとめたものである。

¹http://www.naoj.org/Science/SACM/sacreport/SAC_teigen_2008.pdf

²ワークショップ web ページは <http://www.naoj.org/Projects/newdev/ws11b/>

1.2 すばる望遠鏡 次世代広視野 AO システム

広視野 AO システムにはその実装方法と特徴によっていくつかのバリエーションがある (Section 4.1 参照) が、主として ngAOwg において検討されたのは、

1. 地表層補償光学系 (Ground-Layer AO; GLAO)
2. 多天体補償光学系 (Multi-Object AO; MOAO)

の二種類である。

GLAO は 10 分角を超える視野全体にわたって像質を改善する技術である。個々の天体に対する補正性能は限定されるが、従来の AO よりも格段に広い天域で観測が可能になる。

一方 MOAO は、視野全体を補正するのではなく、ターゲット領域内の複数の天体に対し AO による補正をかける方法である。

ngAOwg では、すばる望遠鏡でこれらの AO を実装した場合に実現が期待される性能を、数値シミュレーションを用いて評価した (Chapter 3)。

1.2.1 地表層補償光学系 (GLAO)

可変副鏡を用いた GLAO のシミュレーションについて Section 3.1 にて記述している。主な検討結果は以下の通りである:

- 典型的なシーイング条件下 (K -band で FWHM $\sim 0.4''$) では、GLAO によって K -band で FWHM $0.2''$ が達成される
- 点源に対する Ensquared Energy は 1.5–2 倍程度のゲインがある
- 視野直径 $20'$ にわたって、ほぼ一様な補正性能が達成される。視野は望遠鏡および観測装置の機械的・光学的制約から決められることになる
- Tip-Tilt ガイド星の明るさ 18 等 (現行の AO188 の限界等級) まで大きな性能の劣化はない。すなわち、Sky Coverage は現行の AO188/LGS と同程度と期待される

マウナケアではシーイングに占める地表層の割合が高いと考えられていることもあり、シミュレーションではすばる望遠鏡での GLAO は優れた性能を発揮できると期待されることが分かった。また、可変副鏡による明るい天体のオンソース補正は、AO188 と比べても高い補正性能が期待されることも明らかになった。

1.2.2 多天体補償光学系 (MOAO)

MOAO のシミュレーションについて Section 3.2 にて記述している。主な検討結果は以下の通りである:

- 6 個のレーザーガイド星を用いる場合、半径 $3'$ 程度のターゲット領域の中で天体を選択すれば GLAO よりも高い補償性能が発揮できる
- 高い性能を達成するためには Tip-Tilt 補正のための自然ガイド星も十分小さい間隔で存在する必要があるため、Sky Coverage は小さい可能性がある

このように、GLAO と MOAO について、すばる望遠鏡に搭載した場合に現実的な条件で期待される性能が明らかになった。MOAO は、複数の天体に対して高い補償性能を実現できる技術であるが、8m 級望遠鏡では十分な性能を発揮できるターゲット領域が限定されることが分かった。MOAO は 30m 級望遠鏡で実現できれば非常に強力な機能である。一方 GLAO は、ELT では容易に実現できない非常に広い視野での良いシーイング条件での観測を可能にするものであり、ELT との相補性という観点でも高い価値をもつと考えられる。よって ngAOwg としては、可変副鏡を用いた GLAO がすばる望遠鏡次世代広視野 AO の最有力候補であると考えている。

すばる望遠鏡の次世代 AO システムとしては、地表層補償光学系 (GLAO) が最も強力な候補である。典型的なシーイング条件で、FWHM $\sim 0.2''$ @ K -band が 10 分角以上の広い視野で達成される。

1.3 近赤外線新装置

GLAO では視野直径 20' まで一様な補正性能が得られる見通しである。現在すばる望遠鏡で活躍する近赤外線撮像・多天体分光装置である MOIRCS の視野は $4' \times 7'$ であり、GLAO の能力を活かしきるためには、新たな広視野観測装置の開発が欠かせない。しかし、近赤外線観測装置は特殊な光学素子、冷却の必要、検出器の価格などのため、可視光装置より格段に広視野化が困難である。ngAOwg では、すばる望遠鏡カセグレン焦点に搭載する近赤外線装置としてどの程度まで広視野化が可能かを探るため、まず光学系の検討を行った (Section 5.2)。その結果、既存の副鏡と同じパラメータを使用した場合で直径約 13'、望遠鏡の光学系パラメータを変更し更なる広視野化を図った場合には直径約 16' まで高い結像性能を持った光学系が可能であることが分かった。8m 級望遠鏡にこのような広い視野をもつ近赤外線装置はほかには存在しないうえ、GLAO による像質の改善が達成できれば、非常に強力な装置となるであろう。

さらに、サイエンス検討からは、面分光機能の重要性が指摘されている。ひろがった天体の内部構造を分解して分光する面分光機能は、特に銀河進化研究において重要な観測手法になっている。現在他の望遠鏡の装置 (VLT/SINFONI, Keck/OSIRIS, Gemini/NIFS) で行われている AO と組み合わせた面分光観測に比べると、GLAO による像質改善で達成される空間分解能は落ちるが、広い視野の中の多数の天体に対して面分光観測を行う機能が実現できれば、類をみない極めてユニークな観測装置となる。

なお、GLAO は $0.6\mu\text{m}$ より長い可視域でも補正性能をもつため、可視域で GLAO を活かした装置も検討に値する。また、従来の AO よりも光学系点数が減少することで背景光が抑制できると期待されるので、 $> 2\mu\text{m}$ の熱的赤外線の観測にも有効である。

視野直径 13'–16' を実現する光学系設計が得られた。GLAO+広視野近赤外線装置により、従来の観測を超えた高い品質の広視野データがもたらされる。特に、多天体面分光+GLAO の装置は世界で類をみない特徴的な装置案である。

1.4 広視野 AO+新装置によるサイエンス

1.4.1 銀河形成・進化研究: 近赤外線大規模サーベイで明らかにする銀河史の全貌

すばる望遠鏡をはじめとする 8–10m 級望遠鏡や 4m 級サーベイ望遠鏡、HST を始めとする宇宙望遠鏡などの活躍によって、宇宙が現在の 1/10 の年齢にも満たない時代から現在に至るまでの銀河の観測が進められ、宇宙における大局的な銀河形成の歴史が明らかになってきた。宇宙年齢約 20–50 億年 ($z \sim 1-3$) の時代に宇宙全体としての、あるいは個々の銀河の平均的な星形成量はピークに達し (銀河の「激進化」時代)、その後ゆるやかに星形成活動は減退してきた。この間に個々の銀河の恒星質量は増え続け、同時に楕円銀河、渦巻き銀河といった現在の宇宙にみられる銀河の形態が発現してきた。また、同時に銀河中心部の超巨大ブラックホールも、より大きいスケールでの星形成活動と密接にリンクした進化を経てきたことが明らかになりつつある。しかし、このような大局的な銀河形成の歴史の背後で何が星形成活動を支配し、銀河の形態を決定していくのか、その物理過程については未解明の部分が極めて多い。これは、技術的な制約としては、遠方銀河は「点」として観測できるとどまり、その内部でどのような物理が働いているかを直接観測することができなかったことに大きな問題があった。近年の補償光学と面分光装置技術の発達によって、遠方銀河における内部構造を分解した観測が可能になりつつある。

撮像観測では、銀河の形態の情報 (サイズ、輝度プロファイルのパラメータ、非対称性、色分布など) を知ることができる。GLAO による撮像観測のシミュレーション (Sec. 3.3) では、特に銀河の有効半径の測定について、従来の観測よりも暗い中小質量の銀河まで測定が可能になることが分かった。質量の異なる多数の銀河について、様々な時代の銀河を調べることで、星質量の蓄積と銀河サイズ、形態の進化のパスを描き出すことが期待できる。また、宇宙望遠鏡とは異なり、必要に応じた狭帯域フィルタを追加して観測できることも大きな強みである。対象の赤方偏移した輝線にあわせた狭帯域フィルタによって多数の銀河の星形成活動をマッピングする観測が期待できる。

分光観測では、星形成量、ダスト量、金属量、ガスの運動状態、銀河間空間へのアウトフローの様子など、極めて豊富な情報を得ることができる。特に、面分光観測を行うと、空間 2 次元+波長方向の 3 次元データを効率良く取得できる。既に 8–10m 級望遠鏡で $z \lesssim 3$ の銀河の面分光による観測が進められているが、これまでの観測は活発な星形成を行っている明るい銀河に集中してきた。また従来の装置では面分光観測は一度に 1 つの天体に対してしか行うことができなかつたため、サンプル数は限定されており、統計的な議論を行うに至っていない。大幅にサンプル数を増やすことは、望遠鏡時間のコストからみて今後も容易ではないと考えられる。そこで、上述したような GLAO と組み合わせた超広視野近赤外線装置で、多数の天体に対して一度に面

分光観測を行うことが可能になれば、世界に類を見ない強力な観測機能を持つことになる。新装置の視野あたり数十から百個程度の対象銀河が存在するので、multiplicity を上げればあげるほど効率的な観測が可能である。また、銀河の進化はその存在する環境に大きく依存することが知られているが、銀河団/原始銀河団をその周縁部まで含めて観測することで、環境効果が個々の銀河の進化にどのように影響を与えるかを系統的に調査することが可能になる。これは広い視野をもつ GLAO+新装置の強みを非常によく活かす観測となるだろう。 $z \sim 1-3$ の銀河の大規模な(面)分光サーベイプログラムを実施することで、はじめて「激進化」時代の銀河の解剖学は、統計的な議論が可能なレベルにまで到達できると期待される。

2020 年代初頭にこれを実現すれば、すばる望遠鏡が達成するレガシーサイエンスとして、世界に唯一の非常に強力な成果となりうるであろう。

1.4.2 狭帯域撮像

狭帯域フィルタによる撮像によって、特定の赤方偏移の輝線を探索することができる。地球大気の OH 夜光との重なりが少ない波長域を狙えば、特に深い観測が可能になる。Section 2.2 では、狭帯域フィルタ撮像観測で、 $z > 7$ の Lyman α 輝線銀河を探索する場合に期待される検出数を議論している。従来のすばる望遠鏡の主焦点カメラを使った探索は、遠方宇宙の銀河の発見において世界をリードしてきたが、既に可視光装置での探索の限界に達している。今後さらに遠方の銀河を見つけ、宇宙再電離過程の探究を進めるためには、広視野近赤外線カメラでの探索が必要である。このほか、H α 輝線銀河の系統的探索など、狭帯域フィルタ撮像には様々なアプリケーションが考えられる。対象の赤方偏移に応じて新たなフィルタを製作、装着できるのも地上望遠鏡ならではの利点であると言える。

1.4.3 広視野近赤外線装置+GLAO による銀河系中心方向の観測

広視野近赤外線装置+GLAO で格段の進展が期待されるサイエンスケースの一つとして、銀河系中心方向のサイエンスが挙げられる。本検討報告書では、銀河考古学の観点 (Sec. 2.8)、およびアストロメトリの観点 (Sec. 2.9) からの提案が述べられている。

銀河系中心方向の球状星団はハローのそれとは異なる性質をもつ可能性があり、かつ矮小銀河の合体を経たバルジ形成に関する情報を得られる貴重なプローブである。銀河系中心方向は星間吸収が大きく近赤外線観測が必須で、近年探索が進みつつあるものの、金属量、年齢、内部構造など、銀河系中心方向の球状星団の性質の包括的な探究には至っていない。GLAO でアシストされた広視野・好条件の撮像観測によって個々の球状星団の金属量、年齢等を明らかにし、かつ分光観測によってその空間分布を明らかにすることで、バルジの動力学、ひいては暗黒物質分布にも強力な知見をもたらすことが期待できる。

Nuclear Star Cluster は銀河系中心の超巨大ブラックホールと銀河系バルジとの共進化を探る上での鍵となりうる天体である。また、銀河系中心近傍に存在する若い星の起源の候補である星団の残骸の探索や、Hyper-velocity stars と呼ばれる 1,000 km/s に近い速度で飛び回る星の起源を明らかにすることで、超巨大ブラックホールの存在を明らかにする研究などには広視野 AO でのアストロメトリが適している。従来 VLT や Keck で銀河系中心のアストロメトリの精力的な研究が行われてきたが、超巨大ブラックホール近傍の非常に狭い領域に限られている。上記の研究はすばる望遠鏡での独自の展開を可能にするものである。

このように、広視野近赤外線装置(撮像、多天体分光、多天体面分光)と広視野 AO による観測は、様々な天体現象の研究に新たな扉を開くと期待できる。詳しくは Chapter 2 での報告を参照して頂きたい。

1.5 TMT (Thirty Meter Telescope) とのシナジー

本計画が実現し本格的な科学観測が開始されるのは 2010 年代末から 2020 年代初頭と考えられる。これは、TMT 等の超大型地上望遠鏡 (ELT) がファーストライトを迎えると期待される時期である。ELT はその口径による集光力と空間解像力 (AO によりシーイング限界を超えた空間解像力を得ると期待される) によって、8-10m 級望遠鏡をはるかに超える感度を達成すると期待され、それによって従来の観測では見ることができなかった微弱な天体からの信号をとらえ、天体の内部構造を詳らかにすることが可能になる。ELT によるこのような観測は、8-10m 級望遠鏡などによって得られてきた人類の宇宙に対する知見をさらに深めるために不可欠である。一方で、装置と AO への制約から、ELT では広い視野を確保することが容易ではない。8-10m 級望遠鏡は、ELT が稼働する時代にあつては、ELT にできない観測を行い相補的な効果を挙げることが大切であり、すばる望遠鏡の可視域の新装置(計画)である HSC、PFS といった広視野のカメラ、分光器は、この観点から高い意義をもつと言える。赤外線観測においても、TMT と相補的な役割を果たし得る広視野の観測装置を整備

1.6. 開発計画

することは、すばる望遠鏡が2020年代以降も高い価値を有する科学上の発見を続け、かつTMTによるさらに詳細な観測に供給する天体サンプルを形成する上でも、是非とも必要なものである。

TMT時代におけるすばる望遠鏡の役割として、広視野装置によるサーベイ観測は大きな柱である。近赤外線領域での広視野装置の整備は、TMTとの連携・相補性という観点からも高い意義があり、すばる望遠鏡が2020年代以降も活躍する上で是非必要である。

1.6 開発計画

開発計画については Chapter 6 にて記述している。

1.6.1 推進体制と経費

これまで本計画の検討を進めてきたすばる望遠鏡次世代 AO 検討ワーキンググループ (ngAOwg) を核として、ハワイ観測所スタッフはもとより、日本国内および海外の研究者、組織と協同して推進する考えである。

観測装置は大型化、複雑化しており、開発にかかる予算、期間も増大している。TMT の建設期に同時に進めることになることを考えると、人的資源の確保にも困難が予想される。本計画の推進にあたっては、日本国内の光赤外天文学コミュニティにおいて、TMT 時代におけるすばる望遠鏡のあり方についてのコンセンサスを形成し、すばる望遠鏡が2020年代以降に果たす役割、そのために必要な開発を明確に定義して、その中に位置づけることが大切である。

本計画を進めるためには、国内、国外の機関との共同は必須であると考えられる。従来すばる望遠鏡は多くの観測装置を擁して多様な科学的要請に応え優れた成果を挙げてきたが、今後はコストの削減のために装置の数を絞り込み効率的な運用を目指すことは避けられないであろう。一方すばる望遠鏡と同じマウナケアにある Gemini 望遠鏡では、GLAO の検討を我々よりも数年先行して進めてきており、既に協力について話し合いを始めている。開発予算については、競争的資金、具体的には科研費を核として、国際的な協同体制を確立して確保するべきであると考えている。

1.6.2 スケジュール

TMT の本格的な運用に先立って観測を開始し、TMT での個々の天体のより詳細な観測へとつないでいくことが重要である。そのため、2020 年にはサイエンス運用を開始したい。これは、推進体制を確立することで実現可能なタイムスケールである。