

すばる望遠鏡とTMTが結ぶ
新たな宇宙像

Subaru / TMT Science Book 2020



Subaru



TMT

CONTENTS



第1章 背景と概要

- 06 **1.1** 本書の趣旨と科学目標のハイライト
- 06 生命を育む第二の地球の探査
- 07 銀河形成史のゆりかごから墓場まで
- 09 マルチメッセンジャー天文学におけるすばる望遠鏡とTMTの連携
- 09 宇宙膨張と構造形成から探るダークマターとダークエネルギーの正体
- 10 **1.2** 2020-2030年代のすばる望遠鏡とTMTを連携した戦略

第2章 すばる望遠鏡とTMTの将来計画

- 12 **2.1** すばる望遠鏡-「すばる2」計画
- 12 **2.1.1** すばる望遠鏡の既存装置と運用の現状
- 13 **2.1.2** TMT時代のすばる望遠鏡を支える広視野観測装置
- 18 **2.1.3** すばる望遠鏡の多彩な観測機能と将来計画
- 19 **2.2** TMT計画
- 19 **2.2.1** Thirty Meter Telescope(TMT)の概要
- 19 **2.2.2** TMTの観測装置
- 21 **2.2.3** すばる望遠鏡やジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡との感度比較
- 21 **2.2.4** 他の超大型望遠鏡計画

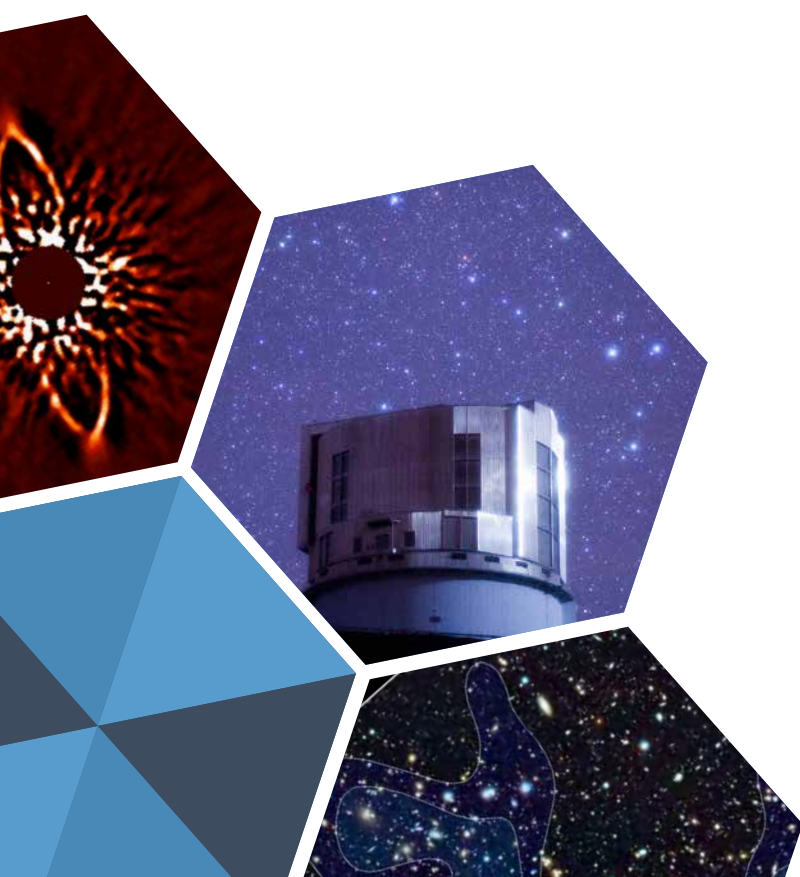
第3章 すばる望遠鏡とTMTの連携で取り組むサイエンス

- 24 **3.1** 惑星系の理解と生命探査
- 24 **3.1.1** 太陽系外惑星における生命探査
- 32 **3.1.2** 太陽系で探る惑星系形成とハビタビリティ
- 39 **3.1.3** 惑星誕生現場で探る惑星系・太陽系の起源
- 44 **3.1.4** 星の誕生
- 51 **3.2** 銀河進化のゆりかごから墓場まで
- 51 **3.2.1** 初代星、初代銀河、宇宙再電離

55	3.2.2	超巨大ブラックホールと銀河の共進化
58	3.2.3	銀河形成とバリオン物質の循環
61	3.2.4	銀河の形態の起源と活動性の終焉
64	3.2.5	銀河系と近傍銀河
69	3.3	宇宙のダーク成分と物質の起源
70	3.3.1	ダークマター
73	3.3.2	ダークエネルギー
76	3.3.3	物質の起源とマルチメッセンジャー天文学

第4章 すばる望遠鏡とTMTの科学戦略

82	4.1	今後の科学戦略
82	4.1.1.	2020年代～すばる望遠鏡による探査プロジェクトの推進
84	4.1.2.	2030年代初頭～すばる望遠鏡の成果を踏まえて推進するTMT初期観測
85	4.1.3.	2030年代～TMTの本格運用とすばる望遠鏡との連携
85	4.2	すばる望遠鏡とTMTの運用
85	4.2.1.	すばる望遠鏡の運用ビジョン
87	4.2.2.	TMTの運用ビジョン
87	4.2.3.	TMTにつながるすばる望遠鏡での装置開発
89	4.3	すばる望遠鏡とTMTの連携:今後の展望と課題
90		著者一覧



装置・プロジェクト略語集

略称	日本語名称	英語名称	望遠鏡/ プロジェクト/機関名
ALMA	アルマ望遠鏡	Atacama Large Millimeter/sub-millimeter Array	ALMA
AO 188	—	Subaru 188-elements Adaptive Optics system	すばる望遠鏡
APOGEE	—	Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment	SDSS
CERN	欧州原子核研究機構	European Council for Nuclear Research (in French <i>Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire</i>)	CERN
CHARIS	高角分解能コロナグラフ撮像分光装置	Coronagraphic High Angular Resolution Imaging Spectrograph	すばる望遠鏡
COMICS	冷却中間赤外線分光撮像装置	Cooled Mid-infrared Camera and Spectrometer	すばる望遠鏡
Curiosity	キュリオシティ	Curiosity (Mars Curiosity Rover)	Curiosity
DART	ダート探査機	Double Asteroid Redirection Test	DART
Deep Impact	ディープ・インパクト	Deep Impact	Deep Impact
DESI	—	The Dark Energy Spectroscopic Survey	DESI
eROSITA	—	extended ROentgen Survey with an Imaging Telescope Array	eROSITA
Euclid	ユークリッド衛星	Euclid	Euclid
Extreme AO	極限補償光学	Extreme Adaptive Optics (System)	—
Fermi	フェルミ衛星	Fermi Gamma-ray Space Telescope	Fermi
Hayabusa 2	はやぶさ2	Hayabusa2 (Asteroid Explorer Hayabusa2)	Hayabusa 2
HDC	高分散分光コロナグラフ	High-Dispersion Coronagraphy	—
HDS	高分散分光器	High Dispersion Spectrograph	すばる望遠鏡
Hera	ヘラ探査機	Hera	Hera
HiCIAO	近赤外線高コントラスト撮像カメラ	High Contrast Instrument for the Subaru Next Generation Adaptive Optics	すばる望遠鏡
HROS	可視光高分散分光装置	High-Resolution Optical Spectrometer	TMT
HSC	超広視野主焦点カメラ	Hyper Suprime-Cam	すばる望遠鏡
HST	ハッブル宇宙望遠鏡	Hubble Space Telescope	HST
IceCube	アイスキューブ・ニュートリノ観測所	IceCube	IceCube
IRD	近赤外線ドップラー装置	Infrared Doppler	すばる望遠鏡
IRIS	近赤外線撮像分光装置	InfraRed Imaging Spectrograph	TMT
IRMOS	近赤外多天体面分光装置	near-InfraRed Multi-Object Spectrograph	TMT
IRSF	南アフリカ赤外線天体観測所	InfraRed Survey Facility	IRSF
JUICE	木星圏探査 JUICE	JUperiter ICy moons Explorer	JUICE
JWST	ジェームズウェッブ宇宙望遠鏡	James Webb Space Telescope	JWST
KAGRA	KAGRA 大型低温重力波望遠鏡	Kamioka Gravitational wave detector, Large-scale Cryogenic Gravitational wave Telescope	KAGRA
Kepler	ケプラー宇宙望遠鏡	Kepler satellite	Kepler
LCROSS	無人月探査機エルクロス	Lunar CRater Observation and Sensing Satellite	LCROSS
LHC	大型ハドロン衝突型加速器	Large Hadron Collider	CERN
LIGO	レーザー干渉計重力波観測所	Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory	LIGO
LiteBIRD	全天宇宙背景放射観測衛星	Lite (Light) satellite for the studies of B-mode polarization and Inflation from cosmic background Radiation Detection	LiteBIRD
LSST	大型シノプティック・サーベイ望遠鏡	Large Synoptic Survey Telescope	LSST
MACHO	—	MAssive Compact Halo Object (Project)	MACHO
MEC	超電導共振器惑星観測カメラ	MKID Exoplanet Camera	すばる望遠鏡
MICHI	中間赤外線撮像分光装置	MIR Camera, High-dispersion spectrometer, and IFU	TMT
MIMIZUKU	中間赤外観測装置	Mid-Infrared Multi-mode Imager for gaZing at the UnKnown Universe	TAO
MMX	火星探査機 MMX	Martian Moons eXploration	MMX
MOA	—	Microlensing Observations in Astrophysics	MOA
MODHIS	多天体回折限界近赤外高分散分光器	Multi-Object Diffraction-limited High-resolution Infrared Spectrograph	TMT
New Horizons	ニューホライズンズ探査機	New Horizons	New Horizons
NIRCam	近赤外線カメラ	The Near Infrared Camera	JWST
NIRES	近赤外線高分散分光器	Near-IR AO-fed Echelle Spectrometer	TMT
OGLE	—	Optical Gravitational Lensing Experiment	OGLE
Pan-STARRS	パン・スターズ	Panoramic Survey Telescope And Rapid Response System	Pan-STARRS
PFS	超広視野多天体分光器	Prime Focus Spectrograph	すばる望遠鏡
PLATO	惑星トランジット星震観測衛星	PLAnetary Transits and Oscillations of stars	PLATO
PSI	惑星系撮像装置	Planetary System Instrument	TMT
REACH	高分散コロナグラフ惑星大気詳細観測装置	Rigorous Exoplanetary Atmosphere Characterization with High dispersion coronagraphy	すばる望遠鏡
SCEXAO	超高コントラスト補償光学システム	Subaru Coronagraphic Extreme Adaptive Optics	すばる望遠鏡

略称	日本語名称	英語名称	望遠鏡/ プロジェクト/機関名
SDSS	スローンデジタルスカイサーベイ	Sloan Digital Sky Survey	SDSS
Small JASMINE	赤外線位置天文観測衛星 小型ジャスミン	Japan Astrometry Satellite Mission for INfrared Exploration	小型 JASMINE
SPECULOOS	低温度星ハビタブル惑星トランジット探査	Search for habitable Planets EClipsing ULtra-cOOl Stars	SPECULOOS
SPHEREx	—	Spectro-Photometer for the History of the universe, Epoch of Reionization and ices Explorer	SPHEREx
SPICA	次世代赤外線天文衛星	SPace Infrared telescope for Cosmology and Astrophysics	SPICA
Spitzer	スピッツァー宇宙望遠鏡	Spitzer	Spitzer
SSP	すばる戦略枠プログラム	Subaru Strategic Program	すばる望遠鏡
TAO	TAO 望遠鏡	Tokyo Atacama Observatory	TAO
TESS	トランジット惑星サーベイ衛星	Transiting Exoplanet Survey Satellite	TESS
TIR	中間赤外カメラ	Thermal-Infrared Imager	Hayabusa 2
ULTIMATE	広視野高解像赤外線観測装置	Ultra-wide Laser Tomographic Imager and MOS with AO for Transcendent Exploration	すばる望遠鏡
VIRGO	VIRGO 干渉計	VIRGO	VIRGO
WFI	広視野赤外線カメラ	Wide-Field Imager	TMT
WFIRST	広視野赤外線サーベイ望遠鏡	Wide Field InfRared Survey Telescope	WFIRST
WFOS	可視広視野多天体分光装置	Wide-Field Optical Spectrometer	TMT

用語集

用語	説明
アグリゲイト	0.001mm (=1μm) 程度の大きさの固体の微粒子であるダストの凝集体のこと。
Ia型超新星	超新星の一種で、水素のスペクトル線が現れないI型の中でもケイ素のスペクトル線が見られるもの。
インフレーションモデル	宇宙初期に加速的な膨張期（インフレーション膨張）があったとする理論のこと。
宇宙線	宇宙空間に存在する高エネルギーの放射線や、それらが宇宙空間を伝搬する過程や地球大気に入射した際に作る放射線のこと。
宇宙背景放射	宇宙のあらゆる方角からやってくる放射のこと。ビッグバン起源の放射である宇宙マイクロ波背景放射（CMB）のほか、別の起源による背景放射がさまざまな波長域で検出されている。
S/N比	Signal/Noise比。観測しようとしている信号が、雑音に対してどの程度の振幅ないしパワーを持っているかを示す指標のこと。
[SiII]	1階電離硫黄の禁制遷移線。
[OIII]	2階電離酸素の禁制遷移線。
[OII]	1階電離酸素の禁制遷移線。
可視光	波長 0.4-0.8 μm 程度の電磁波の名称。天文学ではCCDで検出できる約1μmまで含むこともある。
褐色矮星	質量が小さく中心部で水素の核融合が起こらない天体のこと。 質量は太陽の8%以下で、重水素の核融合が起こる木星質量の13倍以上の天体を褐色矮星と分類することがある。
ガンマ線バースト	秒程度から数時間にわたってガンマ線が突発的に放射される現象のこと。
極限補償光学	光が大気を通過してくることによって生じる望遠鏡口径内の波面の乱れを極限まで補償する装置のこと。
局所銀河群	天の川銀河（銀河系）の属する銀河群のこと。
巨大ガス惑星	木星型惑星のうち、水素とヘリウムを主成分とするもの。太陽系の惑星では、木星と土星がこれにあたる。
近赤外線	赤外線の中で最も短い波長（1-3 μm 程度）の電磁波の名称。
金属量	恒星や星間物質の元素組成のうち、金属が占める割合のこと。重元素量ともいう。ただし、天文学ではヘリウムよりも重い元素全てを指すことが多い。
クエーサー	最も明るい部類の活動銀河核（AGN）のこと。
原始ブラックホール	宇宙初期に生成されるブラックホールのこと。
光度曲線	変光星、新星、超新星、小惑星など光度が変化する天体の光度を時間の関数として表した図のこと。
固有運動	天球上での恒星の見かけの動きのこと。
キロノバ	新星の約1,000倍の明るさに達する爆発現象のこと。中性子星の連星もしくは中性子星とブラックホールの連星が合体することによって発生する爆発が想定されている。
サブミリ波	電波の中で最も短い波長（0.1-1 mm程度）の電磁波の名称。
視線速度	天体の空間運動速度の視線方向成分のこと。ドップラー効果によるスペクトル線のずれから測定できる。
質量降着率	単位時間当たりに降着するガスの量のこと。
重力波	一般相対性理論などの相対論的な重力理論一般に予言される重力場の波動的振動のこと。
重力マイクロレンズ	偏向角がわずかで画像としては変化が観測できないが増光によってその存在が観測可能な重力レンズのこと。
重力レンズ	遠くの天体から出た光が、途中にある銀河や銀河団の重力場によって曲げられる現象のこと。光源が何倍にも増光されたり、細長くゆがんだ像や多重像として観測される場合は、強い重力レンズ効果と呼ばれ、増光やゆがみの程度が小さい場合は弱い重力レンズ効果と呼ばれる。
主系列星	HR図上で主系列に属し、中心部で水素の核融合を起こしている段階の恒星のこと。矮星ともいう。
初期質量関数	星が生まれるとき、どのような質量の星がどのような頻度で生まれるかを表す関数のこと。
種族III	初代星ともいう。宇宙の進化の中で生まれた第一世代の星のこと。
シリケート	ケイ酸塩。

新星	星が突然明るくなり、数か月から数年かけてゆっくり暗くなっていく現象のこと。
赤外線	波長が1 μm から400 μm 程度の範囲にある電磁波の名称。
赤方偏移	一般に天体の発する光の波長が伸びて観測されることを、赤い側にずれるという意味で赤方偏移という。
ダークエネルギー	現在の宇宙の平均エネルギー密度の約4分の3を占めていると考えられる正体不明の成分。 暗黒エネルギーとも呼ぶ。
ダークマター	ダークエネルギー以外の宇宙の成分の8割以上（すなわち宇宙の5分の1以上）を占める成分のこと。暗黒物質ともいう。
大質量星	太陽質量の8倍以上の星。
炭素質ダスト	星間空間に存在している炭素系の固体微粒子（ダスト）のこと。
地球型惑星	ケイ酸塩鉱物が主体の岩石と鉄を主成分とする金属から構成される惑星を指す。
中間赤外線	赤外線の中で中間波長（3-40 μm）の電磁波の名称。
中質量星	太陽質量の約2倍以上8倍以下の星。
中性子星	原子から構成される通常の恒星と異なり、中性子を主成分とする天体のこと。
低質量星	太陽質量の約2倍以下の星。小質量星ともいう。
II型超新星	超新星の一種で、最も明るくなる最大光度期に水素のスペクトル線が現れる。
ニュートリノ	電荷を持たないレプトンに分類される素粒子で、電子ニュートリノ、ミューニュートリノ、およびタウニュートリノの3種類（それぞれの反粒子を含めると6種類）ある。
バイオマーカー	惑星を外から観測したときに、生命が存在することの証拠と考えられる指標となるデータを指す。バイオシグナチャーともいう。
白色矮星	恒星の進化において、中小質量星が外層を失った後の段階にある星のこと。
ハッブル定数	宇宙の膨張を表すハッブル-ルメートルの法則で、銀河の後退速度 [km s ⁻¹] と距離 [メガパーセク] のあいだの比例関係を表す比例定数 のこと。
ハビタブルゾーン	地球と似た生命が存在できる惑星系の空間のこと。生命居住可能領域、生存可能圏とも呼ばれる。液体の水が天体表面に安定に存在できる条件（表面温度）から求められる。
バリオン音響振動	宇宙初期には、バリオンと光子がトムソン散乱により強く結合して一体となり、一つの流体として振る舞う。このバリオン光子流体は圧力を持つため、空間的なゆらぎがあると、それは音波振動となって空間中を伝播する。
ハロー星	渦巻銀河の円盤を包みこむように丸く分布している星の構造に属する星のこと。
バンド	測光観測と撮像観測の際の標準的な波長帯のこと。
PSF	点像分布関数のことで、ある観測システムで恒星などの点光源を観測したときに得られる像の形状のことをいう。英語名（Point Spread Function）に由来するPSFという略称が用いられることが多い。
ブラケットガンマ	水素原子で電子が主量子数 n=4 のエネルギー準位とそれよりも上の準位の間で遷移することによる一連のスペクトル線のうち、波長2.165 μmに現れる線のこと。
ブラックホール	閉じた事象の地平線に囲まれた時空の領域のこと。いったんこの領域に入るとどんなものも再び外に出ることはできない。
星形成率	単位時間あたりに新たに生まれる星の量のこと。星生成率ということもある。
星形成領域	星形成が進行中の領域のこと。星生成領域ともいう。
補償光学	大気の影響による光波面の乱れをリアルタイムで測定して、波面補正素子で矯正することにより、望遠鏡の回折限界の空間解像力を実現するシステムのこと。
MACHO	質量を持つコンパクトなハロー天体（渦巻銀河の円盤を包みこむように丸く分布している星）の英語（MAssive Compact Halo Object）の頭文字から作ったことば。
マルチメッセンジャー天文学	天体現象によって発生する電磁波、宇宙線やニュートリノなどの粒子および重力波を情報を運ぶ運び手（メッセンジャー）と見立てて、複数のメッセンジャーを用いて天体現象を総合的に解明する天文学のこと。
ミリ波	電波の中で波長が1-10 mm 程度の電磁波の名称。
面分光	星雲や銀河など広がった天体の各場所のスペクトルを一度の露出で得ることができる観測手法のこと。
雪線	H ₂ Oなどの分子が氷になる中心星からの距離のこと。
ライマンアルファ	水素原子で電子が主量子数 n=1 の基底状態のエネルギー準位とそれよりも上の準位の間で遷移することによる一連のスペクトル線のうち、波長121.6 nmに現れる線のこと。
連星中性子星	中性子星と中性子星の連星系のこと。二重中性子星連星ともいう。
矮小銀河	サイズと質量が小さな銀河の総称。

単位一覧

単位	記号	説明
太陽光度	L _☉	天体の光度を表す際によく使われる単位。1太陽光度＝3.842×10 ²⁶ Wである。
太陽質量	M _☉	天体の質量を表す際によく使われる単位。1太陽質量＝1.989×10 ³⁰ kgである。
電子ボルト	eV	エネルギーの単位。1ボルトで加速された電子1つの運動エネルギーが1電子ボルトである。
天文単位	AU	天文学で用いられる距離の単位。地球と太陽の間の平均距離にほぼ等しく、約1億5000万kmである。
等（等級）	mag	天体の明るさを測る単位。5等級大きいと明るさは1/100となる。
パーセク	pc	天文学で用いられる距離の単位。1パーセク＝1×2.0626×10 ⁵ 天文単位＝3.09×10 ¹³ km＝3.26光年である。
秒角	arcsec (as)	角度の単位。1秒角＝1"＝(1/3600)° である。
平方度	deg ²	天球面上の面積の単位。1平方度は1辺が1度の正方形の面積。天球全体は約41253平方度である。
ミリ秒角	mas	角度の単位。1ミリ秒角＝(1/1000)"＝(1/3600000)° である。

第1章

背景と概要

Chapter 1

1.1

本書の趣旨と科学目標の ハイライト

2019年、口径8.2mを誇るハワイ・マウナケア山頂のすばる望遠鏡はめでたく二十歳（はたち）を迎えた。1999年に産声を上げてから今日まで、日本の光学赤外線天文学コミュニティはすばる望遠鏡とともに歩んできたと言っても過言ではない。宇宙最初期銀河の発見や多様な原始惑星系円盤の解明をはじめとする数々の華々しい成果を継続的に挙げ、世界中の研究者に注目されるだけでなく、メディアやアウトリーチ活動を通して一般市民にも広く知れ渡っている。この成功を受けて、次の超大型望遠鏡プロジェクト（TMT：30メートル望遠鏡）が計画され、日本はこの国際共同プロジェクトの大きな一翼を担うべく推進し、建設予算が認められ、現在主鏡を初め本格的な製造段階に入っている。しかしながら、天文学における国際競争が厳しさを増しており、これからも世界の望遠鏡に伍して顕著な成果を創出し続けるためには、これまで以上に戦略的な科学運用が必須である。特に、すばる望遠鏡とTMTとの役割分担を明確にし、両方を連携させることによって初めて得られる独創的で大きなシナジー効果を追求することが、日本の光学赤外線天文学にとって極めて重要であると言えるだろう。

そのような背景のもと、すばる科学諮問委員会とTMT科学諮問委員会とが主導し、国立天文台TMTプロジェクトおよびハワイ観測所が事務局となって、この度「すばる+TMT」サイエンスブックを作成することになった。具体的には、すばる望遠鏡は広視野に重点をおいた望遠鏡とする戦略を進めているが、2020年代以降のすばる望遠鏡の科学戦略を明確化し、科学運用及び装置開発の計画策定の基礎資料とすること、国際計画との連携を含めたすばる独自の科学的戦略、およびすばる望遠鏡からTMTに

つなげるための具体的な装置開発・観測計画を策定することを目標とする。またTMTと他の超大型望遠鏡との競争を意識し、初期科学運用の具体的な計画策定につながる科学目標を設定する。今後の世界的な観測的天文学全体の潮流もふまえて、その中ですばる+TMTが最も効果的な成果を挙げるための連携の重要性を強調する。

以下、本書に挙げた「すばる+TMT」が目指すサイエンスハイライトをいくつか抜き出し、まとめる。

生命を育む第二の地球の探査

我々が住む地球のような星は宇宙には他にもあるのだろうか？そしてそこに生命はあるのだろうか？この素朴でありながら人類にとっての根源的な問いに、天文学は答える必要がある。1995年の最初の発見以来、系外惑星の研究は目覚ましい発展を遂げた。現在までに、地上やスペース両面から様々な手法により、木星のような巨大ガス惑星から地球のような岩石惑星の存在まで、疑う余地がなく、豊富に存在することも知られるようになった。その中には、生命が存在可能なハビタブル惑星の可能性も示唆されている。すばる望遠鏡とTMTにより、そのような惑星における生命の存在を示す「バイオマーカー」を検出することができるようになるだろう。

すばる望遠鏡では、HiCIAOによる惑星の直接撮像探査が行われ、我々の太陽に似た恒星のまわりに存在する巨大ガス惑星が発見された。また若い恒星のまわりに、生まれて間もない惑星が存在する可能性がある、多様な原始惑星系円盤が存在することを明らかにした。近年、惑星検出の妨げとなる大気揺らぎを極限まで小さく抑える極限補償光学SCEXAOが開発され、これまで観測が難しかったより暗いガス惑星の観測が飛躍的に進展するはずである。さらに近傍M型星まわりのハビタブル惑星検出

を目指した、IRDによる、主星の視線速度変動を捉えるドップラー法での大規模なサーベイ観測が今まさに行われつつあり、今後5年間で、太陽系の近傍にいくつかのハビタブル地球型惑星を含む、多様な惑星系が発見されるだろう。

今や我々には、これまで行われてきた系外惑星探査をさらに発展させることで、すばる望遠鏡とTMTを用いて生命を宿す可能性のある多くの地球型惑星の発見と、究極の目標であるバイオマーカー探査への道筋が見えている。地球型惑星の探査では、現行のすばる望遠鏡IRD装置の感度を大幅に向上させると共に、より低質量の惑星検出を目指したNeo-IRD計画があり、ハビタブル地球型惑星の発見数は大幅に増えるだろう。そしてTMT時代には、PSIおよびMICHIによる超高コントラスト直接撮像によって、ハビタブル地球型惑星を主星から空間的に分離して検出し、分光観測を行うことで、酸素分子やオゾンといったバイオマーカーを探査することになるだろう。

その時代に向けて、すばる望遠鏡では現在、SCEXAOによってTMT時代にブレイクスルーを起こす次世代キーテクノロジーが試されている。IRDとSCEXAOを組み合わせ、超高コントラスト撮像かつ高分散分光観測を行うことによって、惑星大気中の分子を直接検出する高分散分光コロナグラフは、PSIやMODHISの先駆けとなる極めて重要な技術である。また究極の検出器である超伝導共振器カメラMKIDSは、読み出しノイズを極限まで軽減し、超高速での大気揺らぎ検出と惑星光の分光まで可能にする。これらの開発はPSIの核となるため、次世代のTMTに向けた、このような新技術開発のテストベッドとしてのすばる望遠鏡の役割・存在意義も極めて大きいと言えるだろう。

またこれらの技術開発により、すばる望遠鏡自身でも、直接撮像ではこれまで探査が難しかった、主星により近い雪線付近に存在する惑星まで迫ることや、より低温・低質量惑星の検出を可能にする。さらに、すばる望遠鏡で直接撮像された惑星に対しては、TMTの大集光力によってはじめて詳細な分光観測を行うことができるため、両者の連携が不可欠である。このようにすばる望遠鏡とTMTの観測により、系外惑星の開拓領域を様々なパラメータスペース（周期、サイズ、年齢）へ拡大し、普遍的な惑星形成論の構築が可能になる。これにより我々の太陽系が普遍的な存在なのかという問いに答えることができる。

銀河形成史のゆりかごから墓場まで

銀河とは重力で束縛された星の大集団であり、宇宙を構成する基本的な単位天体である。我々太陽系や地球も天の川銀河（銀河系）と呼ばれる銀河に棲んでいる。したがってこのような天体が宇宙史の中でどのように誕生し、

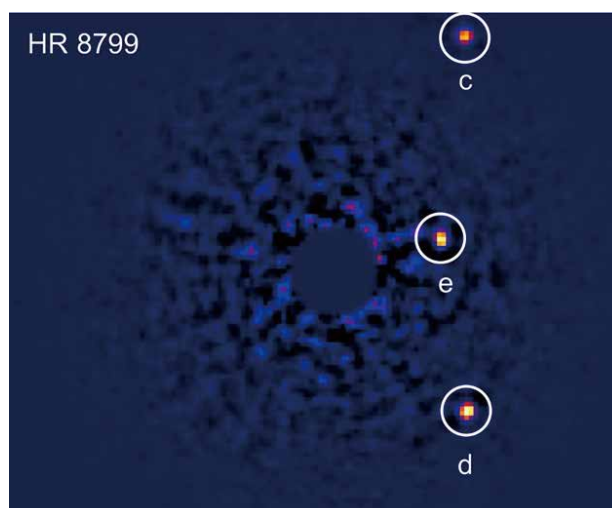


図1.1：すばる望遠鏡SCEXAOによるHR8799のまわりの惑星の赤外線画像。3つの惑星が明瞭にとらえられている。この視野の外側にもうひとつ惑星 (b) が存在することがわかっている。

Credit: NAOJ

そして進化を遂げてきたのかを知ることは、我々の起源を知ることにも繋がっており、大いに好奇心を掻き立てられる。この根源的な謎に、すばる望遠鏡とTMTは今後どのように挑むのか？すばる望遠鏡の広視野観測能力とTMTの大集光力と高い分解能を戦略的に組み合わせることにより、今後も我々は最前線で、人類の銀河形成・進化の理解に大きな貢献をし続けることができるであろう。

まず、宇宙で最初に生まれた最遠方の初代天体を探査するというのは銀河天文学の究極の目標の一つである。すばる望遠鏡はこれまで可視光の超広視野カメラを武器に、稀な超遠方天体の探査を有利に進めてきた。しかし今後は近赤外線に移り、可視光では見られないほど大きく赤方偏移した天体を探すことになる。すばる望遠鏡のULTIMATEプロジェクトは、広視野補償光学による近赤外線探査によって、Kバンド帯で広くかつ深い独創的なパラメータスペースを開拓し、明るくかつ赤方偏移が10を超える候補天体を見つけることができるであろう。これらの天体のTMTの分光観測によって、存在を確認するだけでなく、初代銀河の物理状態も知ることができるであろう。また初代の巨大ブラックホールの発見、巨大電離バブルに包まれた初代銀河群の発見など、続々と深宇宙における新たな地平が切り拓かれていくであろう。また、未到達の深い紫外スペクトルを取得し、初代銀河が銀河空間のガスを電離し、物理状態を大きく変える現象（宇宙再電離）がいつどのように進化したのかを解き明かすことも期待される。さらに、すばる望遠鏡HSC撮像およびPFS分光の連携により、日本独自の遠方クエーサーサンプルが構築されるが、これらをTMTによって分光することにより、特に巨大ブラックホールの起源を解明するうえで重要な小ブラックホールの質量を測定し、また高分解能観測により母銀河の性質やガスの運動などを調べることによって、銀河中心の巨大ブラックホールと銀河自体との「共進

化」のメカニズムに迫ることもできるであろう。

次に、形成途上にある銀河とそれを取り巻くバリオン物質の循環の解明は、面分光観測装置の出現により現在急速に進展しており、今後も大きなブレイクスルーが期待される分野である。銀河形成においては、周囲領域からのガス降着と、逆に星の超新星爆発や活動的銀河核によるガスの流出といった物質循環が、根源的な役割を果たしていると考えられている。しかし銀河周辺のガスは直接観測が難しいため、背景の銀河やクエーサーからのスペクトルに、手前にある銀河に付随した周辺ガスによってできる影（吸収線）を使う、トモグラフィーという手法が用いられる。TMTの大集光力により、より一般的な暗い背景銀河を光源として使えるため、手前の銀河ガスをより高い空間分解能で観測することができ、ガスの降着・流出の様子を詳細に調べることができる。そしてそれを母銀河の性質と関連付けることによって、銀河形成において周辺ガスの降着と流出とが果たす役割を初めて詳細に描き出すことができるであろう。

形成最盛期を経た銀河は星形成活動性を低下させ、形態も現在の銀河に見られる回転円盤成分と丸いバルジ成分が確立してくる。この過程には銀河自身の内的な要因と、周辺環境から受ける外的な要因が寄与すると考えられているが、具体的な物理プロセスは未だ謎である。その解決のためには、変遷の渦中にある銀河を詳しく調べる必要があるが、タイムスケールが短い現象なので、銀河の大規模な母サンプルが必要である。すばる望遠鏡のHSCとPFSを組み合わせた銀河探索によっては一挙に可能となる。そしてPFSとTMTによる深い分光観測を行い、吸収線スペクトル診断によって、実際にどのように星形成が止まったのか、その物理過程を解明できるであろう。も

う一つの手法が、TMTの補償光学がもたらす高空間分解能により形成途上銀河の内部構造を空間分解し、各銀河構成成分の成り立ちや星形成活動の伝搬・終焉の様子を直接「見る」ことである。アルマ干渉計によるガス成分の銀河解剖学とも合わせることによって、銀河内部の物理過程の進行の様子が手に取るようにわかる時代が訪れるであろう。

最後に、進化の成れの果てである天の川銀河や近傍銀河を星に分解して、星種族の構成と空間分布、運動を捕らえ、銀河の形成と進化の歴史を詳細に紐解く「銀河考古学」は、遠方銀河の直接観測と相補的な手法であり、これもすばる+TMTにより大きく発展する分野である。すばる望遠鏡HSCで探査された天の川銀河外縁部や局所銀河の星成分をPFSで分光し、大局的な化学組成や運動などを捕らえ、さらにTMTで深い分光を行ない様々な元素の情報を得て、宇宙における元素合成と循環の歴史を描き出す。北天にあるTMTでの観測が必要なターゲットが多いことも重要で、南天の巨大望遠鏡とは相補的である。また、ダストによる吸収が大きな銀河中心部などについては、すばる望遠鏡ULTIMATEによって近赤外線サンプルを構築し、TMTへ分光ターゲットを供給できることも独創的である。

以上のように、すばる望遠鏡で興味深い天体を見つけ、TMTで詳しく調べるという組み合わせは銀河形成学のあらゆる場面で有効な手段であり、両者の連携の重要性は極めて高い。

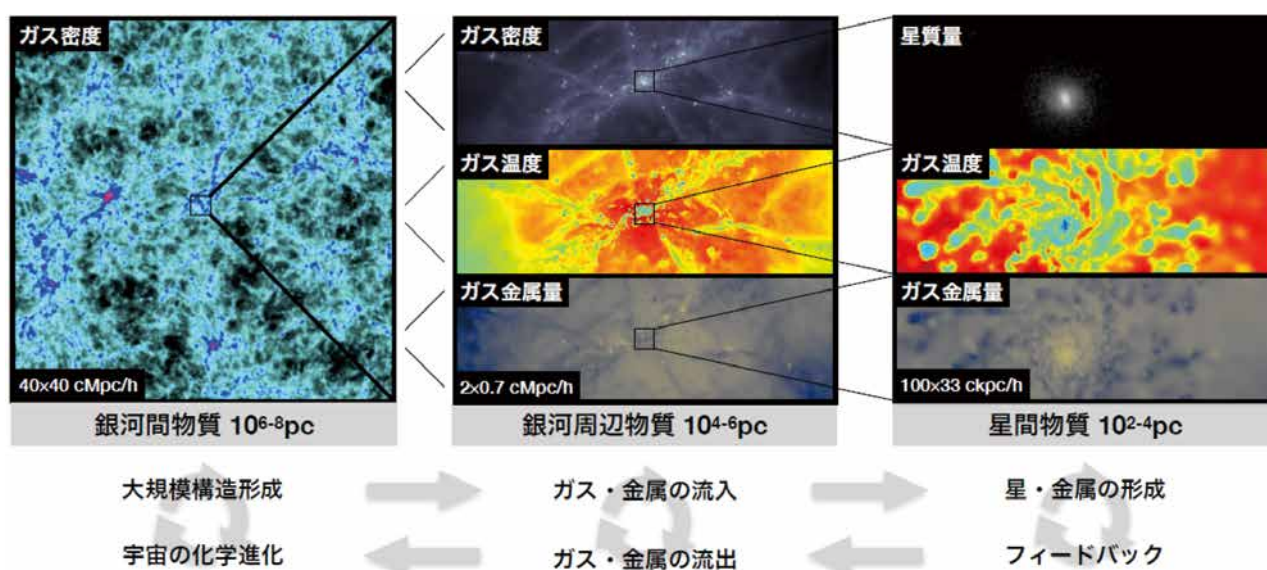


図1.2：シミュレーション計算で得られた100億年前の銀河とその周辺の物質分布の様子。大規模構造からのガスの流入や銀河からのガスの流出が銀河進化理解のミッシングリンクとなっている。すばるやTMTの多天体分光によって銀河周囲に広がる物質がはじめてとらえられ、ミッシングリンクが解明されることが期待される。

Credit: Shimizu & Nagamine in preparation

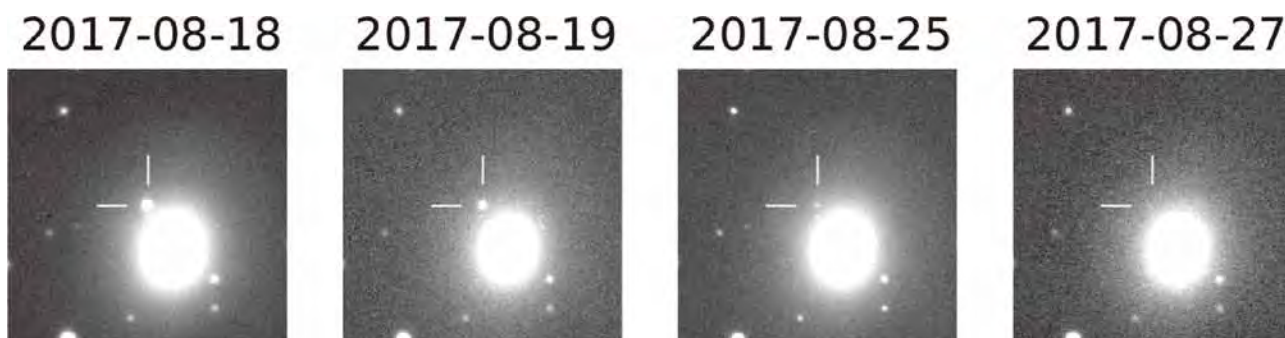


図1.3：すばる望遠鏡HSCで捉えられた重力波源である中性子星合体に伴う突発現象。左から右へ時系列を表す。
Credit: Tominaga et al. 2018, PASJ, 70, 28

マルチメッセンジャー天文学における すばる望遠鏡とTMTの連携

カミオカンデにおける超新星爆発からのニュートリノの検出で切り開かれた、電磁波にとどまらない様々な信号の検出に基づく天体物理現象の解明は、地上の大型レーザー干渉計によるブラックホールや中性子星の合体現象からの重力波の直接検出や、アイスキューブ・ニュートリノ観測所での活動銀河中心核からの高エネルギーニュートリノの検出を契機にマルチメッセンジャー天文学として確立した。重力波やニュートリノの信号を検出する能力の向上により、銀河系の近傍にとどまらず、宇宙全体を見渡してそれらの信号を引き起こす突発的な現象を捉えることができるようになった。それにより銀河系の近傍（我々の周囲）を数十年のタイムスケールで観測するだけでは起こりえない現象だが、宇宙の100億年を超える時間スケールでは頻繁に起こり、重要な役割を果たす現象が、年間に何度も捉えられるようになった。こうして重力波やニュートリノの信号源となる突発的な現象の統計的な議論が初めて可能になろうとしている。

マルチメッセンジャー天文学において、可視赤外線波長の観測は、短時間でのフォローアップ観測により、信号源となる天体の天球上での位置を特定し、天体までの距離を求め、光度などの物理情報を引き出すという重要な役割を果たす。特に銀河系の近傍を超えた深宇宙での突発的な現象からの重力波やニュートリノの信号の検出は、可視赤外線波長では信号源が暗くなることを意味し、大型望遠鏡を用いた広視野でのフォローアップ探査観測が威力を発揮する。すばる望遠鏡はすでに稼働しているHSCや次世代のULTIMATE-Subaruという世界的にもユニークな可視赤外線の広視野撮像装置によって、信号源となる天体を短時間のうちに発見し、突発的な現象がまさに起こっている状況を即座に捉えるうえで2020年代においても大きな役割を果たす。

すばる望遠鏡が捉えた突発天体の詳細なスペクトル情報を得るにはTMTが必要となる。TMTは突発的な現象に対応して数分以内に天体を捕捉する機能を持ち、可視分光器WFOSおよび赤外線分光器IRISを用いることで幅

広い波長域をカバーする分光観測が可能である。これにより、信号源となった天体を特定し、突発現象で起こる物理過程を明らかにする。さらにTMTの集光力を用いることで、突発的な現象の後で暗くなっていく天体を長期にわたって分光観測でモニターできる。宇宙の歴史の中で、希少な重元素の生成にあたっては重力波の信号源である中性子星の合体現象が重要な役割を果たしたことが示唆されている。図1.3に示す中性子星合体の後の放射をモニターすることで、初期の原子やイオンの生成から、後期に起こる分子やダストの生成に渡って、そのサインを調べ、突発的な現象の後の高い密度の環境で起こる化学過程を時間の関数として追跡することができる。マルチメッセンジャー天文学において、すばる望遠鏡とTMTによる可視赤外線観測は、宇宙空間において重元素や微粒子が生成される過程を解明し、我々の身の回りにある太陽系のもととなった物質が、どのようにして宇宙の中で生成されたのか、を理解するうえで重要な役割を果たす。

宇宙膨張と構造形成から探る ダークマターとダークエネルギーの正体

宇宙全体の枠組みを測定により明らかにする観測的宇宙論は、人工衛星によるマイクロ波宇宙背景放射の精密測定や地上望遠鏡による大規模な探査観測によって精密化が進み、予想を超える新たな謎をもたらしてきた。特にIa型超新星の光度距離の測定結果は、加速する宇宙の膨張という新たな描像をもたらし、ダークエネルギーという斥力をもたらす謎のエネルギーの存在を示唆するものとなった。標準モデルでは現在の宇宙の質量組成の約94%はダークマターとダークエネルギーによって構成されるとされ、それらの正体を明らかにすることは物理学の大きな課題となっている。ダークマターとダークエネルギーのもつ性質は、宇宙全体の膨張の歴史と、その中の密度揺らぎが成長し、銀河や銀河団といった構造が形成された歴史の中に反映されており、観測的宇宙論にはそれらの歴史をひもとくことでダークマターとダークエネルギーの持つ性質に迫ることが要求される。

可視赤外線での精密測定では、宇宙がそれぞれの時代

に実際に膨張している様子を直接捉えられると期待される。高安定性の高分散分光器とTMTの集光力を組み合わせれば、宇宙が膨張することによって天体の赤方偏移が10年というタイムスケールで変化していく様子を直接捉えられる。この手法を用いれば宇宙の膨張の歴史を各時代に直接捉えることが可能になる。また、現在の宇宙膨張の速度を与えるハッブル定数は、依然としてさまざまな手法での数値の食い違いがあり、宇宙論の標準モデルの破綻も示唆されている。すばる望遠鏡の広視野カメラHSCによる広視野撮像探査とTMTの高空間分解能および高感度分光観測を組み合わせ、重力レンズクエーサーの多重像を用いた時間遅れの測定や、重力波の光度距離と赤方偏移の比較をすることによって、ハッブル定数を精密に決めることが可能となる。

構造形成の歴史をたどる上でも、可視赤外線での観測は重要な役割を担う。すばる望遠鏡のHSCによる撮像探査は、電磁波では捉えることのできないダークマターの密度分布が引き起こす弱い重力レンズ効果を直接測定することによってダークマターの密度分布を描き出すことに成功している。撮像観測による弱い重力レンズ効果の測定では、赤方偏移方向を分離して構造形成の歴史を辿ることに限界があるが、すばる望遠鏡PFSによる大規模な分光探査によって赤方偏移方向に分解した銀河の大規模構造を明らかにすることで、ダークマターの密度分布が赤方偏移方向に進化してきた様子を捉えることができる。この2つの探査を組み合わせた構造形成の歴史の解明はすばる望遠鏡の広視野撮像と分光の能力を組み合わせたレガシーの成果となることが期待される。一方でダークマターの持つ性質に強い制限を与える、銀河よりも小さいスケールにおいてダークマター塊が作る構造に迫る上ではTMTを用いた高空間分解能による重力レンズ像の詳細観測が重要な役割を果たす。

このようにすばる望遠鏡とTMTを用いた可視赤外線での観測的宇宙論の観測は宇宙膨張の歴史とその中での構造形成の歴史を銀河よりも小さなスケールから銀河の大集団のスケールまで解き明かし、ダークマターとダークエネルギーの性質に制限をつける重要な役割を果たす。

1.2 2020-2030年代のすばる望遠鏡とTMTを連携した戦略

すばる望遠鏡とTMTの連携は、光学赤外線の宇宙観測で世界をリードする上で重要な基盤である。2020年代にはすばる望遠鏡の将来計画「すばる2」においてユニークな広視野観測の機能が実現し、PFSによる大規模分光探査やULTIMATE-Subaruによる赤外線広視野探査などの大規模な探査観測など、国際連携による広視野観測に

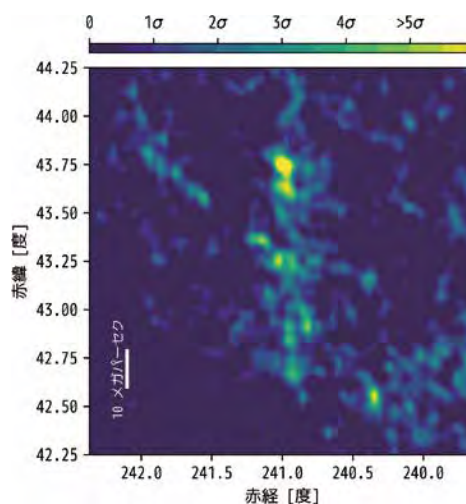


図1.4：すばる望遠鏡HSCによって描き出された100メガパーセクを超える超銀河団構造（銀河の個数密度分布）。約73億光年前の時代に対応する。今後すばる望遠鏡を用いてダークマターと銀河の大規模分布をとらえ、宇宙の大規模構造が描き出される。
林将央氏提供

よって新しい宇宙像を切り開くことが期待される。これらの探査で見つかる新たな天体は、2030年代のTMTでの科学観測の本格化とともに、高い空間分解能と高い波長分解能で観測し、その中で起こる新たな物理過程を解きあかす対象となる。TMTが本格運用する時代のすばる望遠鏡は広視野性能を生かし、マルチメッセンジャー天文学の突発天体の同定やSPICA赤外線衛星をはじめとする広領域での深宇宙多波長観測との連携において活躍する。この時代のTMTとすばる望遠鏡の連携運用では、観測に求められる複雑な要求を踏まえ、実際の観測条件の中でどれだけ効率的に必要なデータを取得するかも重要となる。例えば系外惑星の大気分光観測やマルチメッセンジャー天文学の光学赤外線追求観測においては、惑星の公転運動に合わせ時間を指定した長期のモニター観測や突発現象の即時の追求観測が求められ、すばる望遠鏡とTMTの特徴と機能を生かし機動的に連携させた観測運用も新たな成果を得る鍵となる。

すばる望遠鏡は、最先端の観測技術の科学実証の場としても重要である。現在進められているすばる望遠鏡での高安定の高分散分光、極限補償光学、地表層補償光学等の科学実証は、TMTの装置実現に向けた先駆けとなる。TMTの科学観測が本格化する時代にあっても、すばる望遠鏡でのプロトタイプング、科学実証はTMTの第二期以降の観測装置を実現する上で非常に有効に機能するであろう。また、すばる望遠鏡の広視野大規模探査やTMTのキーサイエンス大規模観測で得られるデータはさまざまな研究に活用することができる情報の山である。連携したデータ公開により、天文学の様々な分野でのデータの活用だけでなく、情報処理や人工知能に関わる新たな技術開発の現場となることも期待される。

本書が執筆された時点では、アメリカ合衆国・マウナ

ケアにおけるTMTの現地建設作業は反対運動の影響を受け停止している状況であり、今後の状況によっては代替建設地として検討が進められてきたスペイン・ラパルマへの移行も起こりうる。地上大型望遠鏡による天文学にとって、高い晴天率、弱い大気揺らぎ、低い水蒸気量等によりマウナケアは理想的な観測条件のサイトであるが、ラパルマは北半球においてそれに次ぐサイトであると評価されている。本書で提案する研究計画はマウナケアでのTMTの建設を想定して検討されているが、ラパルマでの建設となった場合でも多くは観測条件に応じて実行することで同等に追求が可能である。また、すばる望遠鏡との科学的な連携の重要性も変わるものではない。

第2章

Chapter 2

すばる望遠鏡と TMTの将来計画

2.1 すばる望遠鏡-「すばる2」計画

2.1.1

すばる望遠鏡の既存装置と運用の現状

すばる望遠鏡は、世界有数の天文観測サイトとして知られるハワイ島マウナケア山頂で国立天文台が運用する有効口径8.2mの大型光学赤外線望遠鏡である。1999年のファーストライト以来、数々の科学的成果を挙げてきた。2019年現在、すばる望遠鏡では7つの基幹装置（HSC、FOCAS、HDS、MOIRCS、IRCS、COMICS、AO188）と4つの持ち込み装置（IRD、SCEXAO、CHARIS、VAMPIRES）が科学観測のための装置として運用されている。

HSC (Hyper Suprime-Cam) は視野1.75平方度を持つ可視光カメラで、現在300夜規模の戦略枠プログラムも走るすばる望遠鏡の科学成果創出の急先鋒である。FOCAS (Faint Object Camera And Spectrograph) は視野6分角の可視光撮像分光装置で、多天体分光や偏光の機能を備える。HDS (High Dispersion Spectrograph) は最大波長分解能 $\sim 160,000$ を実現する可視光の高分散分光器である。MOIRCS (Multi-Object Infrared Camera and Spectrograph) は視野4分角 $\times$ 7分角の近赤外線撮像分光装置で、近赤外線域(0.9 $\sim$ 2.5 μm)でのブロードバンド・ナローバンドの撮像機能に加え、多天体分光の機能も持つ。IRCS (Infrared Camera and Spectrograph) は188素子の補償光学(AO188)と併用される撮像分光装置で、波長0.9 $\sim$ 5.6 μm をカバーし、撮像およびグリズムによる低分散分光の機能に加え、エシエルを用いる高分散分光の機能も有する。そしてCOMICS (Cooled Mid-Infrared Camera and Spectrograph) はさらに長い波長域である中

間赤外線(7.5 $\sim$ 26 μm)の撮像分光装置である。すばる望遠鏡の既存装置がカバーする波長と波長分解能を図2.1.1にまとめる。この図からも分かるように、すばる望遠鏡では我が国の研究者コミュニティの幅広いサイエンスのニーズに応えるため、多彩な機能をもつ装置群を運用してきたが、TMT時代に向けて「すばる2」計画では、TMTに我が国独自のターゲットを提供してその科学的価値を最大化するべく、すばる望遠鏡の特徴である「広い視野」を生かしたサーベイ観測に重点を置く運用を行なっていく。

すばる望遠鏡の観測時間は、主に望遠鏡や装置のエンジニアリングに使われる所長裁量時間とハワイ大学時間を除く、全体の約65%の時間(年間200 $\sim$ 250夜程度に相当)が、共同利用観測を中心とするコミュニティ(大学等の研究者)が行う科学観測に提供されている。実際に観測者がマウナケア山頂に赴いて現地で観測を実行する以外に、国立天文台ハワイ観測所のヒロ山麓施設または国立天文

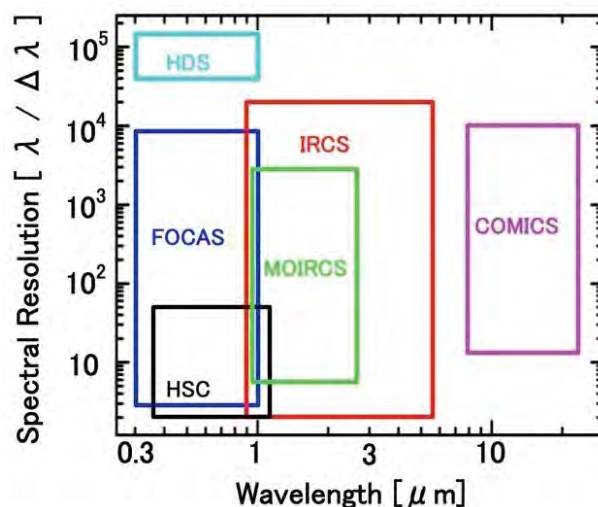


図2.1.1: すばる望遠鏡における既存の観測装置(持ち込み装置は除く)がカバーする波長および波長分解能のまとめ。

Credit: NAOJ

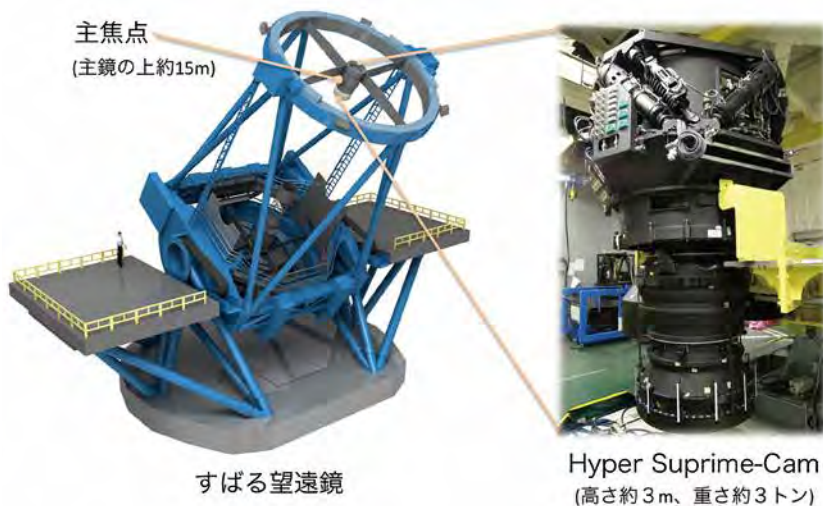


図2.1.2: すばる望遠鏡の主焦点に搭載されるHyper Suprime-Cam (HSC)。
Credit: NAOJ

台三鷹からのリモート観測も行われている。現地またはリモートで観測者が観測に立ち会ういわゆる「クラシカル観測」を主流としているが、HSCについてはプログラムの優先度や観測条件、ターゲットの座標、使用するフィルターなどをもとに観測所が判断して実行プログラムを決める「キュー観測」も導入され、より効率よく観測を行うことを目指している。

2.1.2

TMT時代のすばる望遠鏡を支える 広視野観測装置

すばる望遠鏡は、他の8m級望遠鏡に比べ、その広い視野に特徴をもつ。現存する口径8m以上の望遠鏡で、可視光において1平方度を超える視野を星像0.4秒角というきわめて高い解像度で観測することができるのは、すばる望遠鏡だけである。その特徴を生かし、初代のすばる主焦点カメラ (Suprime-Cam) は数多くの観測成果を挙げた。また2014年からは視野1.75平方度を誇る超広視野可視光撮像装置Hyper Suprime-Cam (HSC) による300夜規模の戦略的観測プログラムが進行中で、広視野サーベイ天文学を大きく発展させている。すばる望遠鏡の観測データに基づく年間の論文出版数は年々増加を続けており、光赤外線観測分野において多くの若手研究者を輩出するなど、人材育成の観点でも我が国の天文学においてきわめて重要な役割を果たしている。

TMT時代へ向けて、すばる望遠鏡が果たすべき役割は、その広視野観測能力にさらに磨きをかけ、TMTに我が国独自のターゲットを供給することである。すばる望遠鏡ではその時代を見据え、すでに運用を始めているHSCに続き、HSCと同程度の視野 (1.25平方度) で2400天体を可視光から1.3 μ mまで同時に分光することができる超広視野多天体分光装置 (PFS) が2022年頃からの運用開始を目指して準備を進めているところである。また、主

に明夜を担う基幹装置として、視野20分角にわたって星像を改善する地表層補償光学 (GLAO) を搭載する計画 (ULTIMATE-Subaru計画) も進んでいる。これらの新時代を担う広視野観測装置群 (HSC、PFS、ULTIMATE) によって、可視光分光観測においては従来比で視野約50倍・同時分光天体数約20倍、赤外線観測においては視野約10倍・解像度2倍というアップグレードが実現され、TMTへのターゲット天体供給において主要な役割を果たすと期待されている。ここで挙げた各装置について、以下にその特徴と開発/運用の現状を簡単に述べる。

2.1.2.1 HSC (Hyper Suprime-Cam)

HSCは、国立天文台と東京大学 (カブリIPMU、理学系研究科)、高エネルギー加速器研究機構、台湾・中央研究院天文及天文物理研究所、および米国・プリンストン大学の共同で開発されたすばる望遠鏡の主焦点搭載の超広視野モザイクCCDカメラ (可視光広視野撮像装置) である (図2.1.2)。104枚のCCD素子を配置し、視野1.75平方度をピクセルスケール0.17秒角でカバーする。これは満月9個分の視野に対応し、図2.1.3のようにアンドロメ



図2.1.3: HSC (g、r、iバンド) で撮像したアンドロメダ銀河。
Credit: NAOJ

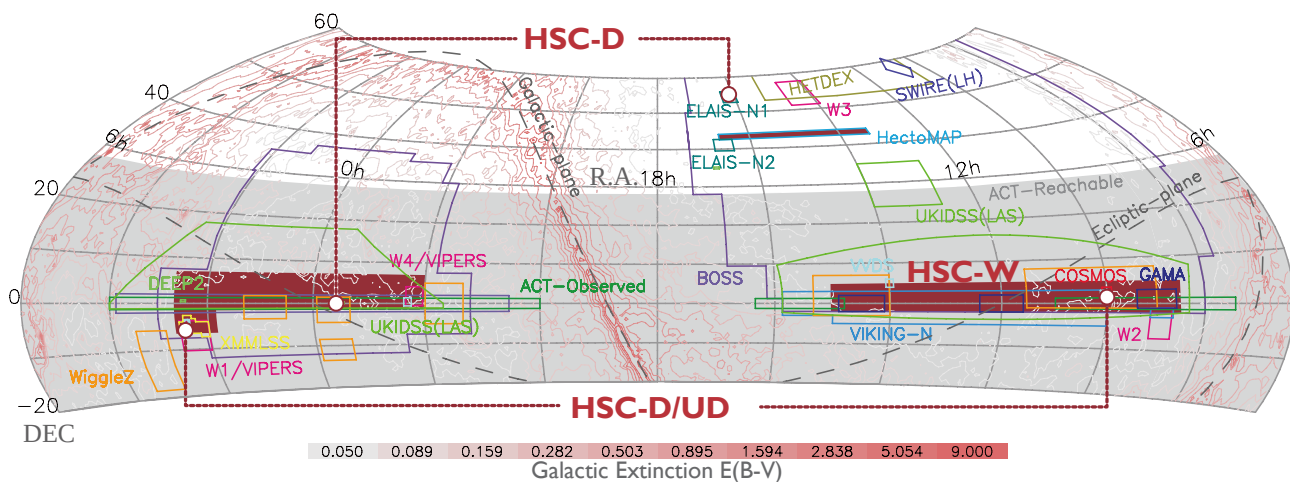


図2.1.4：HSCによる戦略枠プログラムで観測される「ワイド (HSC-W)」「ディープ (HSC-D)」および「ウルトラディープ (HSC-UD)」のサーベイフィールドの天空分布。
HSCチーム提供

ダ銀河を中心から外側まで一度に観測できる広さであり、他の8m級望遠鏡に比べて抜群的観測（サーベイ）効率を誇る。

HSCの g 、 r 、 i 、 z 、 y の各ブロードバンドでの天体検出感度は、暗夜、シーイング0.5秒角の条件での1時間積分によって、それぞれ27.8等、27.2等、26.5等、25.9等、25.1等である。なおここに示した標準的な多色ブロードバンドフィルターに加え、HSCでは数多くのナローバンドフィルターがユーザの獲得した外部資金などによって製作・提供されている。この多彩なナローバンドフィルターの存在は、2020年代にLSSTが稼働した後においても、HSCの重要な特徴になると言えるだろう。

装置はすでに科学運用に供されており、「戦略枠プログラム」としてすばる望遠鏡の330夜を投入する大規模なサーベイ観測が2014年から進められている。この戦略枠プログラムは「ワイド (1400平方度)」「ディープ (27平方

度)」「ウルトラディープ (3.5平方度)」の3つのレイヤーで構成され (図2.1.4)、それぞれ代表値として r バンドで26等、27等、28等の深さを目指している。すべてのレイヤーについて、 g 、 r 、 i 、 z 、 y の5枚のブロードバンドフィルターによる多色データに加え、「ディープ」および「ウルトラディープ」の領域では4枚のナローバンドフィルターを使った観測も行われている。この戦略枠プログラムで得られたデータは解析済画像や天体カタログとして使いやすい形式で一般公開されており (2019年10月現在、2019年5月に行われた第2回パブリックデータリリースが最新)、世界中の研究者がこの大規模なHSCによるサーベイデータを利用して科学成果を挙げることが可能となっている。戦略枠プログラムは最遠方天体から銀河系内のサイエンスまで幅広い分野で活用され、数多くの論文が出版されている。さらに、戦略枠プログラムではカバーされていないがHSCの広視野深撮像能力を必要とする多様なサイエ

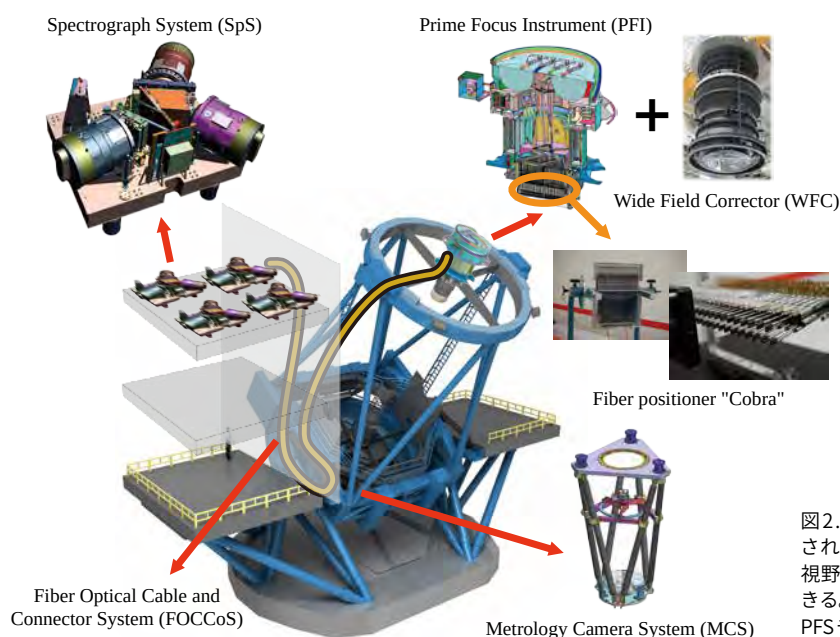


図2.1.5：PFSの全体像とサブシステム。焦点面に配置されたファイバーポジショナーによって1.25平方度の視野内にある最大2400天体を同時に分光することができる。

PFSチーム提供

Arm		Wavelength range	Throughput	Resolving Power	Continuum sensitivity		Emission line sensitivity	
					[AB mag]		[10 ⁻¹⁷ erg/s/cm ²]	
		[nm]			mean	representative	mean	representative
Blue		380 - 450	14%	~ 2300	22.0	22.1(@415nm)	2.9	2.8 (@415nm)
		450 - 550	24%		22.4	22.5(@505nm)	1.5	1.4 (@505nm)
		550 - 650	23%		22.1	22.2(@605nm)	1.5	1.3 (@605nm)
Red	Low Res.	630 - 750	29%	~ 3000	22.2	22.5(@680nm)	1.2	1.0 (@680nm)
		750 - 850	30%		22.0	22.4(@796nm)	1.1	0.9 (@796nm)
		850 - 970	27%		21.6	22.1(@912nm)	1.2	0.9 (@912nm)
	Mid. Res.	710 - 775	26%	~ 5000	21.6	21.8(@741nm)	1.3	1.1 (@741nm)
		775 - 825	28%		21.6	21.8(@796nm)	1.1	1.0 (@796nm)
		825 - 885	27%		21.5	21.7(@856nm)	1.2	1.0 (@856nm)
NIR		940 - 1050	17%	~ 4300	20.9	21.5(@993nm)	2.0	1.3 (@993nm)
		1050 - 1150	19%		21.0	21.4(@1100nm)	1.6	1.2(@1100nm)
		1150 - 1260	17%		20.9	21.3(@1208nm)	1.5	1.2(@1208nm)

表2.1.1：PFSの基本的な仕様と想定される感度。ここでは暗夜、シーイング条件0.8秒角、1時間積分が想定されている。

PFSチーム提供

ンス、あるいは戦略枠プログラムを足がかりとしてそれをさらに発展させるような観測提案が、個別のHSC共同利用観測課題として毎年数多く提案されている。

2.1.2.2 PFS (Prime Focus Spectrograph)

東京大学カブリIPMUを中心に、日本、アメリカ、台湾、フランス、ブラジル、ドイツ、中国の研究機関からなる国際コンソーシアムによって開発が進められている、視野1.25平方度の主焦点多天体ファイバー分光装置である。青・赤・近赤外の3つのアームで構成される分光器を4台持ち、視野内の最大2400天体について可視光(0.38 μ m)から近赤外線(1.26 μ m)までの波長範囲を分解能2,300~5,000程度で同時に分光することができる。PFSの全体像と主要なサブシステムを図2.1.5に示す。主焦点には2400本の光ファイバーからなるファイバーシステムが搭載され、ファイバーが焦点面を動き回ることによって視野内の目的天体を観測することができる。ファイバーに入った光はドーム内の望遠鏡とは別室に設置された4台の分光器に運ばれる。PFSのサブシステムの一部で、カセグレン焦点部から主焦点部のファイバーの位置をモニターするメトロロジカメラおよび分光器の第一号は、すでにハワイへ輸送され、現在望遠鏡に取り付けた試験が行われている。今後は分光器、主焦点装置なども続々とハワイに輸送され、2022年からの運用開始を目指してコミッショニングが行われる予定である。PFSで想定される感度を表2.1.1に示す。HSCと同様に、PFSも戦略枠プログラムとして300夜程度の大規模なサーベイを実行することを計画している。宇宙論・銀河進化・銀河考古学をサイエンスの3本柱

に掲げ、上述のHSCの戦略枠プログラムの撮像探査領域をベースに、1000平方度規模の輝線銀河探査や20平方度程度でさまざまな銀河種族を狙うディープな分光サーベイなどが計画されており、現在そのサーベイデザインが詰められているところである。図2.1.6には、PFSの宇宙論サーベイでマッピングされる銀河の数密度や分布を示す。他の類似計画に比べ、PFSが宇宙の大規模構造の探査で抜kindでた能力をもつことが分かる。

2.1.2.3 ULTIMATE-Subaru (Ultra-wide Laser Tomographic Imager and Mos with AO for Transcendent Exploration)

ULTIMATE-Subaruは、視野直径20分角にわたって星像を改善する地表層補償光学(GLAO)を搭載し、すばる望遠鏡の特に赤外線域における広視野探査能力を大幅に強化する計画である(2026年完成予定)。地表付近の大気ゆらぎを補正するGLAOの技術によって、従来の補償光学に比べて格段に広い視野を実現することができる。シミュレーションによれば、マウナケアはGLAOに最適な大気条件のサイトであり、Kバンド帯において標準的な気象条件で0.2秒角の空間解像度を実現できる。これはハッブル宇宙望遠鏡や2020年代に打ち上げが予定されるNASAのWFIRST衛星などと同等の解像度である。またこの星像改善によって点源検出感度が向上し、視野の増大と合わせてサーベイ効率が桁で向上する。ULTIMATE-Subaru実現のために必要となる開発要素を図2.1.7にまとめる。現在、国立天文台ハワイ観測所を中心に、東北大学、東京大学、オーストラリア国立大学(ANU)、台湾

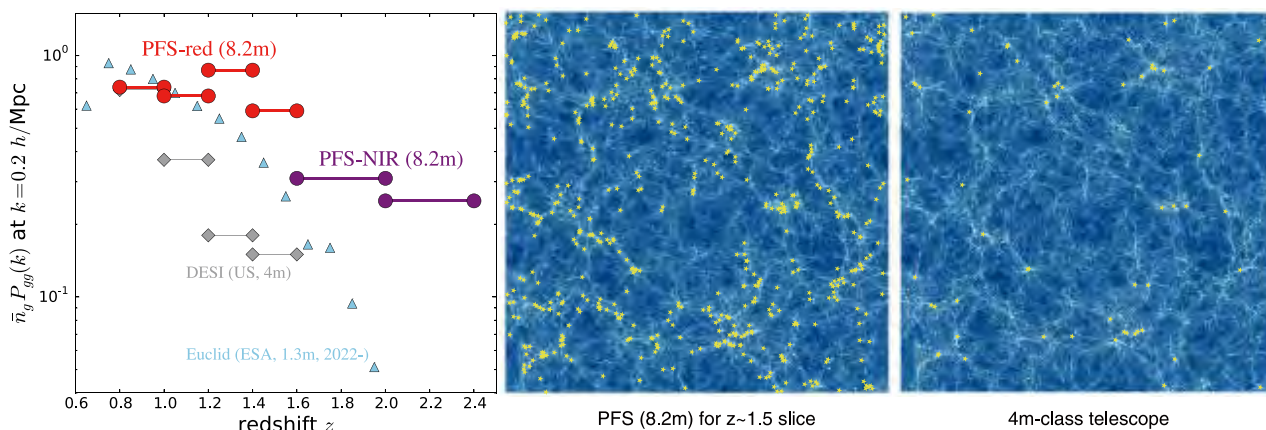
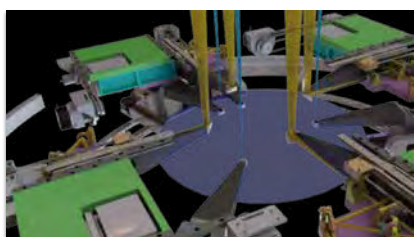


図2.1.6：(左) PFS宇宙論サーベイによりマッピングされる銀河の赤方偏移ごとの数密度。これから実施される地上4m級望遠鏡での探査 (DESI) やスペースからの探査 (Euclid) に比べて、高赤方偏移をカバーしつつ、より高い数密度で銀河の分布を測定できる。(右) 観測シミュレーションにおける赤方偏移1.5での暗黒物質 (青) と観測される銀河 (黄色) の分布で、PFSの場合 (上) は4m望遠鏡での探査 (下) に比べ詳細に分布を明らかにすることができる。

PFSチーム提供

(3) 波面センサー

カセグレン (FoV~20 arcmin) 赤外ナスミス (FoV~14 arcmin)

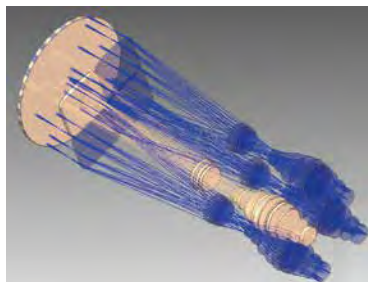


(4) 広視野近赤外線観測装置

- ・ MOIRCSを赤外ナスミス焦点で再利用
- ・ カセグレンに広視野撮像装置(WFI)を設置



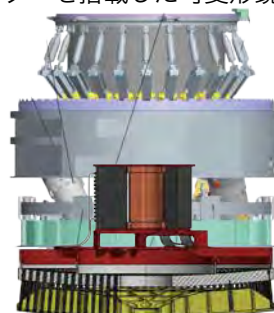
a. MOIRCS



b. Wide-Field Imager (WFI)

(1) 可変副鏡

直径1260mm, 924本のアクチュエーターを搭載した可変形鏡



(2) レーザーガイド星生成装置

TOPTICALレーザー(589nm)を2台搭載し、4本のレーザーを照射

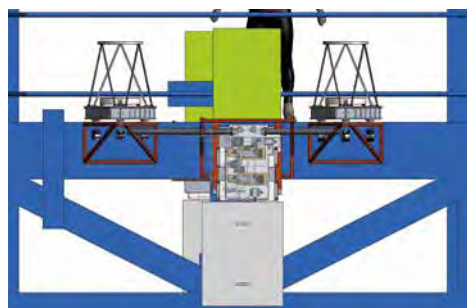


図2.1.7：ULTIMATE-Subaruの主な開発要素。

ULTIMATE-Subaruチーム提供

中央研究院天文及天文物理研究所 (ASIAA) の協力のもとで開発が進められている。2018年度にはこの新しい補償光学システムの概念設計レビューに合格し、GLAO実現の鍵を握る可変副鏡、新しいレーザーガイド星システムや波面センサーなどの開発が進められているところである。2019年度からは「すばるGLAOプロジェクト」として

国立天文台のAプロジェクトとして採択され、さらに本格的に開発が進められている。

ULTIMATE-Subaru計画では「広視野・高感度・高解像度」というGLAOの特長を最大限に生かす広視野赤外線カメラ (視野14分角×14分角) の開発を目指している。この赤外線カメラには多彩なナローバンドやミディアムバ

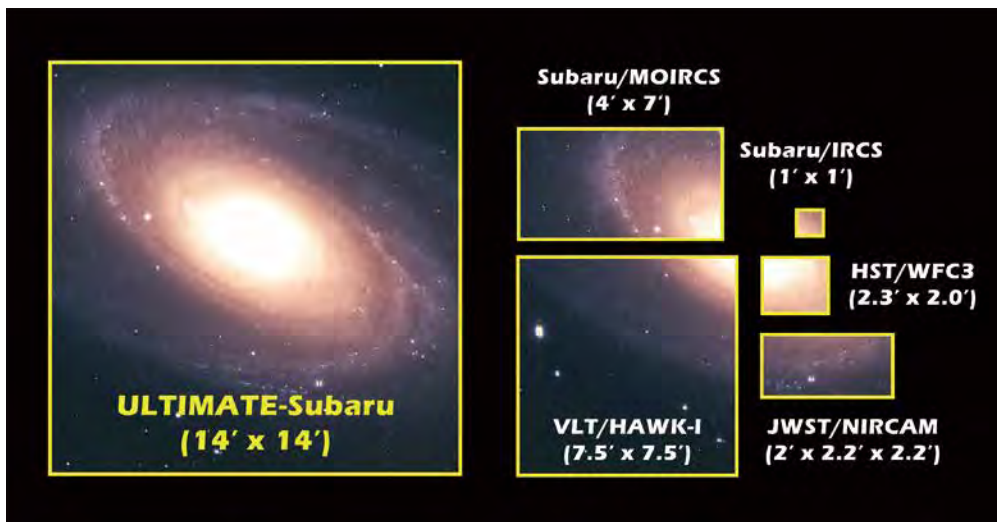


図2.1.8：ULTIMATE-Subaruの主要観測装置となる広視野赤外線カメラの視野と既存の地上大型望遠鏡/スペース望遠鏡に搭載されている赤外線カメラの視野の比較。特に波長 $2\mu\text{m}$ よりも長い側の観測においては、2020年代後半においてもULTIMATE-Subaruは最高のサーベイ効率を誇る。

ULTIMATE-Subaru チーム提供

ンドフィルター等を搭載して、大規模な赤外線サーベイ観測を実行することが計画されている。一般に赤外線での観測は地上では背景光が明るいためスペース望遠鏡が有利と考えられるが、2020年代に打ち上げが予定される赤外線サーベイ望遠鏡である欧州 (ESA) のユークリッド衛星 (Euclid) や米国 (NASA) のWFIRST衛星は、いずれも波長 $2\mu\text{m}$ 以下 (H バンド帯まで) をカバーするものであることに注意されたい。またJWSTは波長 $2\mu\text{m}$ 以上をカバーするが、視野が限られており、連続的な領域をマッピングするサーベイ観測には不向きである。ULTIMATEの K バンド帯での広域探査能力は既存の装置または将来検討されている望遠鏡・装置のなかでも群を抜いており (図2.1.8; 図2.1.9を参照)、2020年代の宇宙望遠鏡計画とも親和性が高い。またナローバンドを大気夜光輝線の谷間にデザインすれば、宇宙望遠鏡と遜色ない感度が圧倒的な視野にわたって実現できる。このように、2020年代の宇宙望遠鏡では実現できないナローバンド・ミディアムバンド・ K バンド (ブロードバンド) の観測を中心に、HSCやPFSと同様に戦略枠クラスの大規模サーベイを実行することが検討されており、従来の遠方銀河探査で常に立ちはだかっていた観測波長の壁を打ち破り、新時代の遠方銀河サンプル構築にきわめて重要な役割を果たすことが期待される (本書3.2章を参照)。また遠方銀河の探査に限らず、ULTIMATE-Subaruではたとえば銀河系中心方向の観測や銀河系内の星形成領域のように星が混み入った領域やダストに深く埋もれた領域など、赤外線での高解像度の観測を必要とするあらゆる研究分野に大きなインパクトをもたらすと期待されている。

ULTIMATE-Subaruが目指すのは広視野撮像能力だけではない。既存装置MOIRCSは中分散多天体赤外線分光装置としてGLAOとともに運用されることが想定されており、グリズムの改良とGLAOによる星像改善の効果に加え、ナスミス焦点への移設によってより安定的な環境で運用することで、世界最高感度の赤外線多天体分光装

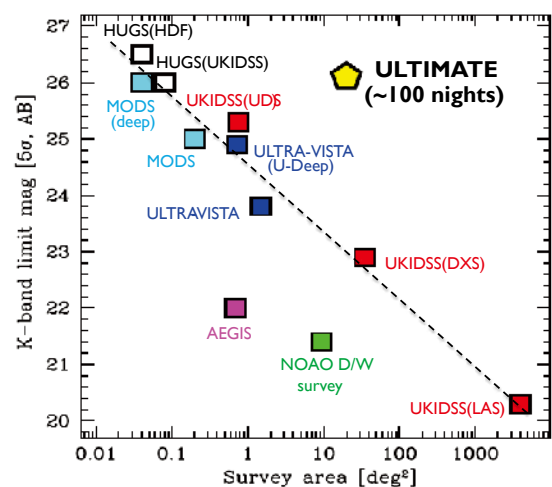


図2.1.9：ULTIMATE-Subaruを使って K バンド帯で100夜のサーベイを行なった場合に実現できるサーベイ面積 (横軸) と到達する限界等級 (縦軸)。既存の4~8m級望遠鏡で行われたさまざまな K バンドサーベイと比較して、圧倒的な広さと深さが実現できると期待される。

ULTIMATE-Subaru チーム提供

置として引き続き第一線の活躍が期待されている。さらにULTIMATE-Subaruで開発する次世代補償光学システムでは、上述の広視野モード (GLAOモード) がメインのモードと考えられているが、レーザーガイド星を空の狭い領域に集中させ、その領域の大気揺らぎを完全に補正することで、可視光~近赤外線までのすべての波長にわたって回折限界 ($\text{FWHM}=0.05$ 秒角) を達成する狭視野モード (レーザートモグラフィー補償光学/LTAOモード) も同時に実装することができる。このモードを利用して、点源への感度を極限まで高め、狙った天体について可視光から近赤外線までのすべての波長にわたって同時に分光できる広帯域分光装置の新しいアイデアなども浮上している。このように、ULTIMATE-Subaru計画は、すばる望遠鏡の能力を限界まで引き上げるための望遠鏡アップグレードという側面も持ち、2030年代に日本がTMTに真に重要なターゲットを供給してサイエンスをリードするために本質的な役割を果たす。

2.1.3

すばる望遠鏡の多彩な観測機能と将来計画

すばる望遠鏡では限られた予算とリソースの中で、ここで解説した3つの広視野観測装置を早期に実現し、安定的に運用することを目指していく(図2.1.10)。現在運用中のその他の観測装置の多くは2025年頃までにすばるでの役割を終えることになるが、これらの機能はTMTに搭載される各装置へと受け継がれ、生まれ変わる予定である。一方で、広視野サーベイ用の装置ではなくても、科学目的を絞り込んで世界的にユニークな機能を有する観測装置、あるいはすばる望遠鏡でなければ実現できないような装置で、顕著な科学成果やTMTとの強力な相補性が期待できる場合などにおいては、外部からの資金調達が前提にはなるが、既存装置のアップグレードや新たなPIタイプ装置の持ち込みを最大限サポートする。

その代表例がアストロバイオロジーセンターや国立天文台などで開発され、現在すばる望遠鏡の持ち込み装置(PIタイプ装置)として運用されているIRD (Infrared Doppler) である。IRDは $0.97\sim 1.75\mu\text{m}$ を同時にカバーする近赤外線の高分散分光装置で、最大で70,000の波長分解能で観測できる。レーザー周波数コムによって高い精度で波長較正を行い、視線速度法(ドップラー法)によって太陽近傍のM型星まわりのハビタブル惑星の検出を目指す。IRDはその科学的価値が認められ、PIタイプ装置としてすばる望遠鏡の戦略枠プログラムが採択され

て現在大規模に観測が進められているところである。またこの戦略枠観測の終了後には、TMT時代へ向けてIRDの性能を大幅に向上させるプランも提案されている(本書3.1.2節を参照)。系外惑星の観測を目的とする装置では、他にもPIタイプ装置としてすばる望遠鏡で運用されるSCExAO (Subaru Coronagraphic Extreme Adaptive Optics) がある。これは系外惑星を直接観測するための高コントラスト・高解像度の極限補償光学システムで、TMT時代の系外惑星研究への技術実証としての役割も果たす。現在SCExAOと組み合わせる観測装置として、近赤外線用の観測装置CHARISおよび可視光用の観測装置VAMPIRESがいずれもPIタイプ装置としてすばる望遠鏡で運用されている。

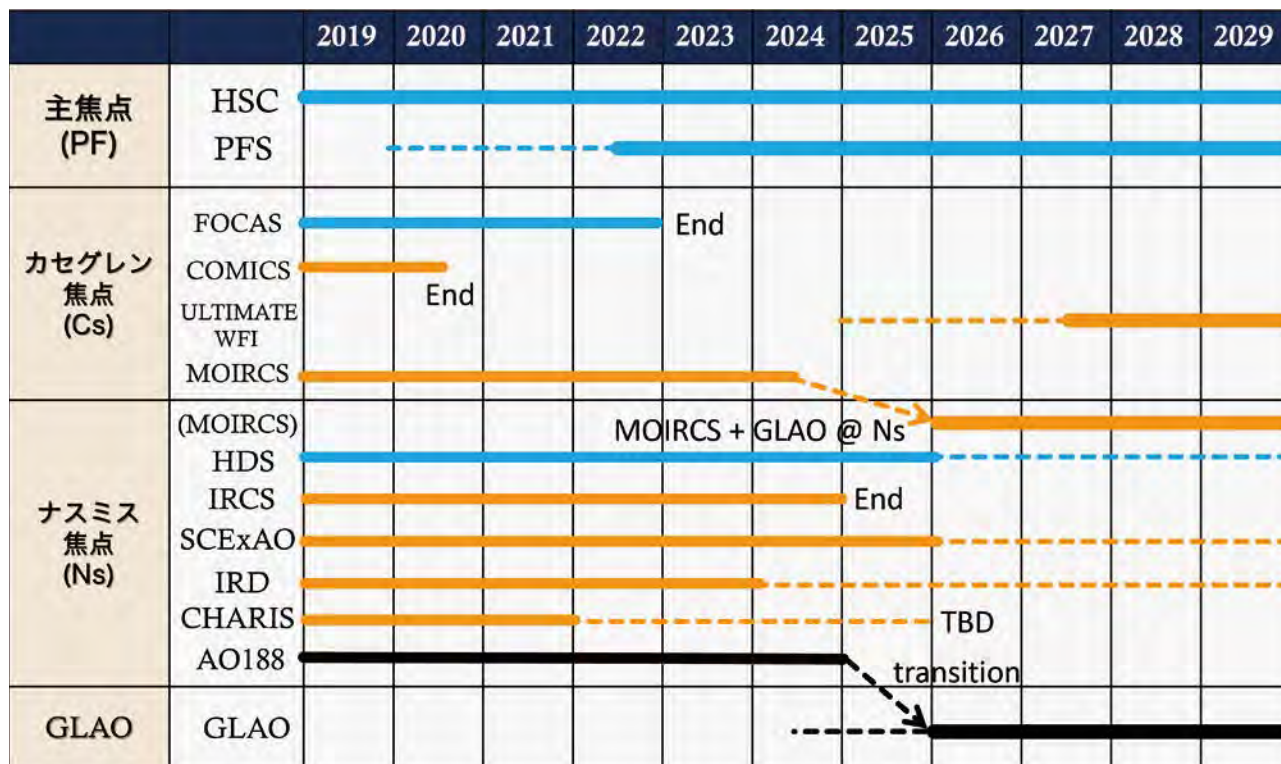


図2.1.10: 2019年11月現在における、TMT時代に向けたすばる望遠鏡の装置開発・運用プラン。
国立天文台ハワイ観測所提供

2.2 TMT 計画

2.2.1

Thirty Meter Telescope (TMT) の概要

TMTは日本、米国、カナダ、インド、中国の国際共同科学事業として、ハワイ島マウナケアに口径30mの光学赤外線望遠鏡を建設する計画である(図2.2.1)。従来の口径8-10mの光学赤外線望遠鏡に対し、10倍以上の集光力、3倍以上の解像度をもち、補償光学によってその光学的性能を最大限活かす赤外線観測では、点光源に対して100倍以上の感度向上という、過去に類のない性能向上を目指すものである。

日本はTMT望遠鏡本体の製作、全ての主鏡材の製作と一部の研磨、観測装置の一部の製作を担当するほか、望遠鏡建設を統括し現地工事の主体となるTMT国際天文台(TIO)の運営のための分担金の一部を負担する。国立天文台は、これらの貢献により、TMTの科学観測時間のうち20%程度を日本の研究者コミュニティに提供することを目指している。

2.2.2

TMTの観測装置

2.2.2.1 第一期観測装置

2020年1月時点で、第一期観測装置としてIRIS(近赤外撮像分光装置)およびWFOS(可視広視野多天体分光装置)が予定され、開発が進んでいる。また、系外惑星観測を主目的とした高分散分光器であるMODHISをできるだけ早期に観測可能にすることを目指している。

IRIS

近赤外撮像分光装置IRIS(Infrared Imaging Spectrograph)は、TMTが補償光学を用いて達成する回折限界に達し



図2.2.1: マウナケア山頂の望遠鏡群とTMT(想像図)。後方右にすばる望遠鏡が見えている。TMTの建設地は山頂から200m程度低い位置にあり、ほかの望遠鏡に比べハワイ島内の多くの場所から見えない。
Credit: NAOJ

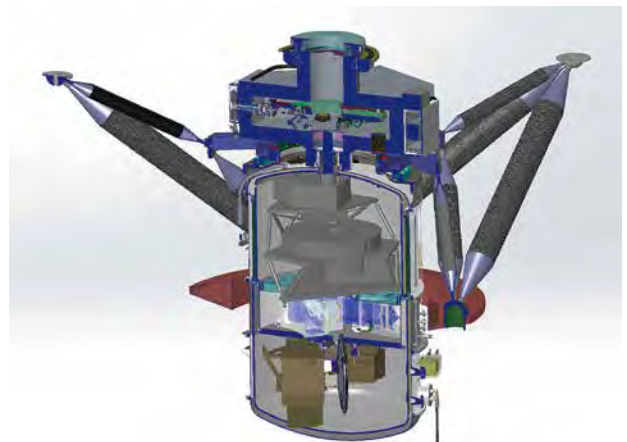


図2.2.2: IRISの全体図。上から、低次波面センサー部、撮像部、面分光部となっている。
TMTプロジェクト提供

た天体像を観測するように設計された近赤外線(0.84-2.4 μ m)の撮像および面分光観測装置である(図2.2.2)。

撮像部分は、0.004秒角/pixelの空間サンプリングで34秒角 $\times$ 34秒角の視野をカバーする。絶対精度で2-4ミリ秒角、相対精度で30マイクロ秒角という大変厳しいアストロメトリ精度の要求を達成することを目指している。また、数多くのフィルターが定義されており、70枚が同時

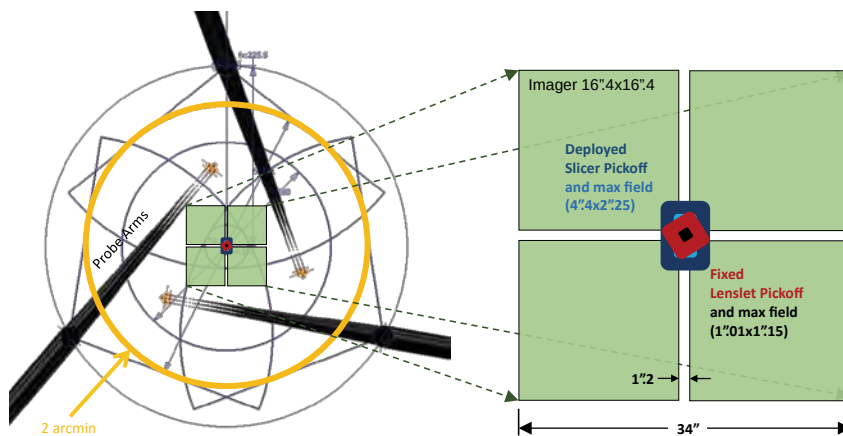


図2.2.3: IRISの焦点面の配置。左の三本の黒い線は低次波面センサー用ピックアップアーム。中心部の34秒角 $\times$ 34秒角が撮像部の視野となり、その中央にスライサーとレンズレットの面分光モードの視野がある。
TMTプロジェクト提供

Mode	Spatial sampling	Field of view	Resolution	Min/Max wavelength	Bandpass
	[mas]	[arcsec]	[$\lambda/d\lambda$]	[μm]	
Imager	4 mas	34 × 34	Set by filter	0.84 - 2.4	Variety of bandpasses
Slicer IFS 88 × 45 Spaxels	50 mas 25 mas	4.4 × 2.25 2.2 × 1.125	4000, 8000	0.84 - 2.4 0.84 - 2.4	20%, 10% 20%, 10%
Slicer IFS 44 × 45 Spaxels	50 mas 25 mas	2.2 × 2.25 1.1 × 1.125	4000 - 10000	0.84 - 2.4 0.84 - 2.4	20%, 10%, <i>H+K</i> 20%, 10%, <i>H+K</i>
Lenslet IFS 112 × 128 Spaxels	9 mas 4 mas	1.01 × 1.15 0.45 × 0.51	4000	0.84 - 2.4 0.84 - 2.4	5% 5%
Lenslet IFS 16 × 1128 Spaxels	9 mas 4 mas	0.144 × 1.15 0.064 × 0.51	4000 - 10000	0.84 - 2.4 0.84 - 2.4	20%, <i>H+K</i> 20%, <i>H+K</i>

表 2.2.1：TMT/IRIS のモード

	Wavelength coverage	Pixel sampling	Field of view	Spatial resolution (FWHM@2 μm)	Sensitivity		
	[μm]	[mas/pix]	[arcsec ²]	[mas]	<i>J</i>	<i>H</i>	<i>K</i>
撮像 (点源)	0.84 - 2.4	4	34 × 34 (1.2" gaps)	15.6	29.8 [mag]	28.9 [mag]	29.1 [mag]
撮像 (広がった天体)	0.84 - 2.4	4 - 50	34 × 34 (1.2" gaps)	—	20.7 [mag/arcsec ²]	19.5 [mag/arcsec ²]	19.8 [mag/arcsec ²]

表 2.2.2：TMT/IRIS の感度 (撮像モード)。10000 秒積分で S/N=10 の場合の感度を AB 等級で示す。

	Wavelength coverage	Pixel sampling	Field of view	Spectral resolution	Sensitivity		
	[μm]	[mas/pix]			<i>J</i> @ <i>R</i> ~ 4000	<i>H</i> @ <i>R</i> ~ 4000	<i>K</i> @ <i>R</i> ~ 4000
分光 (点源)	0.84 - 2.4	4	表 2.2.1 参照	4000, 8000 - 10000	24.7 [mag]	24.5 [mag]	24.1 [mag]
分光 (広がった天体)	0.84 - 2.4	4 - 50	表 2.2.1 参照	4000, 8000 - 10000	15.1 (4 mas) 20.3 (50 mas) [mag/arcsec ²]	14.9 (4 mas) 20.2 (50 mas) [mag/arcsec ²]	14.7 (4 mas) 19.4 (50 mas) [mag/arcsec ²]

表 2.2.3：TMT/IRIS の感度 (分光モード)。10000 秒積分で S/N=10 の場合の感度を AB 等級で示す。

にインストールされる予定である。

面分光機能は、撮像機能と同時に使用可能で、撮像機能の視野の中心部を利用する (図 2.2.3)。スライサーとレンズレットのモードがあり、4 ミリ秒角から 50 ミリ秒角までの異なる空間サンプリングを選んで、*R*=4,000 から 10,000 までの波長分解能での面分光が可能となる。

IRIS の撮像部分は日本が、面分光部分はカリフォルニア大学が、低次波面センサー部分はカナダ NRC が担当する。IRIS に回折限界像を提供する補償光学システム NFIRAOS はカナダが中心となって開発を進めている。

表 2.2.1 ~ 2.2.3 に、IRIS の各観測モードの主要パラメータと予想感度をまとめた。

WFOS

可視広視野多天体分光装置 WFOS (Wide-Field Optical Spectrometer) は可視光波長域 (0.31 - 1.0 μm) でナチュラルシーイングでの撮像・多天体分光機能を提供する観

測装置である。WFOS の検討は以前から行われていたが、2018 年にファイバーを用いたデザインとスリットマスクを用いたデザインのトレードオフ検討が行われ、スリットマスクを用いたデザインを採用することが決定された。現在概念設計が進められているところであり、日本も検討に参加している。また、将来アップグレードとして面分光ユニットを組込む検討が日本で行われている。

MODHIS

MODHIS (Multi-Object Diffraction-limited High-resolution near-IR Spectrometer) は、0.97 - 2.5 μm の波長範囲で、波長分解能 100,000、0.1 秒角 × 0.1 秒角の空間サンプリングで 5 × 5 の小規模な面分光機能をもった近赤外線ファイバー分光器である。NFIRAOS と組合せて回折限界像を利用する。

主要サイエンスケースとして、高精度視線速度測定による地球型系外惑星の検出および惑星大気分光による

視野	8.3分角×3分角
波長範囲	Blue: 310-550nm, Red: 550-1000nm
波長分解能	1500, 3500, 5000
大気分散補正光学系	有

表2.2.4：WFOSの主な仕様

分子の検出、惑星表面のマッピングなどが掲げられている。系外惑星に重点を置いた観測装置として、第一期観測装置として観測開始できるよう検討が進められている。主にカリフォルニア工科大、カリフォルニア大が検討を行っているが、日本も装置検討に参加している。

第二期装置として検討されているPSI (Planetary System Instrument) のコンセプトとは重なっている部分があるため、将来的にPSIが開発される場合には、MODHISとPSIを組合せた観測を行うことが考えられる。

2.2.2.2 第二期観測装置

これらの第一期観測装置に加えて、第二期装置として開発する装置の検討が行われている。

bMICHl：3 μ mから14 μ mまで（または25 μ mまで）の波長範囲で撮像および面分光を行う観測装置。中間赤外線用の補償光学システムと組み合わせる。

HROS：0.31-1.1 μ m（または1.3 μ m）の波長分解能50,000から100,000以上の高分散分光を行う観測装置

IRMOS：直径5分角程度のパトロール範囲内で3秒角程度の空間を10個程度ピックアップし、補償光学による高空間分解能で面分光を行う観測装置

PSI：極限補償光学とコロナグラフで 10^{-8} のコントラストを達成し、可視光から5 μ mまでの赤外線撮像および低分散面分光から高分散分光まで行う観測装置

NIRES：近赤外線（1-5 μ m）エシエル高分散分光器。補償光学システムとしてNFIRAOSを利用する。

図2.2.4には、これらの第二期観測装置候補を含め、波長と波長分解能の平面にTMT観測装置のパラメータを表示した。

2.2.3

すばる望遠鏡やジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡との感度比較

図2.2.5は、2021年にNASAが打ち上げ予定のジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡（JWST）およびすばる望遠鏡とTMTの感度を比較したものである。地上望遠鏡で大気等の熱放射が効いてくる3 μ mよりも長波長では、JWSTの方が感度が高くなるが、より短い波長ではTMTの方がJWSTよりも感度が高い。特に補償光学を用いた点源の観測では、JWSTよりもはるかに高い感度が期待できる。

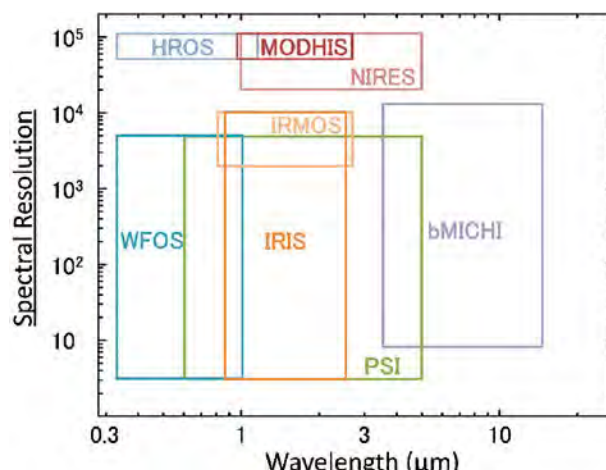


図2.2.4：TMTの観測装置群が波長および波長分解能のパラメータスペースで占める空間。

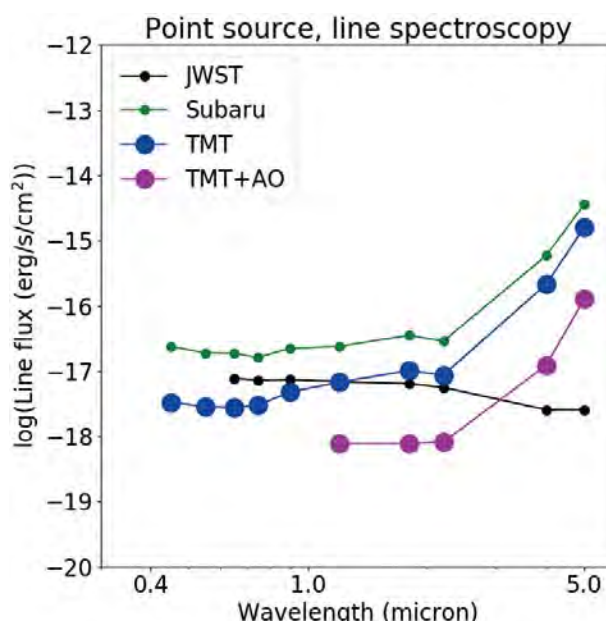


図2.2.5：点源についてのTMTとJWST、すばる望遠鏡の波長ごとの感度の比較（1時間積分、S/N=10 σ ）。“TMT”は補償光学なしの場合、“TMT+AO”は近赤外線について、補償光学を用いた場合の感度。

2.2.4

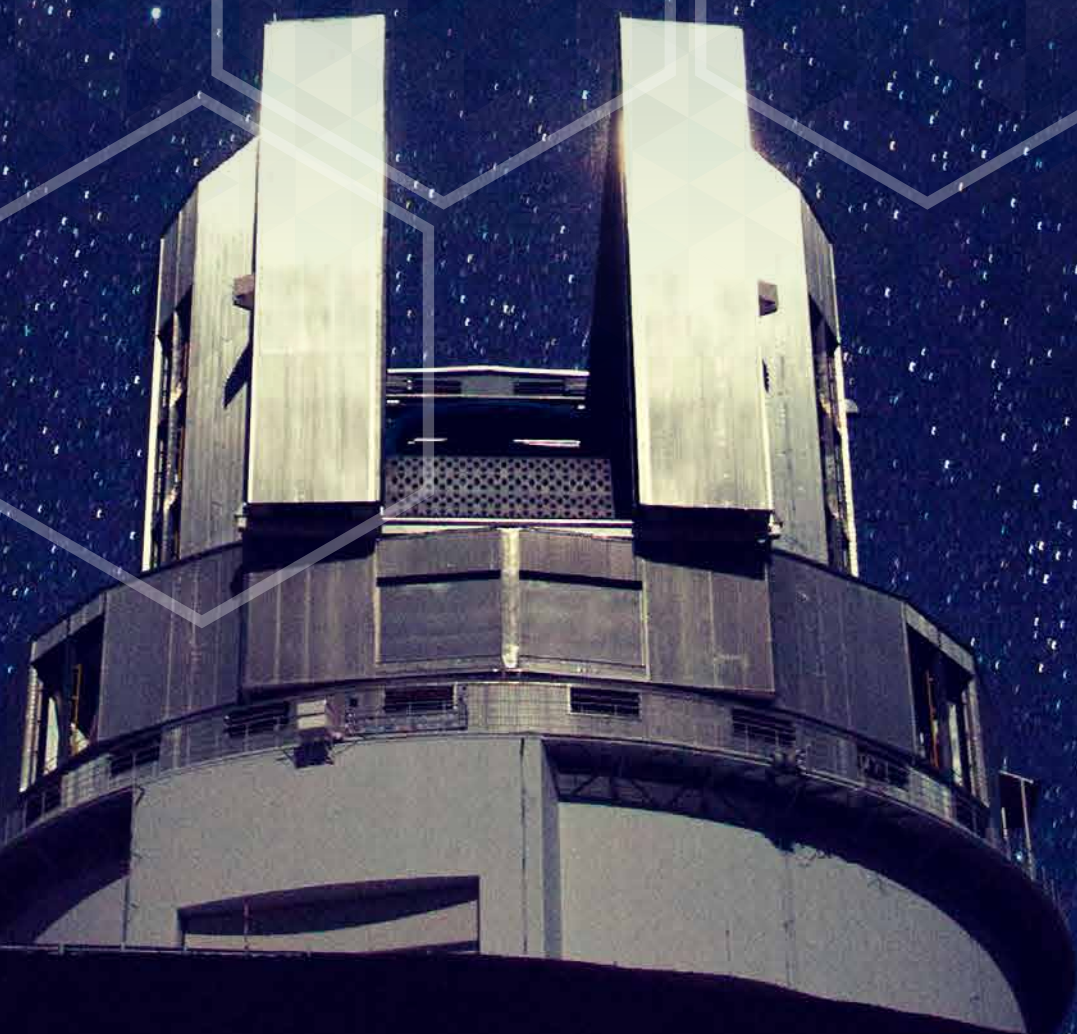
他の超大型望遠鏡計画

TMT以外の超大型望遠鏡計画としては、米国（カーネギー天文台、アリゾナ大等）、オーストラリア、韓国等が参加する、8.4mの鏡を7枚使用し口径24.5mに相当するGMTと、ヨーロッパ、ブラジル、チリが参加する口径39mのE-ELTが進行している。これら二つの望遠鏡はチリに建設されるのに対し、TMTは北半球に位置しており、観測できる天域が異なるため、連携観測が重要になる。米国では、TMTとGMTを合わせたUS-ELTプログラムとして、二つの望遠鏡によって全天を観測できるとして推進を図っている。E-ELTの口径はTMTよりも大きいですが、マウナケアはE-ELTのサイト（アルマゾネス）よりも標高が高く、特に赤外線観測で地球大気の影響が小さい

こと、またサイト調査の結果によると、補償光学の性能に影響する地球大気のパラメータについて、マウナケアはアルマゾネスよりも優れていること、TMTは科学運用の初期から補償光学システムが完全に機能することを目指していることなどから、総合的な性能ではTMTはE-ELTに対し十分に競争力の高い計画であると言える。

第3章

すばる望遠鏡とTMTの
連携で取り組むサイエンス



3.1

惑星系の理解と生命探査

「我々はどこから来たのか、我々は何者か、我々はどこへ行くのか」20世紀終盤にようやく最初の太陽系外惑星が見つかり、我々の太陽系が唯一の存在ではないこと、さらに、惑星系には様々な多様性があり、太陽系は標準ではないことがわかった。ここ10年ほどの技術革新により、生命に必要な水が液体として存在しうるハビタブルゾーン内に地球型惑星が存在する可能性も明らかになりつつある。人類がこれまで蓄積してきた天文学、惑星科学、生物学など幅広い知識を統合し、宇宙に生命を探す時代が始まったのである。

現時点では、我々が認識している現存の生命体は地球にしかない。しかし、星や惑星が銀河の様々な場所で誕生し、進化し、死ぬという過程を繰り返すように、太陽系以外に生命が存在する可能性は大いにある。その間に答えるべく、すばるおよびTMTを用いてハビタブルゾーン内の地球型惑星にバイオマーカーを探ることが科学的な生命探査の第一歩となる。他方、太陽系内の衛星などに生命を探ることも興味深い。距離が近いため、個々の天体についての詳細な調査は探査機の直接測定が鍵となるが、太陽系形成時の化石となる小惑星の統計的調査などでは広視野・高感度を誇るすばる望遠鏡とTMTが主な役割を果たす。太陽系の膨大な知見は、地球という生命惑星がいかに誕生/進化しえたかを理解する上で重要である。そして、生命をもつ惑星とまたない惑星を惑星系の形成時にまで遡って理解することは、宇宙生命の一般性の深い理解につながる。さらに、多種多様な惑星系を育むためには、時間軸を遡り、星の母体となる分子雲から星、そして惑星へ、その架け橋となる現象や誕生の瞬間を空間的にとらえ、様々な環境下における誕生・進化の普遍性と多様性を理解することも肝要である。

本節では次のような構成で相対的な時間軸を遡る。まず現在の系外惑星系および我々の太陽系、その後、原始惑星系円盤における惑星系形成、そしてより大きなスケールの星形成についてTMTとすばる望遠鏡で解き明かすべきサイエンスについて述べる。

3.1.1

太陽系外惑星における生命探査

天文学が答えるべき領域はこれまで常に拡大してきた。特に、「人類・生命と宇宙」というテーマはいまや天文学の中心テーマの一つとなっている。太陽系外惑星（系外惑星）はこのテーマに答える最良のターゲットであり、すばる望遠鏡・TMTにより探索されるべき最重要サイエンスとなっている。

3.1.1.1 太陽系外惑星探査の現状

系外惑星の最初の発見は、技術的な難しさのために1995年と比較的最近のことであったが、それにもかかわらず今や天文学の中で重要な位置を占めており、最も活発な研究分野の一つである。ここでは惑星探査の歴史から、すばる望遠鏡とTMTで狙う系外惑星の生命探査という究極の目標について述べたい。

最初に発見された系外惑星は、51 Pegasiという太陽に似た主星のまわりを公転する木星質量程度の惑星であり、惑星が公転することで生じる主星のふらつきを検出する「視線速度法」により見つかった(Mayor & Queloz 1995)。また1999年には、恒星の前面を惑星が隠す際に生じるわずかな減光を検出する「トランジット法」による初めての惑星が発見された(HD 209458 b, Charbonneau et al. 2000)。これらの惑星は、木星程度の質量にもかかわらず3日という非常に短い周期で公転しており、そのような惑星は当時の惑星形成理論では説明できなかったため、理論の活発な修正・発展を促した。その後、多くの探査が行われ次々と惑星が発見されることになり、2019年8月現在、3000個を超える惑星が発見されている。その中には、M型星と呼ばれる、太陽の数分の一という低質量の恒星のまわりに発見された、地球質量の惑星も含まれ、いくつかはハビタブルゾーンと呼ばれる液体の水を保持できる領域に存在すると考えられている(例えば Kepler-186 f, Quintana et al. 2014; TRAPPIST-1, Gillon et al. 2016; Proxima Centauri b, Anglada-Escudé et al. 2016)。

生命兆候の直接探査 (2032 ~)



図3.1.1: すばる望遠鏡-TMTを用いた系外惑星の生命探査ロードマップ。それぞれの時代における目標と使用する観測装置を示す。
Courtesy of NASA/JPL-Caltech
データ提供: ISAS/JAXA

惑星の発見だけでなく、近年は惑星大気を詳しく調べることが可能になってきている。最初に大気を持つことが確認されたHD209458bは、惑星がトランジットする際に、惑星大気を透過した光を分光観測することで、ナトリウムなどを含む大気があることが判明している。他にも水蒸気、一酸化炭素、メタンといった分子が多くの惑星に見つかっているが、それらの多くはかなり高温(400K以上)の海王星から木星質量の巨大惑星についてである。

惑星をその主星から空間的に分離して撮像する「直接撮像法」は、技術的には最も難しい(トランジット法、視線速度法は恒星と惑星の光は完全に混ざってしまう)。惑星に比べ何桁も明るい恒星からの光は地球大気によって散乱され、惑星の直接観測を極めて難しくしていたが、補償光学と呼ばれる大気による星像の乱れを補正する装置の発展により、2008年に最初の例と呼ぶべき直接撮像惑星が発見された。これはHR 8799と呼ばれる太陽より1.5倍ほど重い恒星のまわりにある、木星の7倍程度の重い惑星であり、生まれてから間もないため約1000Kと高温である(Marois et al. 2008)。このような惑星は赤外線を多く放出しており、観測が比較的容易である。現在までに直接撮像で検出された惑星は10を超えるが、全て同様に若い巨大木星型惑星である。

「重力マイクロレンズ法」と呼ばれる、恒星の重力場により光をレンズのように集光させることで惑星の存在を確認する手法での惑星検出もなされ、他の手法では見つけることが難しい公転周期が長く低温な惑星が存在することも確認されている(Bond et al. 2004)。

このように、1995年の最初の発見以来、系外惑星の研究は目覚ましい発展を遂げた。2010年代には、地球のような岩石惑星の存在も疑う余地がなく、豊富に存在することも知られるようになった。その中には、生命が存在可能なハビタブル惑星の可能性も示唆されている(図3.1.1)。一方、2020年代、さらには2030年代に期待

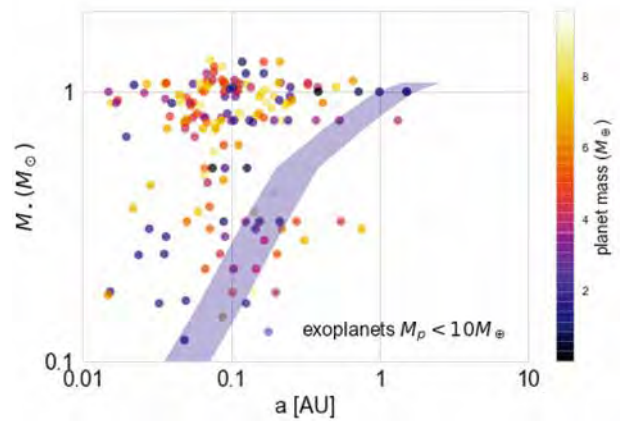


図3.1.2: 2019年時点で発見されている10地球質量以下の惑星の分布(軌道長半径 - 恒星質量)。青色の帯が、惑星表面に海洋が存在できる領域であるハビタブルゾーンを示している。ただし、この中に入っているからといって、必ずしも海洋があるとは限らない。
Credit: 『系外惑星探査』 p.22、図2.4 (一部改変)、東京大学出版会

される最大のマイルストーンは、生命の存在を示す「バイオマーカー」を系外惑星から検出することであろう。すばる望遠鏡及びTMTに搭載される様々な野心的な装置を経由し、系外惑星での生命探査という究極の目標へと向かうロードマップを図3.1.2に示す。すばる望遠鏡では近赤外線ドップラー装置(IRD)と超高コントラスト補償光学システム(SCEXAO)や高角分解能コロナグラフ撮像分光装置(CHARIS)がその中心的役割を果たす。これらをさらに発展させ、TMT時代の多天体回折限界近赤外高分散分光器(MODHIS)や惑星系撮像装置(PSI)、中間赤外線撮像分光装置(MICH)、またはトランジット分光用に可視光高分散分光装置(HROS)や近赤外線高分散分光器(NIRES)などの2030年代の各フラグシップ装置へとつながっていく。以下、具体的にそれぞれのキーとなるサイエンス・装置開発について述べる。

3.1.1.2 地球型惑星の詳細観測に向けた事前探査

2020-2030年代の系外惑星の研究はTMTがさらに推し進める。しかし、TMTの観測対象の探査を、TMT自身で行うことは現実的ではなく、TMTの主目的はフォローアップになるであろう。そこで、TMTでのフォローアップに適したサンプルを事前に選定することが必要になる。すばる望遠鏡は、空間分解能や暗い恒星に対しても十分な感度が得られるという点で、TMTに向けたサンプル選出のための探査において大きな利点がある。では、どのような観測や探査がすばる望遠鏡に求められるだろうか？それに対する答えの一つは「InfraRed Doppler (IRD)」計画である。IRDは、主に3200 Kより低温の晩期M型星を公転する惑星を赤外線の視線速度法によって探査するものであり、地球のような岩石惑星やハビタブル惑星の検出を主要な目的としている。M型星は、太陽系の近傍に最も多く存在する天体でありながら、可視光では暗く観測が難しかったが、近年地球型惑星探査の対象として重要

視されてきている。M型星は太陽型の恒星の数分の一以下の質量しかなく、太陽型星に比べて地球型惑星が存在する場合の視線速度信号が大きく出るため、惑星検出が可能である（現在の技術では、太陽型星まわりの地球質量惑星探査は非常に難しい）。また、液体の水が存在可能な恒星周囲の領域であるハビタブルゾーンは、中心星の温度が低くなれば中心星に近くなる。したがって、晩期M型星のハビタブルゾーンは他の主系列星に比べて中心星に近くなる。視線速度法は「公転周期が短いほど検出が容易になる」ため、ハビタブルゾーンが中心星に近いほど視線速度法でのハビタブル惑星の検出に有利になる。IRDは、M型星の中でもさらに質量の軽い晩期M型星を中心に、5年間で最終的に60星を視線速度法でモニターする予定であり、2019年に観測が開始された。

IRD計画によって、TMTでのフォローアップに適したサンプルが得られることが期待される一方、現状のIRD探査ではハビタブル惑星の検出数は数天体以下になるかもしれない。その数天体が「本当の意味でハビタブルであるかどうか」、もしくは「ハビタブル惑星として判断可能かどうか」は、中心星からの距離以外の惑星の様々な環境に依存する。例えば、フレアなどの中心星の活動の影響は無視できない。さらに、雲の存在は惑星の表面環境に影響を及ぼすことに加えて、大気中に存在する分子の吸収線の検出可能性にも関係する。したがって、より多くのハビタブル惑星の検出が望まれる。そのためには、IRDによる惑星探査の第二弾を行うことが有効であろう。しかし、IRDの現状の性能で、第二弾の探査を進めるのではなく、その性能を大幅に向上させたNeo-IRDを用いた観測が必須である。

すばる望遠鏡とその補償光学装置に期待される今後の改良と、IRD自体の性能向上によって、IRDの感度を少なくとも現状の5倍近く改良できる見込みがある。さらに、装置の温度環境のさらなる安定化や、ファイバー由来の雑音が存在しないシングルモードファイバーを利用することで、視線速度測定装置の安定性も改善される。これに

より、IRDの「探査効率」、「検出可能な惑星質量」、「ターゲットとして可能な主星の特性」に対して劇的な改善があるだろう。また、Neo-IRDへの改良は、IRDの現状の探査が終了する2023年以降になるが、その時期にはトランジット惑星サーベイ衛星 (TESS) や低温度星ハビタブル惑星トランジット探査 (SPECULOOS) などのトランジット法による惑星探査は完了しているだろう。したがって、それらの探査の結果から、すばる望遠鏡とNeo-IRDでのみ視線速度法による観測が可能なターゲットを事前に選定するのも容易になる。上記の状況を踏まえて、Neo-IRDにより期待される具体的なサイエンス課題をあげる。

(1) ハビタブル惑星の数を大幅に増加

探査効率、感度、精度の向上により、ハビタブル惑星の数の増加が期待できる。また、IRDの感度向上から、より暗い恒星の観測も可能になるため、主星のフレアや黒点などの活動性が低いターゲットをより選びやすくなる。これは、惑星の検出能力と、「ハビタブル」に対する惑星環境の両面で重要である。

(2) 暗い晩期M型星のトランジット惑星のフォローアップ

TESSやSPECULOOS計画などで、晩期M型星や褐色矮星の周囲でトランジット惑星が多く発見されると期待できる。その際に注意する必要があるのが、「距離が遠い天体ほど数が多いため、暗い天体の方がより多く存在する」ことである。したがって、検出限界との兼ね合いになるが、トランジット惑星は暗い恒星の周囲ほど検出される個数が高まる。例えば、TESS探査における晩期M型星における惑星検出のシミュレーション (Barday et al. 2018) では、Jバンドで11等もしくは12等よりも暗い恒星に対する検出が大半を占める。しかし、現状のIRDの性能ではJバンドで12等を超えると、数 ms^{-1} という地球型惑星検出に必要な測定精度を得るのが非常に難しい。この状況もNeo-IRDで克服されると期待できる。すばる望遠鏡とNeo-IRDは、TMTでは難しい長期間のサーベイ観測や、トランジット・ターゲットのフォローアップで大きな役割を果たすと期待される。

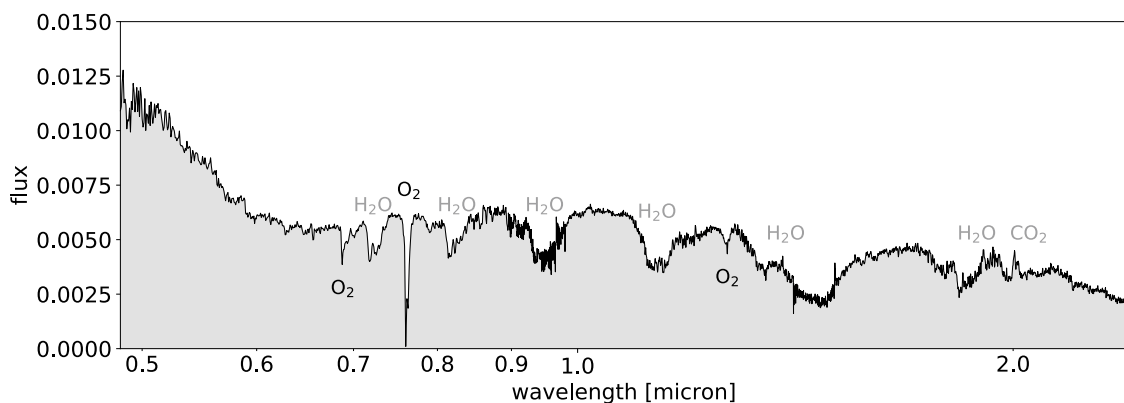


図3.1.3：地球照（すなわち月の暗黒面に反射した地球の反射光）スペクトル。上下に書かれた分子名が対応する分子の吸収線の位置である。青側でフラックスが上がる傾向にあるのは、地球大気によるレイリー散乱を示している。

Credit: 『系外惑星探査』p.45、図2.19 (Enric Pallé氏の提供による)、東京大学出版会

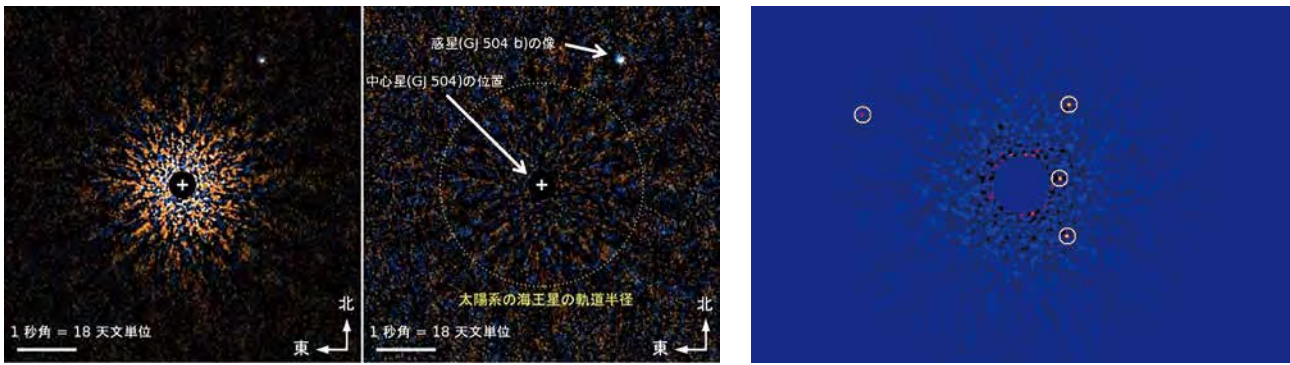


図3.1.4：(左) すばる望遠鏡により発見された系外惑星 GJ 504 b。(右) SCExAO により撮像された多重惑星系 HR 8799。
左図 Credit: Kuzuhara et al. 2013¹; NAOJ、右図 Credit: NAOJ¹

(3) Exo JASMINE 計画とのシナジー

宇宙科学研究所により2019年に公募型小型衛星計画3号機に選定され、2024年打ち上げを目指す赤外線位置天文観測衛星 小型ジャスミン (小型 JASMINE) 計画は、バルジの位置天文学衛星である。バルジを観測できない期間 (3年のうち1.5年) を、TESS などでは発見が難しい、晩期 M 型星まわりのハビタブルゾーンにある、より低質量なトランジット惑星の探査をおこなう Exo JASMINE が計画されている。Neo-IRD は、この Exo JASMINE 計画のフォローアップによる質量推定や事前のスクリーニングを通じて相補的な役割を果たすことができる。これにより透過分光で詳細観測可能な近傍のハビタブル惑星を発見できるかもしれない。

3.1.1.3 惑星大気探査の新たな地平

(1) 直接撮像装置のロードマップと大気検出：SCExAO から PSI 及び MICHIE

太陽系の惑星、地球のような環境、地球生命の存在といった我々の知る太陽系はどの程度、普遍的なのだろうか? この問いに答えるには、惑星の存在だけではなく、惑星そのものの性質を調べる「キャラクターゼーション」ができることが何よりも重要である。その中でも惑星大気の詳細観測は、惑星の環境、生命の存在に関する様々な知見を与えてくれる。惑星大気を検出する手法は、主にトランジット惑星を利用する方法と、直接撮像を行う二種類がある。前者は惑星がトランジットする幾何学的配置が必要であるが (大雑把に1%の確率)、後者は近傍の惑星系ならどれでも調べられる利点があり、将来的には直接撮像に主眼が置かれるようになることが予想される。

特に、ハビタブルゾーンでの地球型惑星の直接撮像・分光が一つのゴールである。図3.1.3は、地球の反射光が月の暗面に反射してくる地球照と呼ばれる光のスペクトルである。これは地球を系外惑星として直接撮像した反射光スペクトルとみなすことができる。この図からわかるように反射光スペクトルには水や酸素、二酸化炭素といっ

た地球を生命の星たらしめている主要な分子の吸収線が含まれている。ハビタブルゾーン内の地球型惑星の分光を行い、生命探査を行うことが直接撮像装置の究極の目標であると言える。

直接撮像装置はどのような開発段階を経て、このようなゴールへと向かうのだろうか? 現在のところ直接撮像が可能なのは、自己放射型惑星と呼ばれる若い高温の自ら光り輝いている惑星に限られている。すばる望遠鏡では Kuzuhara et al. (2013) により近赤外線高コントラスト撮像カメラ (HiCIAO) と AO188 で GJ 504 b の発見 (図3.1.4 左) がなされている。そして次世代型の直接撮像装置である SCExAO (Jovanovic et al. 2015) により、世界最高水準の直接撮像装置の開発が続いている (図3.1.4 右)。

SCExAO では、いくつかの次世代キーテクノロジーが試されている。直接撮像された惑星光を IRD へとシングルモードファイバーを通じて導く高分散コロナグラフ惑星大気詳細観測装置 (REACH) は、次世代惑星キャラクターゼーション技術の一つである。この手法は、高分散分光コロナグラフ (HDC) と呼ばれ、波長分解能100,000 という分子線一本一本を分解できる高波長分解能であることを利用して、分子吸収線のテンプレートとの相互相関を計算し、分子を直接検出するものである (Sparks and Ford 2002; Kawahara et al. 2014; Snellen et al. 2015; Mawet et al. 2017)。また惑星と恒星光の常時測光モニタリングにより、主要な雑音源である恒星光の漏れ込みを大幅に減らすことができる。光子一つ一つを検出可能な超高感度検出器である超電導共振器惑星観測カメラ (MEC) は、読み出しノイズを極限まで抑えることができるので、感度リミットで観測が困難であった惑星の検出が可能となる。これらは次に述べる TMT における直接撮像装置のキー技術になるだけでなく、すばる望遠鏡の SCExAO を用いた大規模な直接撮像サーベイ観測により、新たな直接撮像惑星の検出、そして分子検出が可能になるだろう。

TMT においては、Planet System Imager (PSI) 計画、

¹ “Direct Imaging of a Cold Jovian Exoplanet in Orbit around the Sun-like Star GJ 504” © AAS. Reproduced with permission.

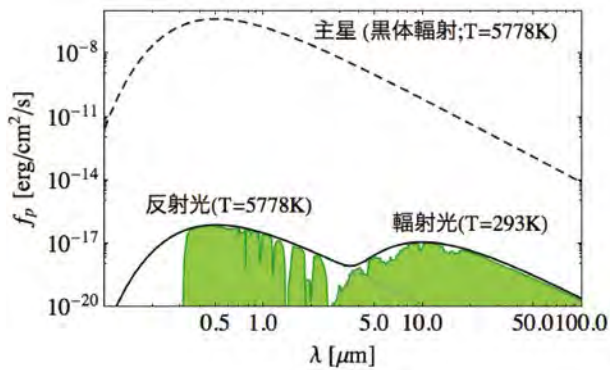


図3.1.5：地球から宇宙に放たれる電磁波の理論スペクトル。主に主星の反射光（4 μm 以下）と地球の熱輻射光（4 μm 以上）に分けられる。
Credit: 『系外惑星探査』 p.100、図4.22、東京大学出版会

およびMICHI計画による直接撮像が検討されている。惑星からの電磁波は、波長により主星の反射光と惑星の熱輻射光に分けられる（図3.1.5）。PSIは約3 μm より長波長側のPSI-redと短波長側のPSI-blueに分けられる。PSI-blueは主に惑星の反射光を狙う野心的な計画である。PSI-blueで8桁のコントラストを20ミリ秒角で達成できれば、近傍の低温型星まわりのハビタブルゾーンで地球サイズの惑星の検出とキャラクタリゼーションが可能になる（例：Kasper et al. 2010; Kawahara et al. 2012; Guyon et al. 2018）。特にバイオマーカーとしては酸素分子の検出が可能になるという点が重要である。酸素は代謝において光合成と水を用いる場合に必然的に発生する分子であり（代謝バイオマーカー）、なおかつ他の分子と反応し消失しやすいので、多量の酸素が惑星にみつかるということは、定常的大規模な光合成活動が行われていることを示唆する（図3.1.6）。吸収線としては酸素1.27 μm 線が有望である。

PSIでは、すばる望遠鏡におけるREACHのように、高分散分光コロナグラフ観測をおこなう。第一期装置のMODHISはファイバー型高分散分光器であり、PSI-blueの高分散分光コロナグラフ装置のプロトタイプとなる。これにより、地球と系外惑星のドップラー偏移差を利用して、水蒸気の検出が可能となるだろう（図3.1.7）。また近赤外線撮像分光装置（IRIS）を用いることで、高分散分光コロナグラフ観測に近い観測を焦点面全体で行うことが可能である（Hoeijmakers et al. 2018）。これもPSIの面分光装置のプロトタイプとなる。

PSI-redやMICHIが狙う3 μm 付近は、ハビタブルゾーン内の惑星によって反射された主星の光（反射光）を観測することになる。この場合、主星との距離が近く反射光で明るく見えるM型星周りの地球型惑星を狙うこととなるだろう。PSI-blueと同様に高分散分光コロナグラフが有用である（Snellen et al. 2015）。

一方、MICHI、PSI-redの帯域である10 μm 帯では、eps Eriやtau Cetiのような極近傍（<3-4パーセク）の2、

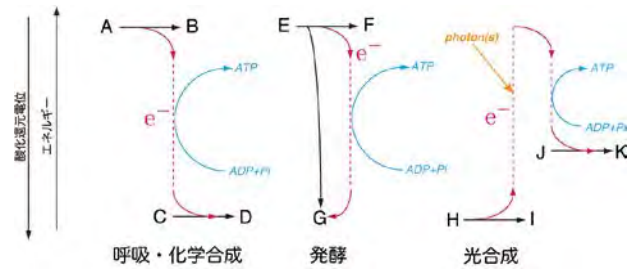


図3.1.6：地球生命の代謝の分類(河原2018)。酸素は、光合成において、電子供与体（H）に水を用いた場合に、必然的に発生する（I）分子が酸素である。
Credit: 『系外惑星探査』 p.31、図2.9、東京大学出版会

3個の太陽型まわりのハビタブルゾーン内地球型惑星の熱放射をNバンドで狙うことができるかもしれない（図3.1.8; Brandl et al. 2014; Quantz et al. 2015）。Nバンドにおいてはオゾン9.6 μm が酸素と同様に代謝バイオマーカーとなりうる。オゾンはやはり不安定であり、酸素が豊富にある大気でないとは持続的に生成しえないからである。熱輻射の場合、地球と太陽のコントラストは波長10 μm で7桁程度であり、eps Eriやtau Cetiのまわりでは恒星から300ミリ秒角程度の位置にある。これらのコントラストを達成する補償光学とコロナグラフの開発、ならびに大気や望遠鏡由来の熱輻射光をいかにポストプロセスで除去できるかが重要なポイントとなる。TMT時代までにすばる望遠鏡やTAO望遠鏡（TAO）の中間赤外観測装置（MIMIZUKU）で技術的な問題を解決することが重要である。

(2) HROS、NIRE、MODHIS、WFOSによる

トランジット惑星大気検出

トランジットを起こす惑星では、惑星の大気を透過してくる主星光成分を分光する「透過分光法」により惑星の大気成分を検出可能である。この方法は既に技術的に確立されており、これまでに8m級の地上望遠鏡やハッブル宇宙望遠鏡を用いて海王星サイズ（地球の4倍）以上のガス惑星の大気中に水や一酸化炭素、ヘリウムなどの成分が検出されている（e.g., Wakeford et al. 2017; Mansfield et al. 2018）。一方、観測される大気のシグナルは惑星半径の2乗に比例するため、この手法を地球型惑星に拡張する場合、海王星サイズの惑星に比べて2桁以上多くの光子を集める必要がある。さらに、地球と同じ大気をもつ惑星を想定した場合、ガス惑星に比べて大気の広がり（スケールハイト）が小さいためシグナルがさらに弱まることに加え、地上観測では地球自体の大気が系外惑星大気のシグナルを吸収してしまう。それでも、波長分解能が10万以上（理想的には30万）の高分散分光器（TMTの場合、可視光領域ではHROS、近赤外線領域ではNIREやMODHIS）を用いれば、対象の惑星系と地球の視線速度差を利用して惑星大気による吸収と地球大気による吸収

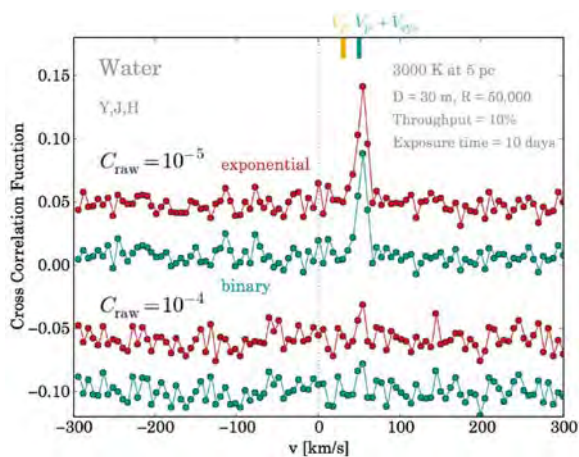


図3.1.7：M型星まわりの地球型惑星大気中の水蒸気検出シミュレーション結果 (Kawahara & Hirano 2017)

を分離することが可能になる。さらに、TMTの高い集光力をもってトランジット観測を30-50回繰り返すことで、地球型惑星の大気中に酸素分子 (O_2) を検出することが可能である (Snellen et al. 2013; Rodler and Lopez-Morales 2014)。また、その成果が人類にもたらすインパクトを考えると、検出に必要な観測時間 (数十～数百時間) も妥当と言える。

一方、ケプラー宇宙望遠鏡などの観測により、地球よりやや大きなサイズの「スーパーアース」が銀河系に豊富に存在することが明らかとなった。スーパーアースは原始惑星系円盤から1次的に獲得した水素やヘリウムの一部を散逸せず保持している可能性があり、そのような水素を主体とする大気下では、(もし存在すれば) 生命の代謝機構は地球上のそれと全く異なるはずである。スーパーアースはそのような「生命」の多様性を探る上で興味深いだけでなく、水素主体の大気は地球の大気に比べてスケールハイトが1桁大きくなるため、惑星自体が大きいことと併せて、観測が容易になる利点がある (Seager et al. 2013)。TMTでは可視大視野多天体分光装置 (WFOS) を用いて可視光域における惑星大気のレイリー散乱の効果を観測することで大気のスケールハイトを測定でき、さらにハビタビリティに影響を与えるエアロゾル (ヘイズ) の有無を調べることができる。また、MODHISやNIREsを用いた近赤外線高分散分光観測から、一次大気の証拠となる大気上層のヘリウムや、水素大気下で有望なバイオマーカー (ジメチルスルフィドやアンモニア) の検出が期待される (Seager et al. 2013)。

透過分光によるバイオマーカー探索が可能な太陽系近傍のハビタブルゾーン・トランジットアースやスーパーアースは、現時点でまだ数えるほどしか発見されておらず、その発見数の増加が喫緊の課題である。2018年に打ち上げられたTESSや2020年代中盤に打ち上げ予定の惑星トランジット・星震観測衛星 (PLATO) によってそのような惑星候補が数多く発見されると見込まれ、それらの

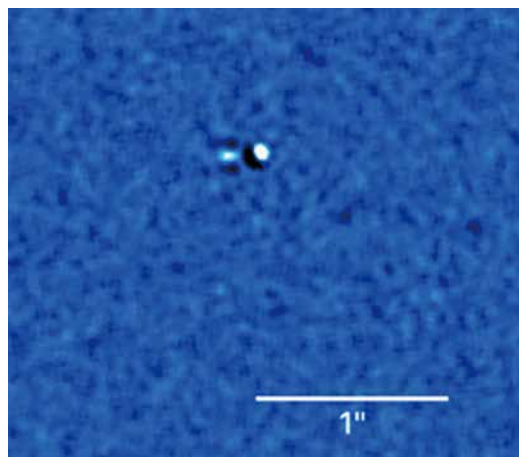


図3.1.8：MICHUによる波長 $10\mu\text{m}$ 帯でのtau Cetiまわりの惑星検出シミュレーション。中心星から0.54天文単位の位置にある1.3地球半径の惑星が見える。Courtesy of C. Marois

候補の発見確認や質量決定においてすばる望遠鏡の活躍が期待される。特に、視線速度法を用いた晩期M型星まわりの惑星の質量決定はIRD以外の装置では難しく、同装置が重要な役割を果たすと期待される。TMTでのキャラクタリゼーションを始める前のすばる望遠鏡での事前観測が、必要不可欠である。

3.1.1.4 太陽系外惑星検出の未開拓領域と惑星形成論

太陽系外惑星の発見は、これまで太陽系に基づいて構築されていた惑星形成論を土台から揺るがしつづけている。すばる望遠鏡やTMTの観測により、系外惑星の開拓領域を様々なパラメータスペース (周期、サイズ、年齢) へ拡大し、普遍的な惑星形成論を再構築するための材料を提供していくことができる。これにより我々の太陽系が普遍的な存在なのかという問いに答えることができる。

図3.1.9左には、これまで発見された系外惑星の質量と軌道長半径を発見手法ごとにプロットしている。同時に太陽系内惑星 (Me, V, E, Ma, J, S, U, N) の位置もプロットしている。これを見ると、系外惑星の開拓領域は太陽系内惑星に到達しつつあると言ってもよい。今後の視線速度サーベイの継続や、後述する2025年頃打ち上げ予定のNASAの広視野赤外線サーベイ望遠鏡 (WFIRST) による重力マイクロレンズサーベイにより、系外惑星の検出限界はさらに低質量側へと伸びていくだろう。一方、惑星がどのような惑星であるのか、例えば、惑星の密度や組成などを知るためには質量だけでは不十分である。図3.1.9右は、惑星半径を知ることのできるトランジット法と直接撮像法の惑星を、惑星半径と軌道長半径についてプロットしたものである。直接撮像惑星が、現在のところは非常に若い惑星に限られていることを鑑みると、太陽系内惑星の領域には、地球型、ガス型、氷型惑星ともに、ほぼ到達していないと言っても良い。これは太陽系外惑星の未開拓領域の一例である。また、惑星の進化方向 (=年齢)

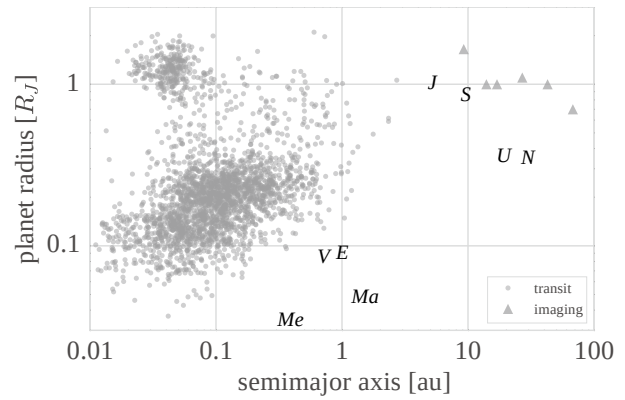
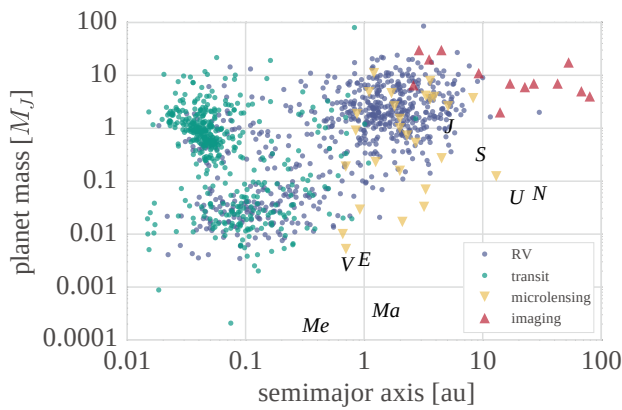


図3.1.9：(左) 軌道長半径と惑星質量平面における系外惑星の分布。各シンボルの違いは発見方法を示している。アルファベットの惑星は太陽系内の惑星。(右) 軌道長半径と惑星半径平面における系外惑星の分布。

Credit: 『系外惑星探査』 p.11、図1.7; p.12、図1.8、東京大学出版会

や特定の質量の恒星のまわりの惑星といった領域の多くが未開拓である。普遍的な惑星形成論の構築には、2020年代以降、このような未開拓領域をすばる望遠鏡やTMTを用いていかに切り開いていくかが問われている。

(1) 雪線近傍の系外惑星探査と惑星形成論

ホット・ジュピターの発見からはじまった太陽系外惑星の観測的研究は、当初こそ周期1ヶ月以内の短周期惑星が主なターゲットであったが、同研究分野の成熟に伴い、より長周期の惑星へと重心が移ってきたといえる。特に、25年にわたる視線速度サーベイ、ケプラー宇宙望遠鏡による4年間の継続観測、また軌道長半径数天文単位に感度の高いマイクロレンズサーベイにより、周期数年から数十年の領域の惑星探査が始まりつつある。特に、惑星形成時に水の昇華点に対応する温度の位置である雪線付近、すなわち周期数年付近の惑星頻度は、惑星形成論では地球型惑星と巨大ガス惑星の形成境界として極めて重要である(図3.1.10)。ケプラー宇宙望遠鏡の結果からは雪線付近に木星サイズの惑星のみならず海王星サイズの惑星が多く存在することがわかる(例: Kawahara and Masuda 2019)。これは重力マイクロレンズサーベイによりM、K型のまわりでも海王星質量の惑星が多く存在している結果とも整合する(Suzuki et al. 2016; Fukui et al. 2019)。このような雪線領域の惑星がどのような組成でできているか調べることで惑星形成論にインパクトのある観測結果をもたらすことができるだろう。雪線以遠の惑星の解明のために、すばる望遠鏡とTMTで挑む具体的な方策を以下に示す。

Neo-IRDによる雪線以遠の惑星探査

高温の恒星と比較して雪線が惑星系の内側に存在する晩期M型星は、雪線を越えた惑星の探査に適している。IRDによるすばる望遠鏡大規模サーベイ観測の目的の一つとして、「雪線以遠に存在する惑星の特性を調べる」ことが掲げられている。新たに提案するNeo-IRDによる探査では、現在進行中のサーベイ観測ターゲットも含めることで、より長周期の惑星の観測も可能になる(図3.1.10)

参照)。これにより、雪線以遠の惑星の網羅的探査に大きく近づく。雪線付近の惑星の探査は重力マイクロレンズ法が得意としているが、Neo-IRD探査は、現状の重力マイクロレンズ法では困難な領域も射程に収め、将来のWFIRSTによる重力マイクロレンズ探査への重要な比較対象を得る。

直接撮像による雪線付近惑星の詳細観測

先に述べたようにSCEXAOは世界最高水準の直接撮像装置であり、現在も国際的な協力の下、活発に開発が行われている。SCEXAOを用いたすばる望遠鏡での戦略的な直接撮像の長期間惑星探査は、TMT完成までの間に、さらに太陽系外惑星の未開拓領域を攻めていくことができる。しかし、SCEXAOを含む最先端の直接撮像装置による観測の内側限界は典型的に約10天文単位が妥当である(参考: Nielsen et al. 2019)。恒星の温度にも依存するが雪線は10天文単位よりも内側にあるため、現在の直接撮像観測は雪線付近の惑星に対しては未だ不十分である。今後の技術的発展により、内側限界を100ミリ秒角まで縮めることができれば、地球から30パーセク以内の恒星に対して雪線付近の惑星に迫ることが可能になる。すばる望遠鏡のSCEXAOは今後の改良が計画されており、その

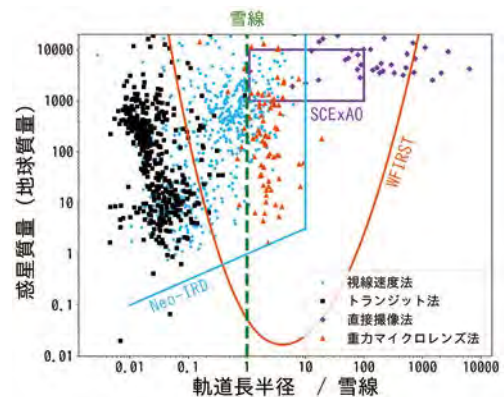


図3.1.10: これまでに発見された系外惑星の質量と軌道(雪線で規格化)の分布。色の違いは発見手法の違いを表す。水色、紫、赤はそれぞれ2020年代におけるNeo-IRD、SCEXAO、WFIRSTの感度領域を示す。緑の破線は雪線の位置。

データ提供: exoplanet.eu

技術的發展に基づいた大規模な直接撮像観測は、雪線付近の惑星の検出を促進し、惑星形成論にとって極めて重要な場所での情報を得ることに大きく貢献する。

さらに、惑星大気のキャラクタリゼーションは、惑星の形成と進化に対する情報をさらに引き出すことに有用である。例えば、惑星大気の炭素 (C) と酸素 (O) の比は「惑星の形成場所と雪線の関係」に大きく関係する。したがって、C/O 比の測定は惑星の形成や軌道進化の過程に対する重要な制限になる (参考: Konopacky et al. 2013)。しかし、惑星大気の観測には分光観測が不可欠であるが、すばる望遠鏡により直接撮像された惑星は、同望遠鏡による分光観測には暗すぎる可能性が懸念される。したがって、詳細な分光観測には TMT が適している。このように、すばる望遠鏡で撮像 (測光) し、TMT で分光フォローアップするという点でも、両者の連携が不可欠である。

マイクロレンズ探査フォローアップによる雪線付近の惑星探査

重力マイクロレンズ法は、惑星系の重力が及ぼす重力レンズ効果により背景の恒星 (光源星) の明るさが増光される現象を捉えることで惑星を検出する手法である。この手法は他の手法で発見が難しい数天文単位程度の軌道の惑星に最も感度が高く、ガス惑星の誕生の現場である雪線以遠の領域において地球質量以下の軽い惑星も発見可能というユニークな特徴をもつ。そのため、この手法による惑星探索は惑星形成過程を解明する上で重要な鍵になる。一方、現状の地上望遠鏡を使った探索では発見可能な惑星の個数に限界があり (年間 5-10 個)、統計的議論を行うために必要なサンプルは不十分である。また、多くのイベントにおいて惑星系までの距離と質量に縮退が生じるため、惑星の質量と軌道分布に大きな不定性が残っている。さらに、発見される惑星系の大半は銀河中心方向に位置し、遠方かつ星が過密であるため主星の分光観測が既存の望遠鏡では難しい。視線速度法やトランジット法で発見された短周期惑星では惑星の質量と主星の金属量に相関があることが知られており、惑星形成モデルへの強い制約となっているが、同様の研究が重力マイクロレンズ惑星では現状で不可能である。これらの問題を解決し、雪線周辺およびそれ以遠の惑星の分布や性質をあぶり出すことが 2020 年代以降の系外惑星研究における重要な課題の一つである。

WFIRST は、銀河中心方向を集中的にサーベイすることで月質量の 2 倍の惑星を含む数千個の惑星系を重力マイクロレンズ法で発見し (Spergel et al. 2015)、上述したサンプル数の問題を一気に解決する。また、WFIRST はその高い空間分解能および測光精度により半数以上のイベントにおいて高次の重力マイクロレンズ効果を検出し、単独で惑星系の距離と質量を制約できる。しかし、残り半分のイベントについては惑星系の距離と質量が一意に求

まらないため、相補的な手法での質量決定が不可欠である。すばる望遠鏡は 2025 年以降に 100 夜に渡る WFIRST とのシナジー観測を実施するという提案があり、その一部で超広視野主焦点カメラ (HSC) もしくは広視野高解像赤外線観測装置 (ULTIMATE) を使って WFIRST との同時観測を実施する。これにより、地上と衛星との視差効果により惑星系の質量を制約できるため、WFIRST の欠点を補完できる。また、主星に束縛されていない浮遊惑星の発見・質量決定への寄与も期待される。

TMT では、WFIRST とすばる望遠鏡の重力マイクロレンズ探索で発見される多様な惑星系の主星の特徴づけ (金属量や年齢の測定) が可能になる。惑星系と光源星の相対固有運動は典型的に年間数ミリ秒角であり、両者を既存の望遠鏡で空間分離するためにはイベント発生後十〜数十年待つ必要があるが、TMT を使えば数年で分離可能である。さらに、高い集光力により遠方の惑星系を含めて網羅的な分光観測が可能である。これにより、視線速度法やトランジット法とあわせて軌道長半径が〜10 天文単位以内の領域における惑星の分布を主星の性質ごとに導出可能になり、惑星形成過程の理解が一気に進むと期待される。

3.1.1.5 様々な星の周りの惑星と惑星の進化

(1) 褐色矮星や晩期 M 型星まわりの様々な惑星系

質量が地球よりも軽い惑星 (sub-Earth) は惑星形成論 (例: Raymond et al. 2007; Alibert & Benz 2017) のもとでは、低質量星の周囲で普遍的に形成されると期待される。したがって、その探査は惑星形成論の観点からも意義がある。また、コンパクト複数惑星系は惑星系の形成や進化 (例えば、共鳴などの力学的進化) を議論するために重要である。実際に、TRAPPIST-1 (Gillon et al. 2016, 2017) は 7 つの地球型惑星をもつ複数惑星系として発見されたが、非常に多くの論文の出版に繋がり注目されている。

最後に、褐色矮星の惑星の存在も無視できない。褐色矮星の惑星は「異端」と思われるかもしれない。しかし、褐色矮星には小さい円盤が付随することが示唆されており (例: 理論的には Bate 2018、観測的には Testi et al. 2016)、褐色矮星の惑星は「最少の材料物質のもとでどのような惑星が形成されるか」という惑星形成論の問題への答えの一つになるであろう。以上のようなエキサイティングな惑星を視線速度法で発見するためには、精度の高い測定点を得るための高感度の観測が重要になる。また、複数惑星系においてはデータ「数」も鍵になる。これらの条件を満たすための最適解は、すばる望遠鏡と Neo-IRD による長期・高感度モニターに他ならない。さらに、これらの惑星系に対しても、すばる望遠鏡で発見し TMT でフォローアップすることで、さらなる知見が得られるだろう。

(2) 巨星周りの惑星と惑星進化

約 50 億年後、太陽は中心で水素の核融合反応が終わる

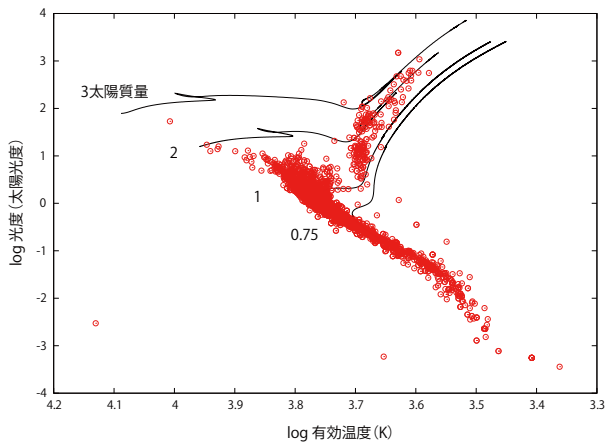


図3.1.11：これまでに見つかった系外惑星の主星の分布。有効温度と半径が分かっているもののみを示している。実線は異なる質量の恒星の進化経路 (PARSEC STELLAR EVOLUTION CODE)。
Courtesy of NASA/JPL-Caltech

と外層が膨張し巨星へと進化する。このとき、地球は膨張した太陽に飲み込まれるのか、それとも生き残れるのかということは、地球の将来という観点から一般的に関心が高い。また、太陽系に限らず、惑星系の一生を理解するためには、惑星系の形成だけでなく進化も明らかにすることが欠かせない。

中心星の進化に伴う惑星系の進化としては、中心星の膨張に伴う潮汐力の増大による惑星軌道の縮小、質量放出による中心星質量の減少による惑星軌道の拡大、中心星光度の増大に伴う惑星大気の損失などが挙げられる。これらは恒星の内部構造や進化理論に基づいてある程度予想はされているが、不定性が大きくほとんど研究が進んでいない。一方、これまで主に視線速度法によって巨星の周りで約100個の惑星が発見されており(図3.1.11)、巨星の周りでは中心星近傍に惑星がほとんど存在しない等の特徴が明らかになっている。しかし、中心星の質量や進化段階の正確な推定は一般的に困難で不定性が大きいので、惑星系の進化については定性的な議論に留まっているのが現状である。

このような状況を打破するためには、中心星の質量や進化段階がよく決まっている巨星の周りで惑星を見つけることが必要である。そのために最も適しているサンプルはケプラー宇宙望遠鏡によって観測された巨星である(e.g. Mosser et al. 2012)。これらの巨星はケプラー宇宙望遠鏡の長期間に渡る超高精度測光観測に基づいた星震学によって質量と内部構造が分かっており、進化段階も特定されているため、ある質量の恒星の進化に伴ってその周りの惑星系がどのように進化するのかを調べる上では最適である。

ケプラー宇宙望遠鏡で観測された巨星は典型的には可視光で12-13等程度より暗い。この明るさの巨星に対して視線速度法で巨大惑星の検出が可能な数 ms^{-1} 程度の測定

精度を達成するためには、8-10m級の望遠鏡と高分散分光器(HDS)のような可視光高分散分光器が必要である。さらに、より低質量の惑星の検出まで可能な 1ms^{-1} 以下の測定精度を目指すには、30m級の望遠鏡が必要となる。

3.1.2

太陽系で探る惑星系形成とハビタビリティ

我々人類が宇宙における生命を考え、生命誕生の場や複雑な生命圏を構築/維持する条件を探る基準となるのは地球である。地球型生命が発生しうる場所は、液体の水と有機物質の共存が可能な惑星や衛星である。そうした天体の詳細なデータは、この太陽系でのみ取得可能である。その意味で太陽系の起源と進化は、全宇宙における生命存在可能環境(ハビタビリティ)研究の起点である。

また、太陽系外の原始惑星系円盤内で現在進行中と思われる微惑星形成や原始惑星形成過程や完成した様々な様相の系外惑星系の形成・進化モデルが構築中であるが、そのモデルには一つの詳細な事例である太陽系の形成・進化も説明できなければならない。太陽系の惑星形成過程はまだ研究途上にあるが、系外惑星でよく見られる主星の近傍にある巨大惑星は、太陽系で提案されている巨大惑星移動モデルに合うかもしれない。惑星系の形成を歴史を追って詳細に検証する場として、太陽系は実に重要な研究対象である(現在の太陽系の惑星と小天体の分布を図3.1.12に示す)。

3.1.2.1 生命誕生の現場である惑星系の形成と進化 ～惑星形成過程を探る～

惑星の形成進化はまだ研究の途上にある。最初の系統的な説明の一つは「京都モデル」である。そこでは太陽系を生むもとになった原始太陽系星雲内のダストから形成された微惑星が衝突合体し、水が氷として存在できる領域と存在できない領域の境界である雪線より太陽に近い領域で岩石惑星が、遠い領域で巨大惑星が形成されたとした。しかしこのモデルにはいくつかの問題点があった。例えばダストから微惑星に至る明瞭な説明がないこと、天王星と海王星を現在の軌道で形成するには集積に時間がかかりすぎることなどである。後者に対しては、巨大惑星は現在の軌道より少し内側により狭い軌道間隔で形成され、巨大惑星同士や周辺小天体群との重力相互作用による移動を経て、現在の位置に到達したという説が提案された(例えばニースモデル等)。この巨大惑星移動仮説では、巨大惑星周辺からその外側領域に存在していた小天体は動径方向に広い範囲でかき混ぜられたと考えられる。この場合、現在のオールト雲²由来の長周期彗星、カイパーベルト³由来の短

2 太陽系を取り囲む大きさ1万から10万天文単位の球殻状の微惑星の分布。
3 海王星軌道(30天文単位)から55天文単位までの間に分布する天体

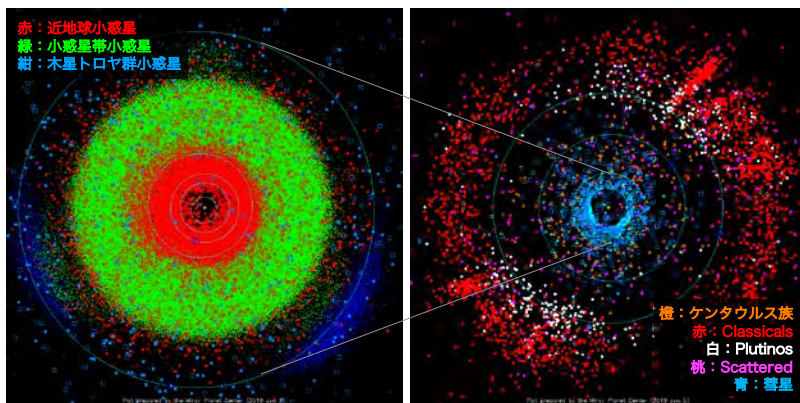


図3.1.12：太陽系内の小天体の分布。左は木星軌道より内側を、右は木星軌道より外側からカイパーベルトより内側を詳細に示している。これらの天体の外側にDetachedと呼ばれる海王星軌道のはるか外側に比較的離心率の大きい軌道を持つ天体群がいる。さらに外側にはオ尔特雲天体が球殻状に約10万天文単位まで分布すると考えられている。Classicalsの経度分布に偏りが見えるのは集中したサーベイが行われた場所に優先的に天体が発見されたからである。太陽系外縁部は大望遠鏡によるサーベイ観測が進めば、さらに多くの天体が見つかるはずである。
Credit: Minor Planet Center

周期彗星、巨大惑星の不規則衛星⁴、巨大惑星のトロヤ群⁵ 天体らは全て形成領域を同じくし、形成場所を反映する物質組成に大きな差はない、ということを示唆する。

小天体の動径方向の混合が起こったという観測的証拠がいくつかある。一つの証拠は小惑星帯には物質組成の違いを反映した異なる分光型をもつ小惑星が入り混じっていることである (DeMeo & Carry 2013, 2014)。小天体の形成場所を探る常套手段は天体のカラー・スペクトルを調べることである。隕石の反射スペクトルとの比較により、小天体のカラー・スペクトルと物質組成の大まかな対応付けはできている。小惑星はその対応付けに基づいてS型、C型等、いくつかの分光型に分類されているが、現在の小惑星帯では動径方向に様々な分光型が入り混じっており、上述の巨大惑星移動による小天体のかき混ぜ仮説を支持している。もう一つの証拠は各小天体グループ別のサイズ頻度分布である。サイズ頻度分布は形成場所での微惑星の衝突合体とその後の衝突進化を反映し、形成場所ごとに固有のサイズ頻度分布が形成される。上述のニースモデルは巨大惑星の移動過程で海王星より外の氷小天体群が大量に内部の惑星領域に流入したと予想する。現在の太陽系で小惑星帯、ヒルダ群⁶、木星トロヤ群のサイズ頻度分布を調べると、小惑星帯の内側、中央、外側、ヒルダ群、トロヤ群と外側に行くにつれ、サイズ頻度分布が冥王星のクレーターのサイズ頻度分布から推定される太陽系外縁天体のサイズ頻度分布に近づく様子が見られた (Yoshida et al. 2019)。このことから Yoshida et al. (2019) は惑星移動の際に天王星・海王星に重力散乱された巨大惑星領域の小天体が内側に散乱され、木星トロヤ群やヒルダ群を形成し、すでに形成されていた小惑星帯の中央あたりまで流入したのではないかと推測した。これらの状況証拠から、巨大惑星移動による小天体のかき混ぜはおそらく起こったに違いない。問題はのかき混ぜが外縁部のどこまで及んだのか?どのくらいの量の天体が内部太陽系に流入したのか?ということである。生命の発

生維持環境における必須条件としての「水」の地球への供給に関して、氷を多く含んだ太陽系外縁天体の貢献度ははかる上でもこの問題は非常に重要である。

(1) メタノール氷を指標に、太陽系外縁天体領域への惑星移動の影響と現在の外縁天体の軌道進化を探る

惑星移動によって引き起こされた小天体の大規模力学進化を解明する手段の一つとして、太陽系外縁天体の表層の希少氷分子を指標にする方法が考えられる。太陽系外縁天体には可視光波長で太陽光よりも顕著に赤いカラーを示すものがあり (例えば Doressoundiram et al. 2008)、それらは軌道長半径約37-48天文単位、近日点距離約37天文単位以上、かつ低軌道傾斜角 (約5度未満) という軌道特性を持つ「cold classical」と呼ばれる力学分類グループに多く見られる。このグループの天体は海王星 (軌道長半径30.1天文単位) からの摂動をあまり受けず、長期間安定な軌道であるため、形成当初から太陽系外縁に存在していると考えられる。太陽系外縁天体表層の赤化は有機物など高揮発性の氷分子種が太陽風や宇宙線の被曝で変成することが原因だと指摘されており、これまでずっと低温環境にあったcold classical天体の表層ではそれらの物質が昇華することなく保持され、赤化が進行したと説明できる (Brown et al. 2011)。一方、より内側で形成され、惑星の摂動によって太陽系外縁に運ばれた天体は表層の高揮発性分子を失っており、赤化はしないと推定される。

赤化の原因となった分子種はまだ特定されていないが、有力候補はメタノール (CH_3OH) である。実際、 CH_3OH 氷はPholus (Cruikshank et al. 1998) や2002 VE₉₅ (Barucci et al. 2006) などいくつかの赤い天体で検出されている。さらに、NASAの探査機ニューホライズンズによるcold classical 天体2014 MU₆₉の分光観測でも CH_3OH 氷のものと思われる吸収帯が捉えられた (Stern et al. 2019)。また、地上でのイオン照射実験で CH_3OH 氷の可視光反射スペクトルが赤化することが確認されている (Brunetto et al. 2006)。

4 軌道長半径や離心率・軌道傾斜角が大きい、または惑星の自転と逆に公転するなど特異な軌道を持つ衛星。

5 木星の軌道上の力学的に安定な平衡点 (ラグランジュ点) に集まっている小惑星群。

6 木星軌道の内側で、小惑星帯 (メインベルト) の外側部分にあって、木星と2:3の軌道共鳴状態にある小惑星。

CH₃OH氷の存在は2.27μm吸収帯で判別する。すばる望遠鏡のULTIMATEとTMTのIRISによる近赤外線分光観測では、Kバンドでそれぞれ約18等、19等の太陽系外縁天体を十分な精度で分光できる。低分散分光モード(R<1000)が利用できればさらに暗い天体の分光も可能だろう。Terai et al. (2016) が結晶質H₂O氷検出に用いた狭帯域フィルターによる観測手法をCH₃OH氷の2.27μm吸収帯に適用すれば、ULTIMATEでの狭帯域測光観測で候補天体を選別し、IRISで分光するという効率的な観測戦略を実現できる。これまで2.27μm吸収帯が検出された小天体は数個のみで、既存の望遠鏡・装置でこれらの数を大きく増やすことは難しいが、既知の太陽系外縁天体ではTMTで分光できる明るさの天体は約60個あり、これらに対してCH₃OH氷量の測定を行い、可視光カラーや軌道要素などとの関係性を統計的に調査することが初めて可能になる。これにより太陽系外縁天体の形成領域や力学進化に定量的な制限を与え、惑星移動の詳細な描像に迫ることができると期待される。さらにTMTのMODHISで観測すれば、大きな太陽系外縁天体や衛星に限られるが表面の組成分布の観測可能であろう(図3.1.13参照)。

CH₃OH氷の表層を持つ天体を探すことにはまた別の意義がある。それは外縁部から最近内側に落ちてきた天体を特定することである。木星軌道より外側でカイパーベルトより内側に分布しているケンタウルス族⁷のPholusは赤い天体でCH₃OH氷が検出されている(Cruikshank et al. 1998)。ケンタウルス族は巨大惑星との近接遭遇等の重力相互作用で軌道が変化するので力学寿命が短い。そのため表面にCH₃OH氷を持つPholusは最近になって低温の外縁領域から何らかの理由で落ちてきたと考えられる。長周期彗星もまた一時的に内側に落ちてきて、外側へもどっていく天体である。彗星は太陽に近づいて彗星活動が開始されないと発見されないため太陽系に存在する彗星の総量はまだ明らかになっていない。最近の研究で、木星や土星の重力散乱(いわゆる木星・土星バリア)により、外側から木星軌道より内側に入っていく天体はそれほどないことがわかった。これが意味するところは太陽から遠い所(木星軌道より外側)に近日点を持つ彗星が相当量存在する可能性があるということである(Fouchard et al. 2018)。CH₃OH氷を使えば、このような隠れ彗星を探すことができ、彗星の総質量の見積もりに繋がる情報が得られるはずである。

すばる望遠鏡のHSCによる多色測光観測で赤い太陽系外縁天体の軌道分布を調べ、TMTでそれら赤い天体の表面のCH₃OH氷の有無を確認する。CH₃OH氷表層を持つ天体はずっと低温環境にあり、巨大惑星移動によりかき混ぜられていない天体と考えられるので、これらの天体の軌

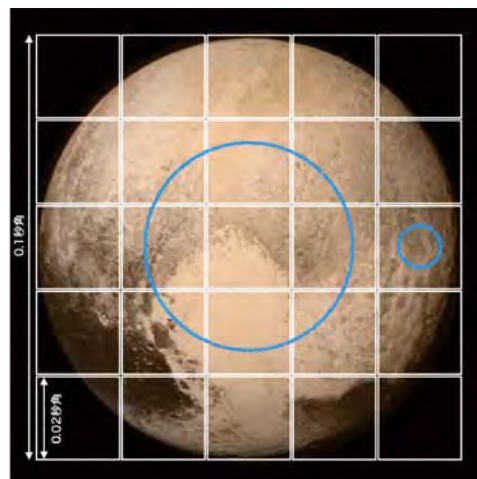


図3.1.13: TMTのMODHISで分光した時のスケール感。冥王星がすっぽり視野に収まる。土星の衛星エンセラダス(3.1.2.5参照)も同様の視直径を持つ。青線は太陽系外縁天体のEris(中央青丸)とその衛星Dysnomia(右の小さい青丸)の見かけの大きさ。大きな太陽系外縁天体とそれらの衛星の分光観測がMODHISで可能になる。木星の衛星エウロパはMODHISの視野の10倍。さらにローカルな表面情報が得られると期待できる。

Courtesy of NASA/APL/SwRI

道分布の内縁が巨大惑星移動による影響の最外縁に相当する。このような観測を行えば、前述した惑星移動の詳細解明へとつながり、さらに現在の太陽系における外縁天体の軌道進化の描像も明らかにできる。

3.1.2.2 惑星材料である微惑星の形成過程を探る ～系外惑星系円盤で起きている事～

微惑星形成過程についての定まったモデルはまだなく、現在次の3つ道筋が主に提案されている：(1) アグリゲイトの直接的な付着成長、(2) 何らかの不安定性に起因して発生したダスト濃集領域の自己重力収縮、(3) 微惑星同士の衝突・合体成長に低温域で形成された氷のペブル(小石状の塊)の集積が微惑星成長に加わる。ダストが微惑星へと成長する過程は太陽系ではもはや観測することができないが、微惑星の生き残りである小天体の内部構造や、小天体から放出されるダストサイズから洞察を得ることができる(脇田 他2019)。太陽系内で得られるこれらの情報は系外惑星系円盤の観測結果の解釈にも有用な情報を提供できる。

現在ダストを放出している小天体は彗星と活動小惑星⁸(例えばJewitt 2012; Jewitt et al. 2015)の二種類である。これらの二種類の天体を使って、雪線より外側での微惑星形成過程と雪線より内側(すなわち氷がない環境)での微惑星形成過程の情報を得ようとする2つの観測提案を以下に示す。

(1) 雪線以遠の微惑星集積過程を探る

彗星核はオールト雲やカイパーベルトといった太陽系外縁部で太陽系形成期以来長い期間に渡って保存され、宇

⁷ 木星の軌道の外側にあり、他の巨大惑星である土星、天王星、海王星のどれかと軌道交差する氷天体(小惑星)のグループ。

⁸ 典型的な小惑星の軌道を持つが彗星活動を示す天体

宙線等の被曝や微小天体の衝突によって表層のcmからmオーダーの厚みに変性を受けたことを除けば、極めて始原的な状態を保ってきたと考えられる。また、彗星核の形状や内部構造についても、太陽系外縁部では大規模な形状変化を伴うような天体衝突がほとんど期待できない以上、微惑星形成時の衝突合体過程を反映したものとなっていると期待される。しかし、彗星は供給源から太陽系内部へと至る軌道に進化した後には、太陽系年齢に比較すれば極めて短時間で消滅してしまう。現在、我々が観測する彗星は、こうした消滅に至る過程のスナップショットである。そのため、彗星という天体を手掛かりとして原始太陽系星雲の物理・化学に迫るためには、始原的な特徴と進化によって生じた特徴との分離が重要である。

近年、Pan-STARRS⁹のような大規模サーベイの実施により、より小型の彗星の発見が増えた。オールト雲から初めて太陽系内部へと侵入してきたと考えられる、軌道離心率が極めて1に近い彗星も、より多く発見されるようになってきた。こうした彗星は、表層を最初の太陽への接近で失い、ほぼ始原的な部分が露出する。また、彗星核の大局的な構造もほとんど変化を受けていない。このような天体は微惑星集積過程そのものを体現していると言って良い。こうした初回帰オールト雲起源彗星は必ずしも地球軌道付近まで接近するものばかりではないし、仮に比較的太陽に近づく軌道となっても彗星核のサイズによっては十分に明るくならず、8m級の望遠鏡では各種観測において十分なS/N比を達成できておらず、TMTにより初めて達成できる多くのサイエンスがある。具体的には以下等が挙げられる。(1) 太陽から十分遠い領域で彗星のような軌道(軌道離心率が大きく、高軌道傾斜角¹⁰)の天体を発見し、彗星活動が始まる前に可視光・中間赤外線における光度曲線から彗星核形状を推定し、原始太陽系星雲内における氷微惑星の合体成長過程を明らかにする上で重要な微惑星の形状・サイズ分布を推定する(すばる望遠鏡のHSCとTMTのMICHI)。(2) 各種同位体の存在比や主たる揮発性成分であるH₂O水が示す1.5 μ m付近の吸収バンドのプロファイルと結晶質H₂Oのみに見られる1.65 μ m吸収の強度測定し、H₂O氷のアモルファス/結晶質比を推定する。これから氷微惑星を形成した氷微粒子の形成環境およびその熱史を明らかにする(TMTのMICHIやIRIS)。(3) 難揮発性固体微粒子のシリケートの10 μ mバンド輝線に見られる結晶質シリケートに起因する複数のサブピークを手がかりとして、10 μ mバンド輝線プロファイルをフィッティングすることでアモルファス/結晶質比を得、原始太陽系星雲中の太陽近傍から氷微惑星形成領域への

物質輸送の指標を取得する(TMTのMICHI)。

また、カイパーベルトに起源を持つ短周期彗星の表面はかなり変性を受けてしまっていると予想されるが、突発的なバースト・崩壊現象を捉える事ができれば、十分に始原的な状態が保持されている内部探査の機会になる。カイパーベルト起源彗星とオールト雲起源彗星との物質組成の比較ができれば、3.1.2.1で述べた巨大惑星による小天体のかき混ぜがどの領域にまで及んだのか、それぞれの彗星供給源には、原始太陽系星雲のどの領域からどの程度の寄与があったのかなどの情報が得られると期待される。

(2) 雪線より内側の微惑星集積過程を探る

彗星や活動的小惑星の材料となる微粒子のサイズ頻度分布情報を正確に取得するために適切な天文観測手段は何か?これは回答の容易ならざる問いであるが、もしもアグリゲイトが単体粒子群(モノマー)から構成されるなら、その空隙率の測定はこうした情報ににじり寄る道の一つであり(Ito et al. 2018)、その有力な手段の一つが近赤外線波長領域での偏光観測である。これまで太陽系小天体の偏光観測では近赤外線波長領域での観測例は少なかったが(例えば、Kwon et al. 2017, 2018, 2019)、近赤外線波長領域での偏光観測には可視光領域に比べて大きな長所がある(Warren 2019)。彗星が放出するアグリゲイトは典型的に0.1 μ mサイズのモノマーで構成される(例えばKolokolova & Kimura 2010)。すると、可視光がこのようなアグリゲイト中を一波長進む際に出会えるモノマーはせいぜい1、2個であろう。アグリゲイトの空隙率はそこで散乱される電磁波の偏波状態に影響を与えるが、一波長内に出会うモノマーの数が少なければ、観測される偏光情報から空隙率を正確に推定することは難しい。近赤外線波長領域では可視光に比べて一波長内にずっと多くのモノマーと遭遇できる(Kolokolova & Kimura 2010)。よってモノマーの個数密度が高ければ(即ちアグリゲイトの空隙率が低ければ)、散乱の頻度は上がり観測される偏光度は低下し、逆にモノマーの個数密度が小さい、つまりアグリゲイトの空隙率が高ければ散乱の頻度は下がり、観測される偏光度は上昇するはずである。このようにしてアグリゲイトの空隙率情報を取得できたと仮定すると、その情報を元にして微惑星の形成過程に重要な制約を与えられる可能性がある(脇田 他2019)。これは以下の道筋による。一般に天体の表面を構成するモノマー(粒子)のサイズ頻度分布が典型的な冪乗則に従う場合、大きな粒子の隙間に小さな粒子が入り込むため空隙率は一般に低くなるだろう。逆にサイズ頻度分布が冪乗則では良く表現されず、特定サイズの天体が卓越する状況になると、空

9 5色(g, r, i, z, y)で1.8m望遠鏡を4台使ってハワイから観測できる領域をサーベイする。第一の目的は、地球に衝突する可能性のある近地球小惑星を発見することである。

10 カイパーベルト起源と考えられる低軌道傾斜角の彗星も存在するので、軌道だけでは彗星か否かを判断することはできないため、彗星活動のない天体を彗星と同定するには前節のようなメタノール氷の調査も必要である。ただし、オールト雲起源の彗星はあらゆる方向からやってくるため、高軌道傾斜角のものがほとんどと思って良い。

隙率は大きくなりがちであると思われる。微粒子の形状が不規則であれば空隙率はさらに大きくなり得る。ここで、最近取りざたされている微惑星の有力な形成モデルとしてのストリーミング不安定性の機構を思い出そう。このモデルは原始惑星系円盤内でのガスとダストの相互作用に起因する不安定性により、ダストの濃集領域が自己重力収縮を発生することで微惑星を作り上げると主張する。もしこのモデルが正しいならば、微惑星の構成粒子はその形成当初からサイズによる選別が行われていることになる。ガスとダストの相互作用は自ずと「濃集しやすい」サイズの粒子を選別するからである。太陽系の歴史に於いてこの過程が生じていれば、前述した理由により微惑星もしくはそれが現在まで生き残った天体である彗星や小惑星の表面では空隙率が大きくなりがちであろう。その反対に微惑星の形成過程がストリーミング不安定を経ない古典的なもの、すなわち固体微粒子の付着成長を繰り返した逐次成長といったものである場合、それにより形成される微惑星を構成する微粒子に特徴的なサイズというものとは存在しない。よって天体表面の空隙率は小さくなりがちであろう。そして、天体表面の微粒子の観測候補としてすぐに挙げられるのが活動的小惑星である。2019年7月現在、活動的小惑星の発見数は20数個であるが、この数はすばる望遠鏡のHSC、大型シノプティック・サーベイ望遠鏡(LSST)、Tomo-e Gozen等のサーベイで将来的に急増するであろう。一方で、軌道が既知な天体の偏光観測には広い視野は不要で、赤外線波長領域での高精度の偏光観測な観測には高いS/N比が要求されるから、こうした研究はTMTによる観測と惑星形成過程理論との直接的な結節点になり得る。

また、オールト雲彗星のダストを調べる機会としてESAのComet Interceptor計画(地球のL₂点¹¹に滞在し、オールト彗星を待ち構えて探査する)があるが、オールト雲彗星と活動的小惑星のアグリゲイトの空隙率を比較すれば、原始太陽系ダスト円盤内の動径方向にわたって物質や相対速度の異なる環境でアグリゲイトの形成過程の情報が得られるだろう。

3.1.2.3 小天体の内部構造と天体衝突進化過程

微惑星集積及び惑星形成は幾重もの天体衝突を経た結果である。天体衝突は天体の成長にも崩壊にも向かういわば両刃の剣である。小天体の中でも100kmを超えるような大きな天体は衝突破壊の時間スケールが太陽系年齢よりも長く(O'Brien & Greenberg 2005; Kobayashi et al.

2005)、それらは微惑星の形成過程の最終段階から生き残っている。一方それよりずっと小さい天体は大きな天体の衝突破壊の結果として形成されたと考えられている。衝突破壊の結果生成された衝突破片がどのくらいの割合で一枚岩の小惑星になるか、または破片が互いの重力で再度集積して形状を保つ「破片集積体」になるかはまだよくわかっていない。破片集積体ではYORP¹²効果により自転速度が上げられ、その後分裂してバイナリー小惑星となったり、小惑星ペア¹³へと発展する場合があります、小天体の衝突進化過程の全容理解には小天体の内部構造(空隙率)の情報は欠かせない。また、惑星形成過程は天体の衝突過程抜きには語れないことも鑑みれば、小天体上に生じる天体衝突過程を理解することが重要である。

(1) バイナリー小惑星から内部構造を探る

バイナリー小惑星の光度曲線の周期解析やAOを使った直接撮像でモニターすると、主星と衛星の大きさの比、主星と衛星を含んだ系の質量、主星と衛星間の距離が測定できる。これらから天体のバルク密度が算出できる。小天体グループ間でバルク密度の違いが見られれば、それは集積過程に関する特徴を反映したものといえよう。すばる望遠鏡による広視野サーベイで連星系の特徴を持つ(例えばコンタクトバイナリー¹⁴は点像分布関数(PSF)フィットした時に周囲の恒星より、小天体の移動方向に直角な成分が細長いと予想できる)候補天体を発見し、すばる望遠鏡の補償光学観測で確認、TMTで連星系の詳細を調べる。TMTのIRISを用いれば、空間分解した連星系各要素に対して分光観測を行ないその表面組成を調べることもでき、連星系の形成過程(表面組成が同じなら分裂、異なるなら捕獲)の情報も得ることも可能である。これらの情報は各小天体グループでの衝突進化の理解に重要である。TMTは毎秒1.5秒角の非恒星追尾(恒星の日周運動からずれた動きの追尾)が可能であるので、地球接近小惑星から太陽系外縁天体まで全ての天体群で連星系の詳細観測が可能である。

(2) 衝突実験との連携で小惑星の表面下を探る

探査機による衝突実験は、次のように既にいくつかの成功例がある。ディープ・インパクト(Deep Impact)によるTempel 1彗星への衝突(A' Hearn et al. 2005)、無人月探査機エルクロス(LCROSS)による月北極永久影への衝突(Schultz et al. 2010)、はやぶさ2によるC型小惑星Ryuguへの衝突(Arakawa et al. 2019)。またNASAのダート探査機とESAのヘラ探査機が連星地球接近小惑星(65803) Didymosの衛星Didymoonへ宇宙機を衝突させ、

11 質量を持つ3つの点が互いに運動する中で互いの重力で釣り合いが取れている安定な場所をラグランジュ点と言う。L₁、L₂、L₃、L₄、L₅の5つの点があり、太陽-地球系のL₂は地球を挟んで太陽と反対側にある。

12 不規則な形状の小惑星からの非一様な熱放射がジェットのような役割を果たして、小惑星の角速度を変化させ、小惑星の自転を加速または減速する効果。

13 バイナリー小惑星が崩壊して、軌道がよく似た2つの小惑星になったもの。

14 バイナリーの間隔が狭く、ほとんどくっついて互いに公転している小天体。

その軌道変更を試みる実験も計画されている (Cheng et al. 2018)。衝突探査は今後も頻繁に計画・実行されるだろう。

すばる望遠鏡の冷却中間赤外線分光撮像装置 (COMICS) は Deep Impact 計画で Tempel 1 彗星へ衝突機をぶつけた直後に彗星を撮像し、彗星核周りに広がっていく噴出流の様子を観測した (Sugita et al. 2005)。この観測で約 2 秒角にわたり広がった噴出流中の粒子のサイズ分布や、表面粒子の組成、放出された粒子の総質量などが推定された。同様の現象を TMT の IRIS の解像度で多色撮像すれば、天体表面の地下構造を反映した噴出流のローカルなムラも検出可能であり、また WFOS ではクレーターからの放出物と表層物質の組成の違いも検出可能であろう。さらに IRIS の解像度ならば、噴出流が収まった後、クレーター周辺を再度多色撮像し、クレーター内と外の色の違いから表面の物質組成を推定したり、クレーターからの放出物の到達距離も測定可能かもしれない。こうしたクレーター形成時の噴出流の観測によって、天体表面下の地質構造・構成物質を探ることが可能である。同時に、天体衝突の際に生じる現象の観測は、惑星形成論の構築にとって重要な素過程である衝突過程そのものの理解を促進するものである。

3.1.2.4 地球は守られているか？

～惑星表面環境と宇宙からの天体衝突を探る～

生命が存続するためには惑星表面が宇宙からの脅威から守られている必要がある。生命体に有害な紫外線や高エネルギー粒子、小天体衝突から天体表面を保護するために惑星大気は重要な役割を果たす。太陽系の惑星の多くは大気を持つ。準惑星や衛星にも大気を持つものがある。これらの天体の表層環境と生命環境を結びつけ、系外生命探査に応用する時代がきた。

(1) 惑星大気から惑星表層環境を探る

生命が存在可能な系外惑星の指標として、温度・圧力など物理パラメータ、大気や液体海、気象条件、化学組成等が挙げられる。大気や液体海は気候を安定させ、宇宙線・紫外線・天体衝突から生命体を守る防護服の役割を果たす。また気象・組成も重要である。激しすぎる物理的擾乱下や、大気・液体水の化学的活性が高すぎて細胞を破壊するような環境では生命に連なる化学進化は望めない。太陽系で地球以外のまとまった大気を持つ天体群、すなわち金星、火星、木星、土星、タイタン、天王星、海王星でも、生命誕生につながりうる化学反応は生じえたか？この疑問に答えるためにこれらの大気の垂直・水平方向分布やその変動を探査機 (火星探査機 MMX、木星圏探査 JUICE や今後の国際的な探査機群など) と共同し、

TMT の高精度・高分解能を駆使して詳細観測する必要がある。そして惑星環境がその大きさ、自転速度、中心星からのフラックス、大気組成などの複数パラメータにどう依存するかを明らかにし、系外惑星の惑星環境を知る手がかりを得る (3.1.2.5 (1)、(2) も参照)。

TMT の MODHIS は近赤外線領域で 0.02 秒角 (火星で約 10 km、木星で約 60 km に相当) での高空間分解分光観測が実現でき、惑星大気のローカルな温度構造、組成、同位体比等の測定が可能である。また、大きさ・重量・冷却などの制約で惑星探査機への搭載が稀な中間赤外線領域は、より熱的・物性的情報を豊富に含み、TMT の MICHI による惑星探査機に匹敵する高空間分解観測は国際的期待が高い。すばるの COMICS の運用が停止された後には、この観点では TAO への期待も国際的に大きい。

鍵を握る観測は時間変動 (大規模擾乱、巨大ストーム発生・消失過程) とその温度場・組成・同位体分布への結合である。すばる望遠鏡では既に NASA 赤外線望遠鏡施設 (IRTF) 等では普通に行われている短期間・多頻度を要とする長期モニタ・時間軸天文学に対応できる柔軟な運用が望まれる。表面からの噴出物、例えばイオ火山の空間分解された活動度と噴出ガスの量・組成追跡なども重要である (3.1.2.5 (3) も参照)。このような観測のためには明るい面光源である惑星近傍で微弱光を検出する低散乱光学系と惑星ディスク (数秒角～1 分角) のマスク能力を必要とする。

(2) 現在の惑星領域への物質流入の推定

惑星形成終了後、惑星領域への物質流入は劇的に減少し、現在地球軌道付近にいる天体のほとんどは惑星との軌道共鳴を経て、惑星領域へ散乱されてくる小惑星帯小惑星である。小惑星が共鳴帯に入り込む主たる原因は、ヤルコフスキー効果¹⁵である。この効果は小さい天体ほど有効で、例えば直径 1 km の小惑星帯小惑星は 10 億年で動径方向に約 0.1 天文単位ドリフトする。軌道共鳴は小惑星帯の至る所にあるのでドリフト中に共鳴帯に遭遇し、小惑星帯からの物質の染み出しが起こる。ヤルコフスキー効果の強度は天体サイズだけでなく、天体表面特性 (アルベド、熱慣性、表層ラフネス、レゴリスの粒径等) にも大きく依存することがわかっている。

はやぶさ 2 に搭載された中間赤外カメラ (TIR) は、(162173) Ryugu 表面の熱放射の分布を測定し (図 3.1.14 参照)、この結果、熱慣性と表層ラフネスが推定された (Okada et al. 2019; Shimaki et al. 2019)。このような観測は小天体を空間分解できないこれまでの地上観測では難しかったが、TMT の MICHI では N バンドにおいて、0.07 秒角の空間分解能を持つため、300 km より大きいメインベルト小惑星を空間分解して撮像することが可能になる。TMT

15 小惑星表面の熱放射の非一様性に起因して小惑星の軌道長半径が変化する現象。

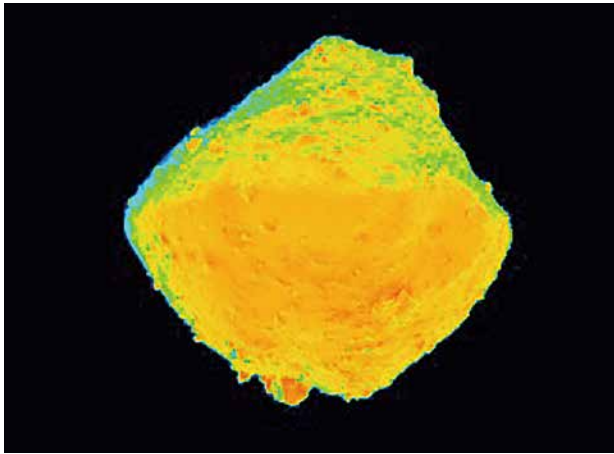


図3.1.14：TIRで高度約5kmから撮像したRyuguの熱画像。図の下方が南。南半球が夏季のためより高温である。

Credit: JAXA/ 立教大学 ほか

では大きな小惑星の表層を、探査機では小さな小惑星の表層の観測を行い、数百kmと数km以下の小惑星の表層特性の違いが統計的に調査可能になれば、小惑星の表層進化や熱慣性のサイズ依存性が明らかになると期待される。これらはヤルコフスキー効果を正確に見積もる際の非常に重要なパラメータであり、最終的に内部太陽系への天体流入量を正確に推定するための重要な基礎情報となる。

(3) 現在の惑星表面への天体衝突頻度の推定

1994年の木星へのシューメーカー・レヴィ第9彗星の衝突や流星群の塵による月面衝突閃光など惑星表面への天体の衝突は現在でも起こっている。小天体は小さいもののほど数が多いので一般に小さい天体の衝突は大きい天体よりずっと頻繁に起こっているはずである。しかしながら、すばる望遠鏡で検出できる天体は木星あたりでせいぜい直径1kmサイズである。それより小さい天体の衝突頻度は天体衝突閃光から推定するしかない。TMTのIRISの解像度で惑星や衛星表面のモニタリングができれば、その天体領域の現在の天体衝突レートを直接観測で求めることができる。メートルサイズの天体の木星衝突閃光（継続時間1-2秒で見かけの明るさおよそ3-6等）は観測例があり、年間10-65回の頻度で発生していると推定されている（Hueso et al. 2018）。小天体の累積個数密度が r^{-3} に比例すると仮定すると（ r は天体の半径）、10cm以上の物体の木星への衝突頻度は年間10000例以上になる。地球からは木星の半球が観測でき、一晩に8時間ほどの観測時考えられるとすれば、一晩に約4回の天体衝突閃光が検出できる見積もりになる。木星に衝突する小天体の運動エネルギーと閃光のフラックスが比例すると仮定すれば、木星に衝突する10cm程度の物体の閃光は15-17等くらいになると見積れるのですばる望遠鏡で観測可能、TMTではもっと小さい天体の衝突による閃光も検出可能と見込ま

れる。木星よりさらに遠い海王星あたり（太陽系外縁天体の衝突頻度を直接反映すると思われる）での天体衝突閃光頻度の直接観測に基づいた見積もりはまだないが、 $>5\mu\text{m}$ サイズの惑星間塵の木星付近と、海王星付近の空間分布（Poppe 2016）から見積もると、海王星では一晩に約1回の天体衝突閃光が検出できそうである。

3.1.2.5 生命存在可能環境を太陽系に探す

太陽系で生命体が存在可能な環境（ハビタビリティ）の候補は生命材料である有機物と液体水が共存する場所である。そのような場所で酸素やメタンが発見できれば過去・現在の生命の存在を示唆しうる。太陽系でまとまった液体水が存在する場所は、地球を除くと火星およびエウロパ（木星の衛星）、エンセラダス（土星の衛星）などの氷衛星の地下である。こうした衛星や海王星などの氷型惑星はもとより、近傍の金星や火星でさえも最遠時の視半径はそれぞれ5秒角、2秒角を切る。これらの大気の詳細かつ安定したモニタ観測には、天体を空間分解し、かつ高分散分光を行うことが重要で、それにはTMTやすばる望遠鏡が絶大な威力を発揮する。また、探査機との連携観測システムの構築も鍵を握る。例えば、3.1.2.3 (2) で示したDeep Impact計画での連携のように、探査機に搭載できない観測装置で探査機計画を地上支援するアプローチも必要である。以下に示す火星やエンセラダスの例のように惑星や衛星は決して静的な世界ではない。突発的な現象は度々起こるため、一回きりの観測では動的側面を見逃してしまう。突発的なイベントや大気環境の変動のメカニズムの詳細解明（発生頻度や物理的/化学的反応など）には地上からの継続的な観測が必須である。

(1) 惑星・衛星大気物質循環と突発事象の掌握

相当量の大气を有する太陽系の惑星・衛星の組成とその進化は、系外惑星大気研究の基準点を提供する。火星・金星の酸化型大気¹⁶では、 CO_2 が安定なためCOへの紫外線解離を相殺するために H_2O が不可欠である。またメタン・酸素・オゾンなど「バイオマーカー」の生成とそのパスの掌握には、探査機と共同し、惑星の全球にわたる高分解能かつ長期にわたる地上観測が求められる。金星では、大気ダイナミクスと化学反応ネットワークが織りなす物質循環や微量分子の時空間変動のメカニズムの解明が期待されている。これには1.7-2.5 μm の近赤外線領域の H_2O 、CO、HF、OCS、 SO_2 、HClや、7.35 μm 帯の中間赤外線領域の SO_2 、HDO、 CO_2 、5.3 μm のNOなどの吸収線、557nmや1.27 μm の可視光・近赤外線域の O_2 の大気光など、酸化プロセスに関わる重要な分子の高分散分光・高分散分光のモニタ観測が鍵を握る。また

16 原始惑星系円盤からの水素分子などを多く含み、炭素はメタンなどの炭化水素、窒素はアンモニアなどを主形態とする大気を還元型大気という。一方、水蒸気や二酸化炭素など、惑星の形成過程で脱ガス等により酸素を多く含む分子を主成分とした大気は酸化型大気という。土星の衛星のタイタンは炭化水素が豊富な還元型大気を纏うが、窒素は二酸化窒素が主形態となっている。

近赤外線から中間赤外線にかけての撮像では、雲の構造の微細なパターンの変化から大気ダイナミクスに迫ることが可能となる。火星では、生命起源の可能性も議論されている CH_4 の $3.3\mu\text{m}$ 吸収線や、 $3.3\text{--}3.7\mu\text{m}$ 帯の H_2O や HDO 、 $8\mu\text{m}$ 帯の H_2O_2 の吸収線なども重要なターゲットである。巨大惑星やタイタンの還元型大気¹⁶では CH 系の複雑な化学反応がみられ、それらは生命起源物質の生成に直結する。タイタンの大気の CH 系分子の存在量には大きな季節変動と空間非一様性が存在する。これは大気循環と光化学反応のカップリングによるものと考えられるが、そのメカニズムは未解明であり、すばる望遠鏡の赤外線観測で C_2H_2 や C_2H_6 などの主要な CH 系分子の季節変動をモニタし、TMTの高空間分解観測を用いて大気循環による物質輸送を制約することが期待される。さらにアルマ望遠鏡(ALMA)を用いることで、赤外線では観測しにくい分子種(HCNなど)が観測可能となり、総合的・系統的なアプローチが期待される。

(2) 火星の水/メタン：地下からの放出とその循環

現在の火星表面は低温低圧で、液体水は安定に存在できない。しかし地下では液体水が現存しうる。例えば、大気中水蒸気の水素同位体(D/H比)の空間的不均一がすばる望遠鏡で観測されている(Villanueva et al. 2015; Aoki et al. 2015)。この異常は、地下水が表層(極冠等)と異なるD/H比を持ち、その揮発で生じた可能性がある。また、2003年の発見以降続くメタンの追跡調査では、NASAの火星着陸機キュリオシティが一時的な数ppm～10ppmレベルへの上昇イベントを観測した(Webster et al. 2015)。地下凍土層の融解などメタン放出活動があった可能性がある。さらに一部の急斜面でみられる‘Recurring Slope Lineae’と呼ばれる夏季に現れ冬季に消失する筋模様(McEwen et al. 2011)は地下水の噴出と考える。

突発的事象を捉えるには微量成分を高精度・高空間分解能で全球継続観測する必要がある。すばる望遠鏡で火星大気の近赤外線分光観測を定期的に実施し、全球的な気温場やHDO分布の長期の季節変動を押さえつつ、いくつかの特定の地域周辺をTMTでスポット的に観測する。このような観測が探査機・着陸機の観測を支え、地下水・メタンの供給・消失とその起源(生命か非生命かを含む)を制限する。地域や時期の特定は、将来探査・テラフォーミング検討にも有用である。

(3) 氷衛星の水と化学

エウロパやエンセラダス等の氷衛星の地殻下には、液体の地下海が存在し、これら地下海は現存する生命を発見する可能性が最も高い場所だと考えられている。とはいえその化学状態(溶存種、酸化還元、pH)の制約は困難である。図3.1.15に示すようなブルームと呼ばれる地下海の宇宙空間への噴出(Porco et al. 2006; Roth et al.

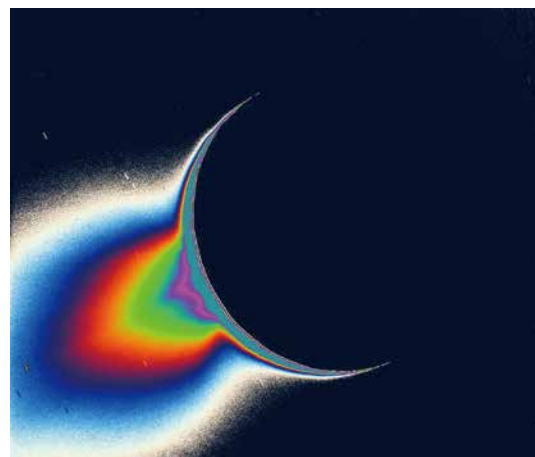


図3.1.15：エンセラダスのブルーム。TMTでブルームの分子種の分光を行う。

Courtesy of NASA/JPL/Space Science Institute

2014)は、そのプローブとなりうる。探査機によってブルームの質量分析は行われたが、化学組成や有機分子を含む微量成分はいまだ不明である。エウロパ・ガニメデ・カリスト(いずれも木星の衛星)に対しては、2020-30年代に米Clipperと欧JUICEの大型探査が実施される。探査機による分光観測にヒントを得て、すばる望遠鏡(可視光-近赤外線線域、例えばNaなどのブルーム由来物質をトラス中に調査)・TMT(中間赤外線域、特に高分散分光装置を用いて H_2O の検出を試みる)・ALMA(ミリ波・サブミリ波、HCNなどの分子が観測可能)でより広い範囲の多波長分子種探査を行えば、氷衛星の内部組成に関する多彩なデータが取得できる。

3.1.3

惑星誕生現場で探る惑星系・太陽系の起源

多くの系外惑星系の発見は、宇宙における惑星系の普遍性を明らかにしつつあり、それに伴って地球外生命の普遍性への期待も高まりつつある。そして、系外惑星系の多様性が明らかになるにつれて、太陽系はありふれた存在なのか?それとも特殊な存在なのか?という問いが生まれ、次世代の系外惑星系や太陽系研究により、その問いへの答えが得られる日もそう遠くないだろう。

一方で、現在も宇宙においては星が生まれ、惑星系も誕生しつつある。そのような形成現場を観測することは、系外惑星系や太陽系の様々な特徴を、形成から現在の姿まで統一的に理解する上で重要であることは論を待たない。特に、若い星の周りに付随する原始惑星系円盤は、その名称から惑星形成現場であると目されてきたが、実際にその中に形成中の惑星候補天体が検出され始めたのは比較的最近のことであり、現在も観測例は少なく、TMTがその状況を打ち破り新たなステージをもたらすと期待される。

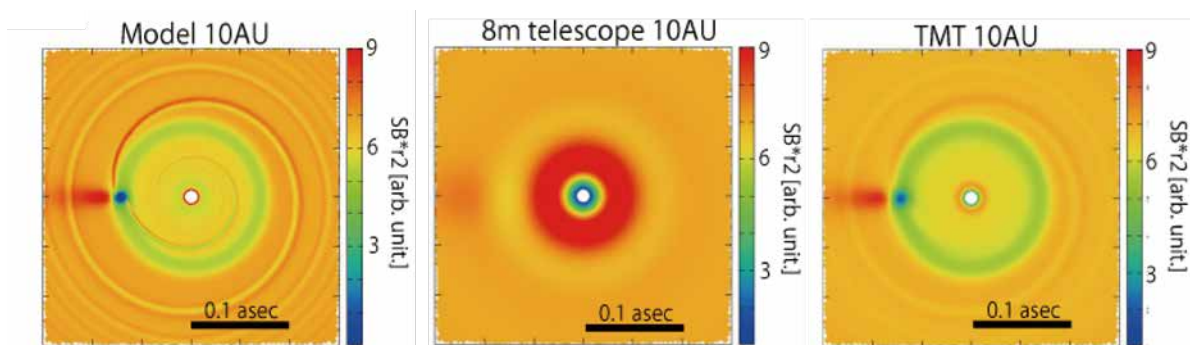


図3.1.16：円盤・惑星相互作用によるギャップ構造・スパイラル構造の1.6 μ m近赤外線観測シミュレーション。距離は140pcを仮定。左はモデル画像であり、左側の点状に青くなっている場所に惑星がある。真ん中ではそれを8mクラスの望遠鏡で観測した場合、右はそれをTMTで観測した場合を示す。全て、回折限界の空間解像度が達成されたことを仮定している。また、構造を見やすくするため、面輝度分布に半径の二乗を掛け算したものをカラーで示している。

Courtesy of T. Muto

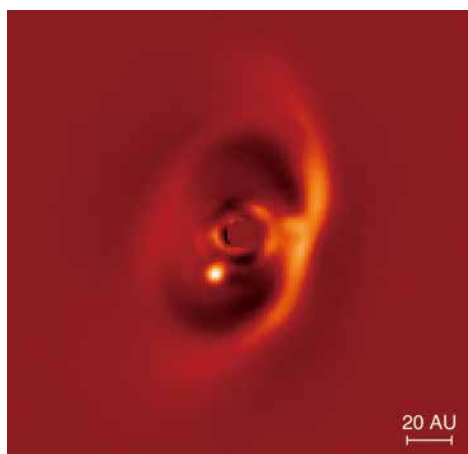


図3.1.17：T Tauri 型星PDS 70 周囲の原始惑星系円盤の2.2 μ m 観測画像。リング状の円盤構造の内側の中心星から22天文単位に惑星候補点源が見える。

Credit: Müller et al. A&A, 617, 11, 2018, reproduced with permission © ESO.

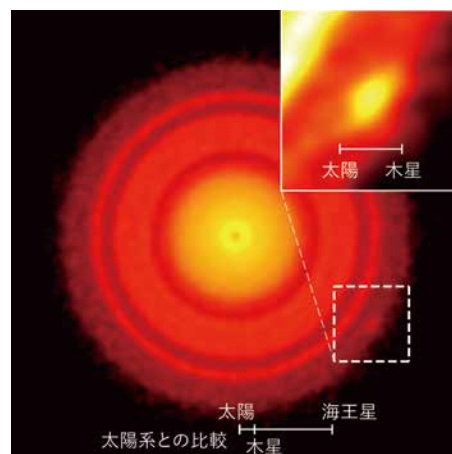


図3.1.18：アルマ望遠鏡による、うみへび座TW星周囲の原始惑星系円盤の観測画像。円盤の右下部分に、弱い放射の超過があり、ダストが何らかの原因で集まっているか、温度が局所的に高くなっていることを示している。

Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO); Tsukagoshi et al. 2019¹⁷

3.1.3.1 円盤に埋もれた形成中の惑星のその場観測

形成中の惑星を見つけることは、惑星形成の環境や時間スケールを明らかにしていくうえで重要なマイルストーンとなる。形成中の惑星は、円盤の中に様々な構造を作る。また、ある程度質量の大きな惑星は周囲のガスを重力によって引きつけ、ガス惑星へと進化する。こういった、惑星形成の現場を直接観測するための一つの手段として、原始惑星系円盤の構造を空間的に分解して直接調べることが有効である。

多くの原始惑星系円盤は、星形成領域の中にある。その距離は、近傍にあるおうし座分子雲でもおよそ140パーセクある。そこで、例えば、100天文単位程度の大きさの原始惑星系円盤を空間分解しようとするれば、0.1秒角オーダーの空間分解能が必要である。さらに、中心星から数天文単位程度の、地球型惑星が形成されるような領域に迫ろうとすると、さらにその1/10程度の空間分解能(0.01秒角)が要求される。例えば、波長1.6 μ mの近赤外線での観測を考えると、8m望遠鏡の回折限界での空間分解能

がおよそ0.05秒角(およそ5天文単位程度)であり、30mクラスの望遠鏡であれば0.01秒角程度(およそ1天文単位程度)となり、地球型惑星形成領域に迫ることができる。

これまでですばる望遠鏡による高解像度観測により、ギャップ構造や渦巻き構造など、形成中の惑星が作ったと思われる円盤全体に広がる構造が検出されてきた。今後ですばる望遠鏡の極限補償光学であるSCEXAOを用いたサーベイ観測により、このようなターゲットを多数検出できるはずである。そして、TMTのPSIやMICHIが実現した暁にはそれらの超高解像度観測を行い、形成中の惑星そのものを検出できるはずである。

図3.1.16に原始惑星系円盤の中心星から10天文単位の距離に0.1木星質量の惑星がある状態を近赤外線で観測するとどのように見えるかをシミュレートした図を載せる。惑星が作るギャップ構造が、8mクラスの望遠鏡では、ぼんやりとリング状に見えているのに対して、TMTでは、惑星のある場所がはっきりと見えることが分かる。

原始惑星系円盤内に形成された質量の大きな惑星には、

¹⁷ "Discovery of An au-scale Excess in Millimeter Emission from the Protoplanetary Disk around TW Hya" © AAS. Reproduced with permission.

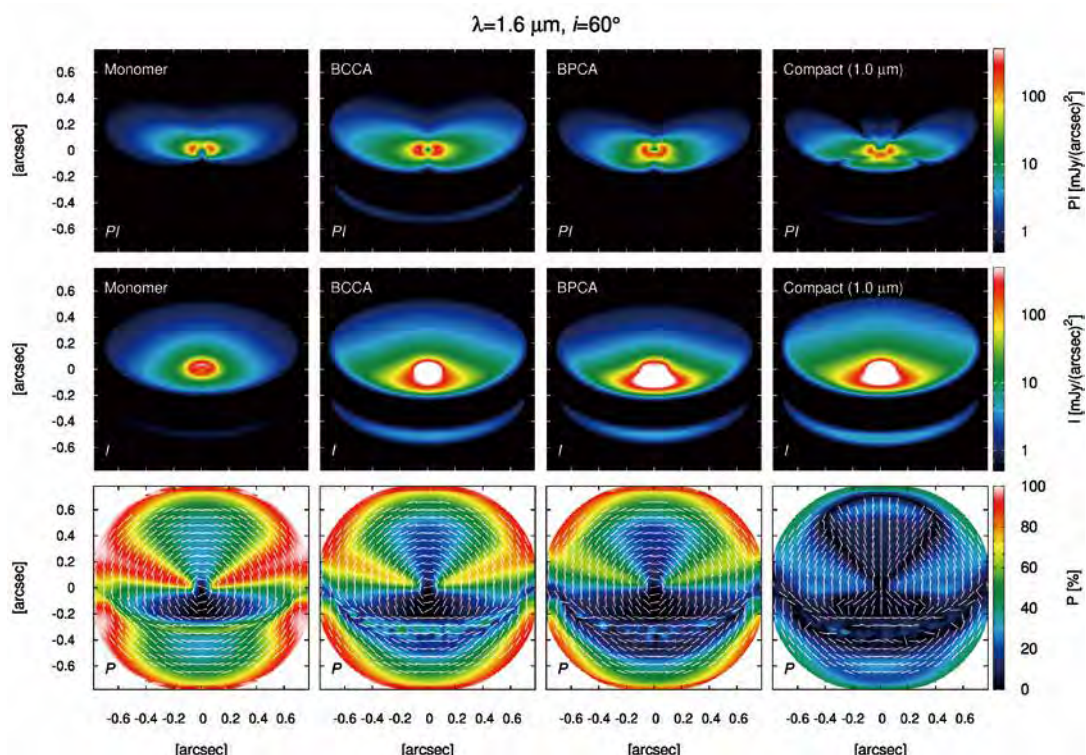


図3.1.19：すばる望遠鏡を用いて近赤外線（波長 $1.6\mu\text{m}$ ）で距離 140pc にある原始惑星系円盤散乱光を模擬観測したモデル画像。偏光強度（上段）、散乱光強度（中段）、偏光度（下段）の輻射輸送計算結果。左列は $0.1\mu\text{m}$ サイズの球形ダスト。右側3列は左から、半径 $1\mu\text{m}$ の一樣球と同じ質量を持つ低密度（空隙率99%）、中密度（空隙率85%）、高密度（空隙率25%以下）アグリゲイトによる散乱光。偏光度が空隙率に大きく依存しており、高解像度赤外線多波長偏光観測から空隙率を求める事が可能。
Credit: Tazaki et al. 2019¹⁸

重力によって周囲のガスを引き寄せ、惑星の周囲には周惑星系円盤も形成される。その結果、惑星近傍のガスやダストは重力エネルギーの解放によって暖められ、温度が高くなる（ただし、図3.1.16のシミュレーションにこの効果は取り入れられていない）。その温度は、惑星の近傍の領域ではおよそ 1000 度にも達する可能性があると思われ（Zhu 2014）、近赤外線から中間赤外線の波長域で、明るくなる可能性がある。もし、このような点源を見つけることができ、かつ、周囲にギャップ構造や渦巻構造も発見されれば、形成中の系外惑星の動かぬ証拠として、惑星形成の理解を大きく前進させることになるだろう。現状、原始惑星系円盤と点源が共存している系としては、PDS 70の系（Keppler et al. 2018）などがあり（図3.1.17）、中心近傍に空いた大きなギャップ中に点源が見つっているが、「普通の」原始惑星系円盤に埋もれた点源の検出例はない。最近、最も近傍にある原始惑星系円盤であるうみへび座TW星の周囲に、アルマ望遠鏡で小さな点源が発見（図3.1.18）された（Tsukagoshi et al. 2019）が、電波は比較的低温のダストからの放射を捉えるため、周惑星系円盤の構造なのか、ダストの集まりであるのかの見分けが付きにくい。そこで、高温のダストや、惑星からの光球放射を検出するには、光赤外線波長での観測が必須である。形成中の惑星の証拠を決定づけるための最適な

手段として、すばる望遠鏡とTMTによる高空間分解能直接撮像観測が重要となる理由である。

3.1.3.2 ダストから微惑星へ

原始惑星系円盤での惑星形成の第一歩目は、ミクロンサイズのダストからキロメートルサイズの天体である微惑星を作ることである。しかし、ダストの成長過程には様々な問題点が指摘されており、微惑星形成過程は未だ謎に包まれている（3.1.2.2も参照）。近年、ダストの成長過程において、アグリゲイト（ダストの凝集体）の内部密度が微惑星形成過程を左右する鍵であることがわかってきた（Blum 2018）。アグリゲイトが持つ内部密度の理論的推定は不定性が大きいので、その観測的推定が微惑星形成過程の理解の鍵を握っている。

可視光や近赤外線といった波長で原始惑星系円盤を観測すると、円盤表層のアグリゲイトによって散乱された中心星光が観測できる。光散乱過程はアグリゲイトのサイズや内部密度に強く依存し（Tazaki et al. 2016）、散乱光の観測はアグリゲイト特性を調べる有力な手段である。そこで重要なのが、すばる望遠鏡やTMTを用いた高解像度観測（ $< \sim 0.1$ 秒角）である。図3.1.19に様々なサイズや内部密度を持つアグリゲイトに対する原始惑星系円盤の近赤外線散乱光の輻射輸送計算結果を示した。アグリ

18 Figure 3, “Effect of dust size and structure on scattered-light images of protoplanetary discs”

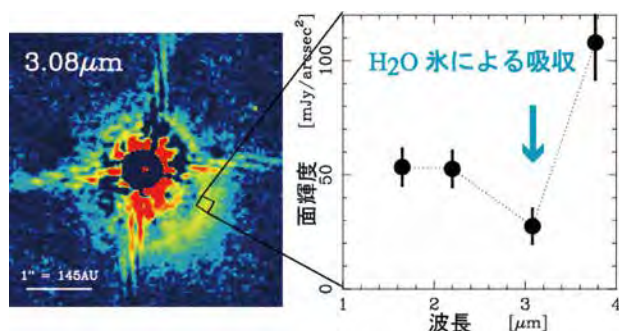


図3.1.20：HD142527円盤の近赤外散乱光スペクトルに刻まれたH₂O氷の3.1μm吸収。円盤外縁の低温領域表層に水の氷の存在を示した。TMTを用いれば、円盤表層の雪線に迫ることが可能である。
Credit: Honda et al. 2009¹⁹

デイトのサイズや内部密度の情報は、偏光度や散乱光強度の散乱角依存性・波長依存性に顕著に現れる。つまり、円盤散乱光の偏光強度を多色かつ高空間分解能で観測することで、アグリゲイト半径やアグリゲイトの内部密度推定が観測的に可能となる (Tazaki et al. 2019)。アグリゲイト特性の円盤内での天文単位スケールの空間構造が明らかとなれば、微惑星形成領域の直接的な制限に繋がる事が期待できる。

3.1.3.3 雪線と惑星物質の進化

原始惑星系円盤には、H₂O雪線（スノーライン）と呼ばれる水（H₂O）の気相・固相の境界領域があると考えられている。現在の太陽系では3天文単位近辺の小惑星帯の位置に対応しており、太陽系形成の標準モデル（コア集積モデル）によると、木星型の巨大ガス惑星はH₂O雪線以遠で形成される (Hayashi et al. 1981)。水氷により固体物質の面密度が上昇し、ガスを集積可能な固体コア形成が可能と期待されるからである。一方で、地球型の岩石惑星はH₂O雪線の内側で形成される。このように、H₂O雪線を境に惑星形成過程が大きく異なるため、その位置を多数の円盤で正確に調べることは重要である。

それに加え、水氷は地球型惑星の水の起源を考える上でも重要である。H₂O雪線の位置は円盤の質量や年齢により変化すると考えられており、理論的には円盤進化と共にH₂O雪線が1天文単位よりも内側まで到達する可能性も指摘されている (例えば、Oka et al. 2011)。その場合は地球型惑星形成領域に大量の水が供給された可能性がある。H₂O雪線や水氷の分布については様々な理論的研究がなされているが、観測的にはH₂O雪線の進化はまだよく分かっていない。

TMTでは、水氷の直接空間撮像観測からH₂O雪線の検出が可能と考えている。TMTを用いた円盤散乱光の近赤外線多波長観測により、3.1μm水氷吸収の空間分布を探ることで、水の分布を探ることができると考えら

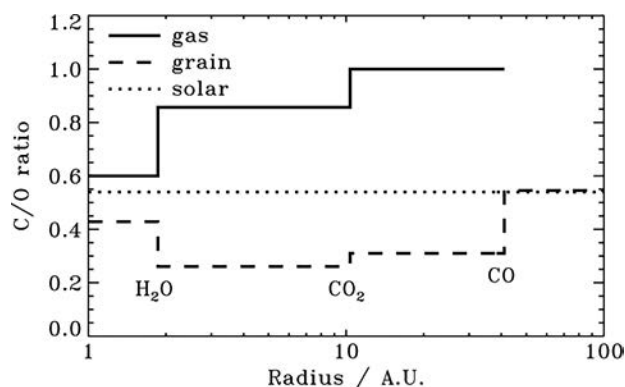


図3.1.21：原始惑星系円盤におけるC/O比の予想分布
Credit: Öberg et al. 2011²⁰

れる。すばる望遠鏡などを用いて同様の手法で円盤外縁部の氷の観測に成功したが (例えば、Honda et al. 2009; 図3.1.20)、TMTの高い空間分解能を活かせば、H₂O雪線に迫ることができると考えられる。波長3.1μmでのTMTの空間分解能は0.03秒角程度であり、これは100パーセク先では3天文単位に相当する。この空間分解能は、特に数太陽質量以上の原始惑星系円盤のH₂O雪線を検出するのに充分である。さらに、アルマ望遠鏡やSPICAなどによる水分子輝線の高空間分解能、高波長分解能、高感度観測を組み合わせる事で、ガスおよび氷の両面から、H₂O雪線の観測的理解が初めて進むと考えられる (Notsu et al. 2017)。

また、近年の太陽系外惑星大気の観測により、木星型の巨大ガス惑星大気中のCOやH₂O、CH₄などの比較的単純な分子が検出され始めた。最近ではそれらの分子輝線・吸収線の観測を元に、まだ不定性はあるものの、元素組成比なども見積もられ始めている (例えばKonopacky et al. 2013)。これらの系外惑星大気の元素組成決定については、TMTの近・中間赤外線分光観測の貢献も含め、今後より多くの天体に対して高い精度で実行されると期待される。

惑星大気元素組成は、大気形成時の原始惑星系円盤ガスの元素組成を反映していると考えられる。円盤内で炭素や酸素を多く含む分子としては、H₂O、CO、CO₂、HCNなどがある。またCH₄も、炭素のみを含む分子の中で最も存在量の多い分子の1つである。これらの分子は、各々の雪線 (内側からH₂O、HCN、CO₂、CH₄、COの順に雪線が存在すると考えられる) の外縁ではダストに凍結する。そのため、円盤ガス・ダストにおいて、半径方向に炭素-酸素元素組成比 (以下、C/O比) の勾配が生じる。その中でも水は酸素を含む主要な分子なので、円盤ガス中のC/O比はH₂O雪線前後で値が大きく変化する (図3.1.21; Öberg et al. 2011)。従って、系外惑星大気のC/O比と円盤内のC/O比の分布を調べることで、惑星

19 "Detection of Water Ice Grains on the Surface of the Circumstellar Disk Around HD 142527" © AAS. Reproduced with permission.

20 "The Effects of Snowlines on C/O in Planetary Atmospheres" © AAS. Reproduced with permission.

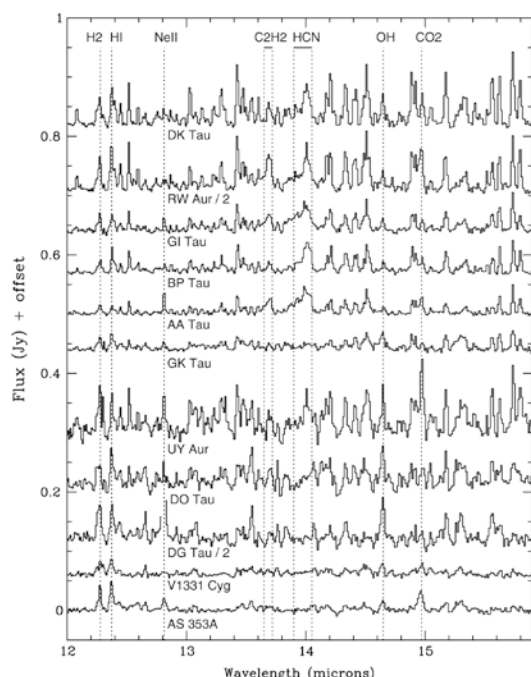


図3.1.22 : T Tauri型星原始惑星円盤赤外スペクトル中の豊富な分子輝線
Credit: Carr & Najita 2011²¹

が円盤内のどの領域で形成されたかに制限が与えられる可能性がある。例えば、系外惑星大気のカ/O比が1を超える場合については、 H_2O 雪線のすぐ外側で大気ガスを獲得した事が期待される。

これまでにスピッツァー宇宙望遠鏡や地上赤外線高分散分光観測により H_2O 、 CO_2 、 C_2H_2 、 HCN 、 CH_4 の輝線・吸収線が多数の原始惑星系円盤から検出されている(図3.1.22; Carr & Najita 2011; Pontoppidan et al. 2010)。双極子放射が禁止されている CH_4 や CO_2 、 C_2H_2 などはアルマ望遠鏡などのサブミリ波での観測ができず、赤外線でのみ観測が可能である。低励起のCOの観測はアルマ望遠鏡などでも可能であるが、高温の惑星形成領域からの放射をトレースするには高励起の $4.7\mu\text{m}$ のCO遷移線が適しており、既に多数の円盤から検出されている。TMTにより、多数の原始惑星系円盤について、上記分子からの近・中間赤外線輝線プロファイルの観測を進めることが可能になる。輝線プロファイルは、主に円盤のケプラー回転速度によるドップラーシフトをトレースする。従って、円盤からの輝線プロファイルを高感度・高分散分光観測して解析することにより、その速度構造から円盤内での放射領域を特定できる。多数の輝線について円盤の各半径のフラックスを測定することにより、分子組成やC/O比の分布が求められる。このような研究はCOについては進められているが(例えば Goto et al. 2006)、感度不足からそれ以外の分子はまだ進展しておらず、TMTのMODHIS、MICHl など高感度の高分散分光観測や面分光観測により大きく進展すると期待される。

3.1.3.4 円盤ガス散逸

～氷・ガス惑星大気の主成分の進化～

惑星形成の母胎である原始惑星系円盤中のガスは氷・ガス惑星大気の源であり、また一方で惑星の軌道進化に大きな影響を及ぼす。従って円盤ガスは惑星系形成を制御する重要な要素であり、その空間分布の進化および散逸機構の理解は惑星系の形成・進化過程の解明に必要な不可欠である。

ここで円盤ガスの大部分は水素分子(H_2)であり、その純回転遷移線は中間赤外線領域に現れる。しかし、 H_2 は等核分子であり双極子遷移が禁じられているため、スペクトル線強度は弱い。よって円盤の散逸時間の観測は、これまで、主に放射強度の強いダスト放射の統計的観測にもとづいてきた(例えば、Hernandez et al. 2007)。また最近では、アルマ望遠鏡を用いた一酸化炭素分子(CO)輝線の統計的観測も行われ始めている(例えば、Ansdell et al. 2017)。一般に星間物質や分子雲内では、水素分子に対するダストや一酸化炭素分子の比がほぼ一定であることが知られており、これらの放射はガス質量のトレーサーとしてよく用いられている。しかし、星間物質や分子雲に比べて非常に高密度な円盤内では、ダストは合体成長して円盤内を移動し、最終的には微惑星や惑星を形成する。従って、円盤内では水素分子に対するダストの比は一定ではなく、ダスト放射はガス質量のトレーサーにはならない。またCOに関しても、中心星からの強い紫外線の影響で円盤内のCOは光解離する。さらに、円盤外縁赤道面付近の低温高密度領域においては、COはダストに凍結する。従って、水素分子に対する一酸化炭素分子もまた一定ではなく、COによるガス質量測定は大きな不定性を伴う。したがって、円盤ガス質量の正確な測定には水素分子輝線の観測を行う必要がある。

近年の地上望遠鏡による高分散分光観測やスピッツァー宇宙望遠鏡による高感度観測により、中間赤外線にあらわれる水素分子の純回転励起線の観測も明るい天体では可能になってきている(例えば、Bitner et al. 2008; Najita et al. 2010)。水素分子輝線は、円盤質量が大きい場合には光学的に厚くなってしまい、ガス質量の測定に適さないが、ガス散逸期の光学的に薄くなった円盤では、ガス質量のよいトレーサーになる。TMTによる水素分子輝線の高感度・高分散観測は、散逸期の円盤ガス質量の統計的精密測定を可能にする。一方で、遠赤外線領域では水素分子が重水素化したHD分子輝線の観測が可能であり、円盤質量がやや大きい場合のガス質量の測定に適している(例えば、Bergin et al. 2013)。TMTのMODHISやMICHlによる水素分子輝線とSPICAによるHD分子輝線の相補的観測により、円盤ガス散逸の時間進

²¹ "Organic Molecules and Water in the Inner Disks of T Tauri Stars" © AAS. Reproduced with permission.

化およびガス惑星形成と惑星軌道進化に関する議論が可能になると期待される。

円盤ガスの散逸機構については、これまで観測的制限が乏しく、まだよくわかっていない。一方で理論的には、円盤ガスが中心星からの強い紫外線やX線に照射されて加熱され、中心星の重力を振り切って系外に逃れる、光蒸発と呼ばれる過程や、円盤を貫く磁場に沿って円盤ガスが放出される磁気円盤風などが考えられており、流体シミュレーションを用いた研究が盛んに行われている。観測的にも、CO 4.7 μm や[Ne II] 12.8 μm 、[O I] 6300 Åなどのガス輝線を用いた速度場の観測が行われつつある（例えば、Brown et al. 2013; Pascucci et al. 2011; Rigliaco et al. 2013）。ドップラーシフトによる遷移線放射波長のずれを観測することにより、円盤から散逸するガスの速度場が観測できるのである。一般的に密度の低い円盤上層部ほど円盤風の速度は速く、速度場の測定が容易である。中心星からの強い紫外線やX線の影響下にある円盤上層部では、ガスは高温状態にあり、原子・分子は電離・解離している。従って、高温領域をトレースする高励起のCO 4.7 μm 輝線や、電離・解離領域をトレースする[Ne II] 12.8 μm 、[O I] 6300 Å輝線は、円盤風のよいトレーサーとなる。これまでの円盤風の観測は空間分解能が低く、輝線プロファイルを用いた速度構造の解釈が一意に決まらなかったため、強い観測的制限が与えられてこなかった。TMTにより円盤上層部をトレースする輝線の高空間分解能・高分散・高感度の面分光観測が可能になれば、円盤ガス散逸の流体シミュレーションとの比較により、円盤ガス散逸機構の理解が大きく進展すると期待する。

3.1.3.5 生命材料物質としての有機高分子の成長

原始惑星系円盤における有機分子の生成過程の解明は、生命起源分子種の生成過程解明に関連する、重要なテーマである。これまでの研究の大きな障壁のひとつが、既存の望遠鏡の感度であった。従来、星間空間における有機分子の生成過程は、主に明るい大質量星形成領域で議論がされてきた。これからはTMTのもたらす高感度により、光度の小さい惑星形成領域の有機分子の空間分布の観測的検証も可能になり、生命起源分子種との関連を議論することもできるようになると期待される。

低密度で紫外線が強い星間空間においては、大きな有機分子は気相では生成率が非常に低く、主に塵表面を触媒として生成すると考えられている。しかし、塵表面反応の素過程の理論的・実験的研究はまだ限られており、反応率などの不定性は大きい。そのため、化学反応モデル計算とその観測的検証により、星間空間における有機分子生成過程の理解が進んできた。大質量星形成領域における大きな有機分子生成過程の観測的・理論的研究か

らの類推より、円盤外縁の低温領域においては、質量の小さい水素のみが塵表面で移動可能であり、水素付加反応が進むと考えられる。一方で、円盤内縁の暖かい領域においては重たい分子も塵表面を移動でき、光解離により生じたラジカル同士の反応で複雑な有機分子が生成されることが考えられており、塵表面におけるアミノ酸の生成も示唆されている（例えば、Garrod et al. 2013）。しかし、その観測的検証には至っていない。

これまで原始惑星系円盤では、HCN、C₂H₂、CH₄といった、小さな有機分子が円盤内縁で検出されてきた（図3.1.22; Carr & Najita 2011; Mandell et al. 2012）。また最近ではアルマ望遠鏡を用いた高感度観測により、ミリ波・サブミリ波の波長帯において、HC₃N、c-C₃H₂、CH₃CN、CH₃OH、HCOOH、H₂CSといった、大きな有機分子も検出されるようになった（例えば、Öberg et al. 2015; Walsh et al. 2016）。アルマ望遠鏡で検出された分子輝線は、主に冷たい円盤外縁部から放射されていた。このような低温領域では、塵表面で生成された分子が熱的に気相に蒸発することはできないため、中心星からの紫外線や星間空間からの宇宙線など、非熱的な過程で気相に脱離したと考えられる。TMTによる高感度赤外線観測では、円盤内縁の惑星形成領域から放射される大きな有機分子の検出が可能になると期待される。地上観測が可能な3-5 μm 帯、10-12 μm 帯には、CH₃OH、HCOOH、CH₃CNなどアルマ望遠鏡で検出された分子種に加えて、HNCOやさらに複雑なベンゼン環を含む分子種などの遷移線が存在している。赤外線の波長帯における遷移線は励起エネルギーが高く、円盤内縁部の高温領域をトレースすると考えられる。これらの分子線をTMTの高感度観測で検出することにより、暖かい領域での塵表面反応の観測的検証が可能になり、惑星形成領域における大きな有機分子の生成過程、ひいては、生命起源分子種への進化が議論できるようになると期待できる。

3.1.4

星の誕生

私たちの住まう地球は孤独な存在か？宇宙や星はどのように誕生するか？これら根源的な問いに対して、数千年もの間、様々な考えが提唱されてきた。近年の観測技術の向上により、太陽以外の恒星周りに千姿万態の系外惑星系が見つかり、生命を持つ惑星の探査に迫り（3.1.1）、さらに星や惑星の誕生について次のように理解が進んだ（3.1.3も参照）。

星は冷たく密度の高いガスの塊（分子雲コア）から誕生する。太陽程度の星の場合、およそ10,000天文単位の子雲コアが自身の重力で収縮して、内部に現在の太陽とほぼ同じ大きさである0.01天文単位程の生まれたての星



図3.1.23：アルマ望遠鏡で観測された原始星ジェット（左）とその模式図（右）。一酸化炭素が放つ電波とそのドップラーシフトから原始星の両極方向（左右）から高速のジェットが吹き出していることが確認された。中心のより細い部分が高速ジェット、その周囲を取り巻く構造は低速ジェット成分。図中のジェットの端から端までの長さは、およそ3000天文単位。アルマ望遠鏡の観測で得られる‘高速ジェット’は低温（ $\sim 10\text{K}$ ）で 100km s^{-1} 以下の速度をもつ。他方、すばる望遠鏡やTMTで観測できるジェットは、高温（ $>1000\text{K}$ ）でより高速（ 100km s^{-1} 以上）であるため、さらに原始星に近い場所から噴出されている。
左図Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO), Matsushita et al.
右図Credit: NAOJ

（原始星）を誕生させる。つまり、星の母体である分子雲コアと原始星は空間スケールが100万倍も異なる。さらにその誕生過程として、低質量星のみの孤立的な形成、多様な質量の星の集団の形成、超新星爆発等外力による誘発的及び連鎖的な形成など様々な描像が明らかになってきた。しかし星の質量がどう決まり、惑星誕生へ如何につながるか等の理解は乏しい。

一方、太陽の10倍以上の質量をもつ大質量星や、太陽の8%以下の質量で水素の核融合反応が起こらない天体（超低質量天体）の誕生と進化については、すばる望遠鏡の観測から少しずつ理解は進んだが、観測の困難さから低質量星と比べて依然として謎が多い。加えて、星や惑星の環境による形成・進化の相違や、誕生時の星の質量による頻度分布（初期質量関数）の普遍性と多様性については明らかでない部分が多い。これらの問いについて、広視野をもつすばる望遠鏡の次世代広視野高解像赤外線観測装置（ULTIMATE）、高感度・高空間分解能を誇るTMTが解明の糸口を与えてくれるだろう。

3.1.4.1 低質量星の誕生とジェット

星の誕生時には、周囲に分子雲コアの残骸ガスが存在している。このガスが原始星からの光を吸収/散乱するため、星が育つ現場を望遠鏡で詳細に観測することは難しい。原始星やその周囲の環境を観測することができるのは、星の周囲のガスが晴れ上がった後の大人の恒星（主系列星）に向かって成長しつつある星の姿である。直接的な観測は難しい星の誕生/成長であるが、間接的手法から成長過程や原始星周囲の環境を知ることは可能である。その手がかりとなるのが原始星からのガスの噴出現象（原始星ジェット）である。図3.1.23左には、中心にある原始星の左右に細長く広がった構造が見られる。これが原始星ジェットである。また、図3.1.23右上の模式図に示すように、理論研究から高速の原始星ジェットは、原始星とその周囲に形成する円盤から駆動することが分かっている。誕生時の原始星の質量は太陽の約1/1000で木星と同等である。誕生後、原始星は周りのガスを取り込んで成長するが、全てを取り込むわけではなく余分なガスをジェットとして吐き出す。このジェットは、高速で回転しながら飛び出す。原始星は成長に不必要な回

転（角運動量）を持つガスを放出することによって、必要な（回転の小さい）ガスを取り込んで成長する。この原始星ジェットの調査は、星の誕生の理解につながる。また、ジェットは、周りの物質に衝撃を与え、分子雲の密度分布や化学組成の進化を起こし、時には他の星の誕生のきっかけにもなりうる。ジェットの大規模な変化の調査には、すばる望遠鏡の超広視野主焦点カメラ（HSC）とULTIMATEを用いた広視野・高感度観測が威力を発揮する。他方、ジェットの噴出過程の理解には、ジェットの空間構造と速度情報や、ジェットを駆動する原始星・円盤の詳細な情報が必要であり、すばる望遠鏡の高分散分光器（IRD及びHDS）の高い速度（波長）分解能が活躍できる。さらにTMTでは、空間分解能と感度が増すため、より細部に迫ることができるだろう。

例えば、原始星ジェットは間欠的に出現するが、これは星の周りの円盤にガスが一時的に溜まった後に星に落下していることを意味する。このようなジェットは光赤外～電波域で観測できる。アルマ望遠鏡では低温で比較的低速のジェットが観測できる。一方、星表面に近づくにつれてガスは高温になり、ジェットは高速になる。このような原始星のごく近傍から噴出する高温・高速のジェットは、星とその近傍の情報を保持しており、すばる望遠鏡やTMTでは、アルマ望遠鏡の電波観測よりも熱く速いジェットを見ることが可能となる。熱いジェットの速度は、原始星の大きさと質量に依存し、ある時刻にジェットによって放出されるガスの量は、円盤内縁から星表面へ落下するガスの質量に比例する。そのため、TMTを用いたジェットの高空間分解能観測からその速度、質量、運動量などの物理量が得られると、原始星と周りの円盤の状態や進化の段階を知ることができ、星の誕生・進化過程の理解へとつながる。

TMTの近赤外線撮像分光装置（IRIS）により0.01秒角以下的高空間分解能を持つ輝線の画像が得られると、近傍の星形成領域では1天文単位以下の円盤とジェットの駆動領域の構造の空間分解が可能となる。この領域は低速と高速ジェットの境界領域（図3.1.23）をカバーし、惑星誕生の領域でもある。そのため、TMTの高分解能観測から得られるジェットの情報は、星形成過程の解明のみならず円盤中でどのように惑星が誕生するかを解明する手掛かりにもなる。

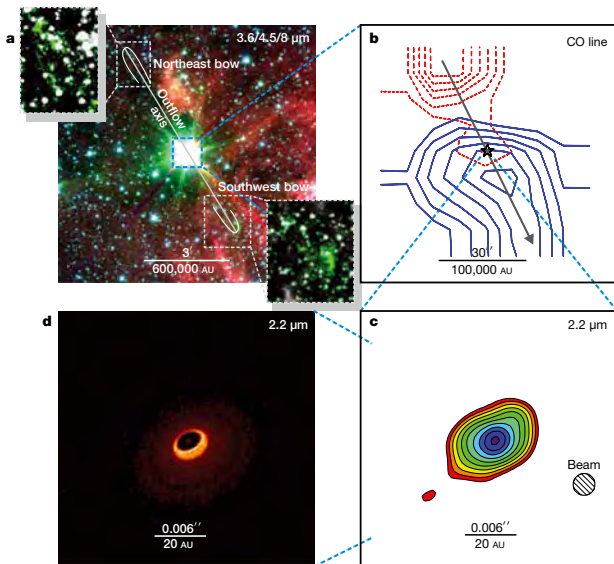


図3.1.24：赤外干渉計VLTIによる大質量原始星に付随する円盤観測例 (Kraus et al. 2010)。100,000天文単位以上に広がる強力なジェット (a: 高速、b: 低速) と、それに垂直な円盤 (c: 赤外干渉計による観測、d: 理論モデル)。観測条件の厳しい赤外線干渉計では天体数増加は余り見込めず、TMTによる包括的な観測が望まれる。
Credit: Kraus et al. 2010²²

3.1.4.2 大質量星・超低質量天体の誕生

大質量星は強力な星風、輻射、超新星爆発によって周囲の星間物質に多大な影響を与え、更にその死後には中性子星やブラックホールへと姿を変える天文学的に非常に重要な天体である。また、ビッグバンによる宇宙誕生の後、最初に誕生した「初代星」も典型的には数十～数百太陽質量の非常に重い星だったと考えられている (Hirano et al. 2014)。しかし、大質量星形成過程は、低質量星形成と比べ理解が進んでいない。これは大質量星自体が希少であり、数キロパーセク程度と遠い場所で、低質量星よりも大量のガスとダストに埋もれて誕生するためである。高空間分解能と高感度を誇るTMTが稼働すれば、これまで謎の多かった大質量星形成の解明の鍵となるだろう。近年、アルマ望遠鏡によるサブミリ波観測から、分子雲内に深く埋もれた形成初期段階の大質量原始星に付随する回転円盤が発見され始めた (Beuther et al. 2017)。しかし、その観測例はまだ数が少なく統計的性質、特に進化段階ごとの性質についての議論は全くなされていない。TMTによる赤外線観測では、星周物質が減少しはじめる形成末期における円盤撮像に期待が寄せられている (図3.1.24)。

TMTで0.015秒角の高空間分解能が達成されれば、大質量星形成領域での円盤構造 (50-1000天文単位) の空間分解が可能となる。円盤からの近赤外線散乱光 (将来的には中間赤外線で熱放射) を撮像観測し、降着末期段階の円盤の性質を統計的に調べることで、円盤進化の多様性や降着停止時の中心星パラメータなどを検証することが

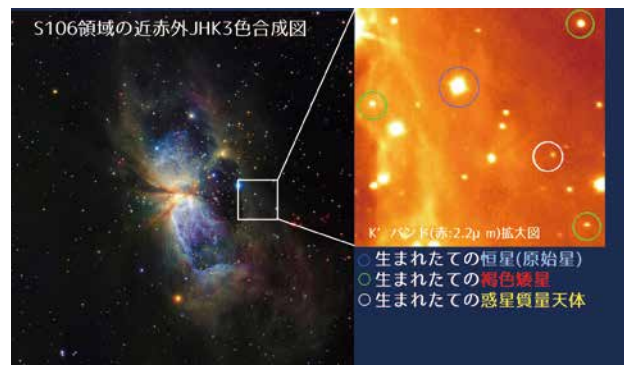


図3.1.25：すばる望遠鏡がとらえた様々な星が誕生する姿。中心にある太陽の20倍ほどの質量を持つ原始星が双極にガスを吹き出すとともに、生まれたての低質量星/褐色矮星/惑星質量天体が集团的に、軽いものほど多く誕生していることがわかった。
Credit: Oasa et al. 2006²³ (一部改変)

期待される。また、ブラケットガンマ輝線等の再結合線分光観測から円盤風の情報を組み合わせ、進化末期における円盤散逸過程を定量的に調べると、星質量の決定機構に制限を与えられるだろう。

加えて、昨今のアルマ望遠鏡による観測から、これまで星なしと考えられていた大質量分子雲コア内においても、極めて若い原始星からのジェットが発見され始めている (Tan et al. 2016)。ガス雲に埋もれた原始星は強い減光を受けるが、高感度のTMTによる中間赤外線の深い探査観測を行えば検出できる可能性がある。TMTによる原始星放射の観測が実現すれば、大質量星形成の最初期段階における質量降着や円盤形成に関する重要な制限を得られるだろう。

一方、水素の核融合反応が安定して起こる低質量星・大質量星に対して、超低質量天体には、誕生時に高温になれず重水素の核融合のみ起こす褐色矮星と、核融合が起きない惑星があり、進化に伴って冷たく暗くなっていく (図3.1.25)。しかし非常に暗い超低質量天体も、恒星同様に若いほど明るく輝くこと、低温で分子雲に埋もれていることから、近赤外線波長域での観測は非常に有効な手法となる。そこで、誕生したばかりの若い天体について様々な近赤外線観測が行なわれ、惑星質量を持つが、惑星と異なり親星となる恒星を持たない単独惑星質量天体が発見された (Oasa et al. 1999)。これは、従来の定義では褐色矮星にも惑星にも該当しない全く新しいタイプの天体である。その後、星形成領域 (Lucas & Roche 2000 など) や、わずか2.2パーセクにある惑星質量天体 (Luhman 2014) も報告されているが、その形成メカニズムは、恒星同様に分子雲コアの収縮から形成されるか惑星同様の形成過程を経て原始惑星段階で系から放出されるか明らかではない。近年のアルマ望遠鏡等の深いサブミリ波観測から褐色矮星が生まれると予測される超低質量分子雲コ

²² Reprinted by permission from Springer Nature Customer Service Centre GmbH: Springer Nature, Nature, "A hot compact dust disk around a massive young stellar object"

²³ "Very Low Luminosity Young Cluster and the Luminosity and Mass Functions in S106" © AAS. Reproduced with permission.

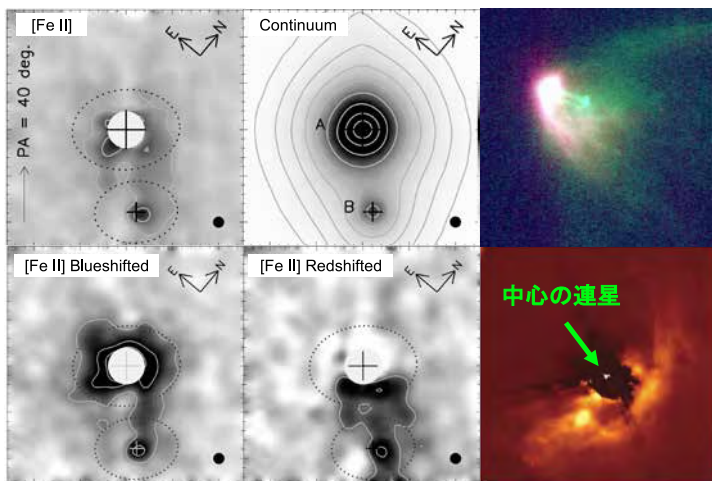


図3.1.26：左4つの図は、それぞれ、ジェミニ望遠鏡の観測によるぎょしゃ座UY星周辺の鉄イオン（左上）、1.6 μ mの連続光（中上）、視線速度から求めた青方偏移（左下）、赤方偏移（中下）を示す。右上はすばる望遠鏡の観測によるL1551-IRS 5の連星ジェット（Itoh et al. 2000）、右下はすばる望遠鏡の観測によるぎょしゃ座UY星の周連星を示す。

左図・中図 Credit: Pyo et al. 2014²⁴

右上図 Credit: NAOJ

右下図 Credit: Hioki et al. 2007²⁵

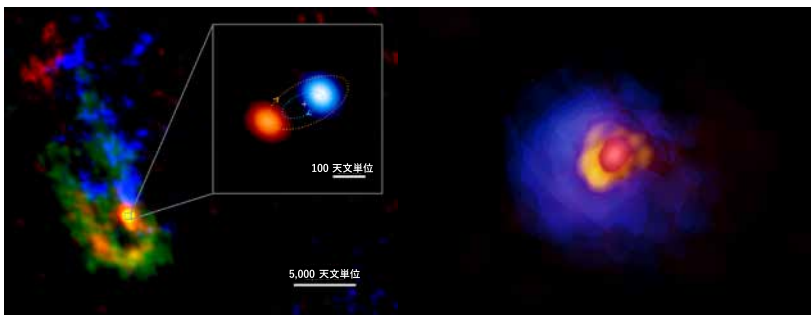


図3.1.27：左図は、アルマ望遠鏡によって捉えられた大質量連星系誕生の様子。右図は、連星系の母体となる分子雲コア（緑）と、それに埋もれた2つの原始星（青、赤）。原始星を円盤（赤、黄）と広がったガス（青）が取り囲む様子。円盤外側（黄）は重力不安定により非対称な構造をもち、今後、分裂して左図のような連星系に姿を変える可能性がある。アルマ望遠鏡では星周ガスの放射が観測される一方、TMTでは原始星からの放射を観測できるため、原始星そのものの性質を制限できる。

左図 Credit: RIKEN; Zhang et al. 2019

右図 Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO); Motogi et al.

アや惑星質量天体 (Oasa et al. 1999) の周りを取り囲む円盤も見つかり (Bayo et al. 2017)、これらと超低質量天体の関係を調べることも意義深い。しかし惑星質量天体周りの円盤はまだ一例に過ぎず、後述のようにすばる望遠鏡とTMTの更なる観測とアルマ望遠鏡との連携が、新たなフロンティアを切り拓くだろう。

3.1.4.3 連星の誕生

近年、重力波観測によって連星ブラックホール、または連星中性子星の合体が確認された (3.3参照)。これらの重力波源天体は、大質量星の連星が進化したものである。太陽質量程度より重い星は、過半数が連星として誕生すると考えられている。そのため、連星系の誕生過程の解明は、重力波源天体の起源のみならず太陽程度の質量をもつ星の形成進化を考える上でも重要である。TMTの高感度・空間分解能は連星を一つずつ分離するのに威力を発揮し、理解が大幅に進むだろう。

連星は、分子雲コアが収縮する過程で何らかの要因によって分裂が起きてできた二つのガスの塊が各々星になったと考えられている。しかし、単独星の場合と同様に連星が生まれる現場も高密度のガスに覆われているため観測が難しい。一方、単独星同様に連星もその誕生時にジェットを駆動することが分かっている。連星からのジェットは単独星の場合と異なり、各々の原始星から駆動する星由来のジェットと2つの原始星を取り囲む円

盤（周連星円盤）から駆動するジェットから成る。最近の近赤外線高分散分光観測から連星系を成す各々の星からジェットが駆動していることが示された (図3.1.26: 連星からのジェット)。理論計算から、これらのジェットは 0.1 km s^{-1} から 10 km s^{-1} 程度で回転していると考えられている (Machida & Basu 2019)。

TMTのIRIS、NIRESを用いた0.01秒角の高空間分解観測ではこれらのジェットを空間分解でき、TMTのMODHISの高い波長分解能（速度分解能）観測では、 0.1 km s^{-1} 以下の回転が特定できる。すなわち、すばる望遠鏡とTMTを組合せて双子の原始星（原始連星）からのジェットを詳細に観測できれば、原始連星の各々の星の質量、連星間距離、質量比など様々な物理量の決定が可能となる。そして、星は何故双子のように連星として誕生するのかを理解する手がかりが得られるだろう。

さらに、大質量星はその80%以上が連星系であることが知られている。そのため、連星系形成は大質量星形成の本質的課題と言える。高空間分解能を有するTMTを使えば、数キロパーセクの距離にある、数十天文単位以上の離角をもつ大質量原始星の連星系を空間分解できる。つまり、大質量原始星同士の連星系について、頻度、離角分布、質量と年齢の関係を調べることで、その起源や多様性を探ることができる。連星間の質量分配を明らかにできれば、初期コア質量に対する最大星質量の關係に制限を与え、初期質量関数の理解につながると期待でき

²⁴ “[Fe II] EMISSIONS ASSOCIATED WITH THE YOUNG INTERACTING BINARY UY AURIGAE *” © AAS. Reproduced with permission.

²⁵ “Near-Infrared Coronagraphic Observations of the T Tauri Binary System UY Aur” © AAS. Reproduced with permission. (一部改変)

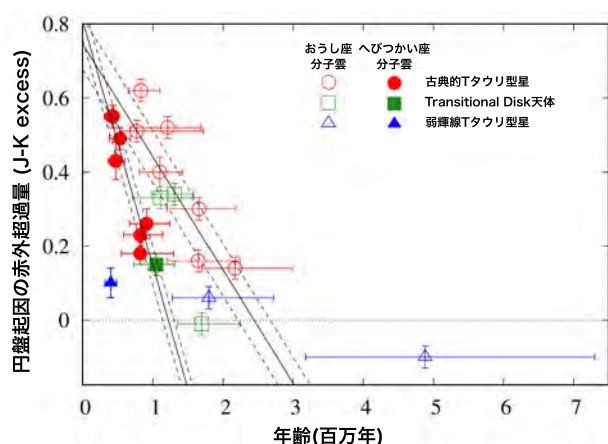


図3.1.28：おうし座分子雲とへびつかい座分子雲に属する若い天体（前主系列星）の年齢と原始惑星系円盤起因の赤外線超過量の関係。へびつかい座分子雲ではおうし座分子雲の約半分の時間で原始惑星系円盤が散逸する（Takagi et al. 2015）。

る。さらにコロナグラフを導入し、低中質量星を含んだ質量比の大きい連星も検出できると望ましい。近年アルマ望遠鏡によって、大質量原始星周りの円盤中のガス塊が自身の重力で収縮して円盤が分裂することによっておこる連星形成の兆候が報告されており（図3.1.27; Motogi et al. 2019; Zhang et al. 2019）、円盤の分裂がおこる半径と連星離角の統計的比較から原始連星の軌道進化を議論できる可能性もある。

他方、超低質量、即ち褐色矮星や惑星との連星頻度は質量によって違っても考えられており、その探査も興味深い。すばる望遠鏡のCIAO、HiCIAO及びSCExAOによるコロナグラフと補償光学観測からも幾つか発見されているが（Itoh et al. 2005など）、高空間分解能のTMTによる統計的観測で、褐色矮星/惑星等質量比の大きな連星率にも迫れる。

3.1.4.4 星・惑星系の形成・進化と分子雲環境

すばる望遠鏡やアルマ望遠鏡などの大型望遠鏡の観測により、太陽系外惑星や惑星の形成現場である原始惑星系円盤は多種多様な姿を持つことがわかってきた（3.1.1、3.1.3）。我々の太陽系を始めとしたこれらの惑星が、どのように生まれて進化したかを理解するためには、原始惑星系円盤をもつ若い天体（前主系列星）の情報を統計的に議論することが重要である。一般的に、太陽質量程度の前主系列星で形成される原始惑星系円盤は数百万年程度で散逸すると考えられている（Haisch et al. 2001など）。しかし近年の研究から、原始惑星系円盤の散逸過程は、分子雲やその周辺の環境に依存する可能性が明らかになった。太陽系周辺に比べ金属量が少ない銀河系外縁部にある星形成領域では、原始惑星系円盤の散逸時間が百万年以下である可能性が示唆され（Yasui et al. 2010）、近傍星形成領域の比較でも、大質量星の有無などの周辺環境の違いによって原始惑星系円盤の進化過程が異なる

可能性が提唱された（図3.1.28; Takagi et al. 2015）。

前主系列星と原始惑星系円盤の進化過程を深く理解する上で重要になるパラメータが年齢である。前主系列星の年齢を正確に求めるためには、有効温度や表面重力など、星の基礎的な物理量を精度良く導くことが不可欠である。これらのパラメータ決定は、星の大気スペクトル中の吸収線強度から求めることができる。加えて、近接する吸収線の等価幅比を活用することで、原始惑星系円盤に起因する放射に依存せずに、前主系列星の有効温度、表面重力、さらには金属量を求めることができる（Takagi et al. 2010, 2011）。他方、前主系列星は分子雲に埋もれていることが多く、可視光では暗く観測が困難である。そこで、集光力の高い大型望遠鏡と、減光の影響が少ない近赤外線の高分散分光観測が鍵となる。

これまでの前主系列星の高分散分光観測は、すばる望遠鏡の近赤外線分光撮像装置（IRCS）等で盛んに行われてきた。今後、すばる望遠鏡のULTIMATEに搭載が検討されている超高空間分解モードに、高分散分光モードを加えることができれば、より高感度、つまり暗い天体が観測できると期待できる。これまで太陽近傍（約150パーセク）の星形成領域にある前主系列星に観測が限られていたが、ULTIMATEの高感度観測では500パーセク以内にある前主系列星も観測できる。加えてTMTでは、HROS、NIRE、MODHIS等の可視光・近赤外線高分散分光器が有用となる。特に大口径・高感度をもつTMTのMODHISを組み合わせると、中心の前主系列星と原始惑星系円盤を区別して高分散スペクトルが得られるとともに、約2キロパーセクにある星形成領域の前主系列星の分光が可能となる。これらにより、形成環境による原始惑星系円盤の進化の多様性について、統計的に有意な議論が可能となる。

分子雲のガス/ダスト比や大質量星の輻射等周辺環境の違いは、原始惑星系円盤の進化とともに超低質量天体の形成や初期質量関数（3.1.4.5）にも影響を及ぼす可能性がある（Oasa et al. 2006など）。しかし、これまでの研究は観測の困難性から太陽近傍（<1キロパーセク）に限られていた。そこで、すばる望遠鏡で、銀河系の大半を占める遠方の星形成領域に観測を広げ、TMTでは系外の近傍銀河にも探査を広げる。ここでは、(A) 近赤外線測光観測から若い超低質量天体の検出/同定を行い、(B) 近赤外線分光観測とあわせて正確な質量と年齢を求める。これまですばる望遠鏡の多天体近赤外線撮像分光装置（MOIRCS）等が多用されてきたことから、これを改良したすばる望遠鏡のULTIMATEが(A)の目的に最適である。また、多天体分光モードが搭載されれば、(B)の分光追観測が実施できる。現在TMTの装置はKバンドまでしか検討されていないが惑星質量天体はLバンドで最も明るく輝くため、Lバンド測光観測を加えるとJ、H、K、Lバンドの4波長

における光度の比を調べた二色図やSEDを用いた議論も可能となる。従前のスピッツァー宇宙望遠鏡では空間分解能・感度ともに不足し、ジェイムズウェッブ宇宙望遠鏡(JWST)よりも細かく深く探査できるTMTの観測は、十分有意なデータとなる。加えて、アルマ望遠鏡で母体となる分子雲コアや超低質量天体周りの円盤について調べるほか、次世代赤外線天文衛星(SPICA)で長波長の赤外線測光データから分子雲環境が調べられると、相補的となるだろう。

すばる望遠鏡の広視野探査とTMTの高感度観測の連携により、分子雲を含む周囲の環境と星・原始惑星系円盤の形成・進化過程の理解が飛躍的に進み、統一的な解釈がされてきた星惑星形成論に一石を投じると期待される。

3.1.4.5 星の初期質量関数

星の質量は、誕生時にその大半が決定する。星の質量や初期質量関数は星自身の物理状態や銀河の形成・進化、宇宙の暗黒物質に影響を及ぼす。初期質量関数は、星の数が質量の -2.35 乗に比例する、つまり、質量が軽い星ほど個数が増加する関数で表されると提唱されている(Salpeter 1955)。しかし、太陽の10倍以上の質量をもつ大質量星や0.08倍以下の質量をもつ超低質量天体の初期質量関数がどのように表されるか、場所によらず普遍的な関数で表されるかは、未解明な点が多い。

大質量星の初期質量関数形状については、前述のように大質量星が希少で観測例が少ないため大きな不定性が残されており、観測的検証が必要である。大質量側の初期質量関数の物理的起源については、前述の円盤の分裂による連星形成(Zhang et al. 2019; Motogi et al. 2019)など10,000天文単位スケール以下での質量分配機構の解明が大きな鍵となる。特に、B型星²⁶のなかで温度が高い星(太陽質量の10-20倍)とO型星²⁶のなかで温度が低い星(太陽質量の20-30倍)は数が多く、フィードバックの強さが極めて大きく変わるため、質量分配機構の精密な理解が重要である。TMTの高空間分解能観測によって遠方の(原始)星団の星々を空間的に分解できれば、大質量側初期質量関数の正確なべきの決定や領域ごとの多様性の検証、さらに原始星段階での連星率の統計的理解などが進むと期待される。

他方、低質量側の初期質量関数及びその多様性についても、暗い天体ゆえの観測の困難さから不定性が大きい。すばる望遠鏡等の大型望遠鏡を用いた近赤外線観測から、近傍星形成領域における超低質量天体の初期質量関数は、母体となる分子雲や同時に形成される星の数密度、分子雲のガス・ダスト密度、大質量星の影響など分子雲環境による多様性が見られるほか、同一分子雲内でも局所的

な差異が報告されている(図3.1.25; Oasa et al. 2006など)。初期質量関数は低質量側に加えて大質量側も一様ではないことが示唆されている(Harayama et al. 2008など)。さらに、サブミリ波観測から求められた低質量分子雲コアの質量関数が、同一領域の近赤外線観測から求められた超低質量天体の初期質量関数と一致する例も示されている(Oasa et al. 2008など)。

初期質量関数の普遍/相違性、超低質量天体の形成過程や頻度などの問いに答えるためには、様々な環境で誕生した超低質量天体の探査、つまり3.1.4.4で述べたようにさらに遠方や多様な環境の星形成領域へと探査を広げることが肝要である。太陽近傍の星形成領域と、遠方の大質量星形成領域や銀河系外縁部の星形成領域では、そこで生まれる星の数や金属量、大質量星の紫外光、超新星の影響、母体となる分子雲の温度やガス・ダスト密度など、環境が多様である。加えて、銀河系と環境の異なる系外銀河における低質量星形成の議論がTMTにより初めて可能になると期待できる。さらに、従来のすばる望遠鏡に、集光力が高いTMTを活かした近赤外線測光分光観測を加えると、より信頼性の高い初期質量関数について統計的な議論を深めることができる。世界最高峰の視野と視力を誇るすばる望遠鏡とTMTを融合した本研究により、星の初期質量関数の普遍性と多様性を解く鍵が得られるだろう。

参考文献

- A'Hearn, M. F., et al. 2005, *Science*, **310**, 258
- Alibert, Y., & Benz, W. 2017, *A&A*, **598**, L5
- Anglada-Escudé, G., et al. 2016, *Nature*, **536**, 437
- Ansdell, M., et al. 2017, *AJ*, **153**, 240
- Aoki, S., et al. 2015, *Icarus*, **260**, 7
- Arakawa, M. 2019, *EPSC*, **13**, 915
- Barclay, T., et al. 2018, *ApJS*, **239**, 2
- Barucci, M. A., et al. 2006, *A&A*, **455**, 725
- Bate, M. R. 2018, *MNRAS*, **475**, 5618
- Bayo, A., et al. 2017, *ApJL*, **841**, L11
- Bergin, E. A., et al. 2013, *Nature*, **493**, 644
- Beuther, H., et al. 2017, *A&A*, **603**, A10
- Bitner, M. A., et al. 2008, *ApJ*, **688**, 1326
- Blum, J. 2018, *Space Science Reviews*, **214**, 52
- Bond, I. A., et al. 2004, *ApJ*, **606**, L155
- Brandl, B. R., et al. 2014, *SPIE*, **9147**, 914721
- Brown, J. M., et al. 2013, *ApJ*, **770**, 94
- Brown, M. E., et al. 2011, *ApJL*, **739**, L60
- Brunetto, R., et al. 2006, *ApJ*, **644**, 646
- Carr, J. S., & Najita, J. R. 2011, *ApJ*, **733**, 102
- Charbonneau, D., et al. 2000, *ApJ*, **529**, L45
- Cheng, A. F., et al. 2018, *P&SS*, **157**, 104
- Cruikshank, D. P., et al. 1998, *Icarus*, **135**, 389
- DeMeo, F. E., & Carry, B. 2013, *Icarus*, **226**, 723

26 恒星は吸収線スペクトルの種類と強度によって、温度の高い方からO型、B型、A型、F型、G型、K型、M型に分類される。

- DeMeo, F. E., & Carry, B. 2014 *Nature*, **505**, 629
- Doressoundiram, A., et al. 2008, *The Solar System Beyond Neptune*, **91**
- Fouchard, M., et al. 2018, *A&A*, **620**, A45
- Fukui, A., et al. 2019, *AJ*, **158**, 206
- Garrod, R. T. 2013, *ApJ*, **765**, 60
- Gillon, M., et al. 2016, *Nature*, **533**, 221
- Gillon, M., et al. 2017, *Nature*, **542**, 456
- Goto, M., et al. 2006, *ApJ*, **652**, 758
- Guyon, O., et al. 2018, *SPIE*, **10703**, 107030Z
- Haisch, K. E., et al. 2001, *ApJ*, **553**, L153
- Harayama, Y., et al. 2008, *ApJ*, **675**, 1319
- Hayashi, C. 1981, *Progress of Theoretical Physics Supplement*, **70**, 35
- Hernández, J., et al. 2007, *ApJ*, **662**, 1067
- Hioeki, T., et al. 2007, *AJ*, **134**, 880
- Hirano, S., et al. 2014, *ApJ*, **781**, 60
- Hoeijmakers, H. J., et al. 2018, *A&A*, **617**, 144
- Honda, M., et al. 2009, *ApJL*, **690**, L110
- Hueso, R., et al. 2018, *A&A*, **617**, A68
- Ito, T., et al. 2018, *Nature Communications*, **9**, 2486
- Itoh, Y., et al. 2000, *PASJ*, **52**, 81
- Itoh, Y., et al. 2005, *ApJ*, **620**, 984
- Jewitt, D. 2012, *AJ*, **143**, 66
- Jewitt, D., et al. 2015, *Asteroids IV*, 221
- Jovanovic, N., et al. 2015, *PASP*, **127**, 890
- Kasper, M., et al. 2010, *SPIE*, **7735**, 77352E
- Kawahara, H., et al. 2012, *ApJ*, **758**, 13
- Kawahara, H., et al. 2014, *ApJS*, **212**, 27
- Kawahara, H., & Masuda, K. 2019, *AJ*, **157**, 218
- Kepler, M., et al. 2018, *A&A*, **617**, A44
- Kobayashi, H., et al. 2005, *Icarus*, **177**, 246
- Kolokolova, L., & Kimura, H. 2010, *A&A*, **513**, A40
- Konopacky, Q. M., et al. 2013, *Science*, **339**, 1398
- Kraus, S., et al. 2010, *Nature*, **466**, 339
- Kuzuhara, M., et al. 2013, *ApJ*, **774**, 11
- Kwon, Y. G., et al. 2017, *AJ*, **154**, 173
- Kwon, Y. G., et al. 2018, *A&A*, **620**, A161
- Kwon, Y. G., et al. 2019 *A&A*, **629**, A121
- Lucas, P. W., & Roche, P. F. 2000, *MNRAS*, **314**, 858
- Luhman, K. L. 2014, *ApJL*, **786**, L18
- Machida, M. N., & Basu, S. 2019, *ApJ*, **876**, 149
- Mandell, A. M., et al. 2012, *ApJ*, **747**, 92
- Mansfield, M., et al. 2018, *ApJL*, **868**, L34
- Marois, C., et al. 2008, *Science*, **322**, 1348
- Matsushita, Y., et al. 2019, *ApJ*, **871**, 221
- Mawet, D., et al. 2017, *ApJ*, **838**, 92
- Mayor, M., & Queloz, D. 1995, *Nature*, **378**, 355
- McEwen, A. S., et al. 2011, *Science*, **333**, 740
- Mosser, B., et al. 2012, *A&A*, **540**, A143
- Motogi, K., et al. 2019, *ApJL*, **877**, L25
- Müller, A., et al. 2018, *A&A*, **617**, L2
- Najita, J. R., et al. 2010, *ApJ*, **712**, 274
- Nielsen, E. L., et al. 2019, *AJ*, **158**, 13
- Notsu, S., et al. 2017, *ApJ*, **836**, 118
- Oasa, Y., et al. 1999, *ApJ*, **526**, 336
- Oasa, Y., et al. 2006, *AJ*, **131**, 1608
- Oasa, Y., et al. 2008, *AJ*, **136**, 1372
- Öberg, K. I., et al. 2011, *ApJL*, **743**, L16
- Öberg, K. I., et al. 2015, *Nature*, **520**, 198
- O'Brien, D. P., & Greenberg, R. 2005, *Icarus*, **178**, 179
- Oka, A., et al. 2011, *ApJ*, **738**, 141
- Okada, T., et al. 2019, 50th LPSC, **1325**
- Pascucci, I., et al. 2011, *ApJ*, **736**, 13
- Pontoppidan, K. M., et al. 2010, *ApJ*, **720**, 887
- Poppe, A. R. 2016, *Icarus*, **264**, 369
- Porco, C. C., et al. 2006, *Science*, **311**, 1393
- Pyo, T. -S., et al. 2014, *ApJ*, **786**, 63
- Quantz, S. P., et al. 2015, *International Journal of Astrobiology*, **14**, 279
- Quintana, E. V., et al. 2014, *Science*, **344**, 277
- Raymond, S. N., et al. 2007, *ApJ*, **669**, 606
- Ricker, G. R., et al. 2015, *JATIS*, **1**, 014003
- Rigliaco, E., et al. 2013, *ApJ*, **772**, 60
- Rodler, F., & Lopez-Morales, M. 2014, *ApJ*, **781**, 54
- Roth, L., et al. 2014, *Science*, **343**, 171
- Salpeter, E. E. 1955, *ApJ*, **121**, 161
- Schultz, P. H., et al. 2010, *Science*, **330**, 468
- Seager, B. W. & Hu, R. 2013, *ApJ*, **777**, 95
- Shimaki, Y., et al. 2019, 50th LPSC, **1724**
- Snellen, I. A. G., et al. 2013, *ApJ*, **764**, 182
- Snellen, I., et al. 2015, *A&A*, **576**, A59
- Sparks, B., & Ford, C. 2002, *ApJ*, **578**, 543
- Spergel, D., et al. 2015, *arXiv:1503.03757*
- Stephen, G. W. 2019, *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, **377**, 20180161
- Stern, S. A., et al. 2019, *Science*, **364**, aaw9771
- Sugita, S., et al. 2005, *Science*, **310**, 274
- Suzuki, D., et al. 2016, *ApJ*, **833**, 145
- Takagi, Y., et al. 2010, *PASJ*, **62**, 501
- Takagi, Y., et al. 2011, *PASJ*, **63**, 677
- Takagi, Y., et al. 2015, *PASJ*, **67**, 87
- Tan, J. C., et al. 2016, *ApJL*, **821**, L3
- Tazaki, R., et al. 2019, *MNRAS*, **485**, 4951
- Tazaki, R., et al. 2016, *ApJ*, **823**, 70
- Terai, T., et al. 2016, *ApJ*, **827**, 65
- Testi, L., et al. 2016, *A&A*, **593**, A111
- Tsukagoshi, T., et al. 2019, *ApJL*, **878**, L8
- Villanueva, G. L., et al. 2015, *Science*, **348**, 218
- Wakeford, H. R., et al. 2017, *Science*, **356**, 628
- Walsh, C., et al. 2016, *ApJL*, **823**, L10
- Webster, C. R., et al. 2015, *Science*, **347**, 415
- Yasui, C., et al. 2010, *ApJL*, **723**, L113
- Yoshida, F., et al. 2019, *P&SS*, **169**, 78
- Zhang, Y., et al. 2019, *Nature Astronomy*, **3**, 517
- Zhu, Z. 2015, *ApJ*, **799**, 16
- 河原 2018、系外惑星探査、東京大学出版会 SBN978-4-13-062727-6
- 脇田茂・瀧哲朗・伊藤孝士 2019、遊・星・人、**28(2)**, 124

3.2

銀河進化のゆりかごから墓場まで

ほんの100年前までは、夜空には星や星雲、星団しか輝いていないと人々は考えていた。その後、望遠鏡と観測技術の発展により、「銀河」という星の大集団が遠い宇宙にいくつも存在し、われわれ自身も「天の川銀河」という1つの銀河に住んでいて、さらにこの宇宙は130億光年のかたまたまで銀河で満ち溢れている、という想像もしなかった世界観の変革があった。われわれはこれまでに数多くのことを学んだが、「銀河」を本当の意味で知るために解決しなければならない謎はまだ数多く残されている。銀河はいつどのように生まれたのか？宇宙再電離はいつどのように進んだのか？銀河はいつ星を作り、そしてどうして星を作るのをやめるのか？ブラックホールや銀河をとりまくガスとはどのような関係にあるのか？銀河同士の合体はどのように銀河を育てたのか？われわれにはまだ知らないことが多すぎる。しかし、これらの謎を次の20年間の間に解決できると期待させるだけの理由を、われわれはすばる望遠鏡とTMTに見いだすことができる。

本章ではすばる望遠鏡とTMTの連携によって銀河進化研究のフロンティアをさらに推し進めることが期待される4つのサイエンステーマ、「初代星、初代銀河、宇宙再電離」「超巨大ブラックホールと銀河の共進化」「銀河形成とバリオン物質の循環」「銀河の形態の起源と活動性の終焉」「銀河系と近傍銀河」について詳述する。遠方銀河探査のフロンティアを赤方偏移10以遠に延ばすと同時に、初代銀河の形成メカニズムを明らかにする。種ブラックホールを特定し、初期ブラックホール成長に制限を与え、銀河とブラックホールの共進化の物理的原因を解明する。ガス流入流出が銀河進化に及ぼす影響をより具体的に観測的に検証する。銀河の多様性、銀河の物理量間の経験則と時間進化など「集合体としての銀河」の理解から、銀河内部の基本的な物理的・化学的性質を解き明かすという手段の変革もありうる。あるいは、初代星、初代ブラックホール、宇宙で最初に星形成をやめた銀河、などの発見も大いに期待できる。いずれも銀河進化研究の根幹にかかわる重要なテーマであり、すばる望遠鏡の広視野機能

とTMTの大集光力の組み合わせによって2020年代に飛躍的な理解の進展が期待されるテーマである。

3.2.1

初代星、初代銀河、宇宙再電離

3.2.1.1 背景

現在の宇宙には性質・スケール共に多種多様な天体・構造が存在する。その中で、初代星・初代銀河はこれら多様な天体形成史の始まりといえる重要な天体である。そして、初代星・初代銀河は宇宙に最初に重元素を供給する源であり、また巨大ブラックホールが最初に形成される場所である。近年の数値シミュレーションにより、初代星形成過程は徐々に明らかにされつつある(Hirano et al. 2015)。一方、初代星ミニハロー¹の集積によって形成される初代銀河は、複雑なバリオン²物理過程のため、未だその形成・進化過程は謎に包まれている。したがって、初代銀河の性質を明らかにする事は現在の天文学において急務である。

また、初代星・初代銀河が引き起こしたとされる宇宙史上の重要な出来事の1つに宇宙再電離がある(以下、図3.2.1を参照)。宇宙誕生後およそ38万年経った頃、宇宙の温度が十分低下することで電離していた水素原子核が宇宙空間を漂う自由電子を取り込み中性化した。この宇宙中性化時の名残が宇宙マイクロ波背景放射として観測されている(Planck Collaboration 2018)。その一方で、現在の宇宙から約128億年前(宇宙誕生から約9億年後、赤方偏移6程度)の宇宙に至るまで、宇宙空間はほぼ完全に電離状態にあることがわかっている(Fan et al. 2006など)。したがって、何らかのメカニズムによって、宇宙は過去に中性から電離状態へと大きく転換したことになる。この宇宙史における一大現象を宇宙再電離と呼ぶ。現在の宇宙に存在する星の99%以上が宇宙再電離後に形成されたことから(Madau & Dickinson 2014)、宇宙再電離はその後の天体形成の初期条件を決める重要な現象であると言える。

1 銀河を大きく包み込むように分布しているダークマターの塊。

2 天文学では、ダークマターではなく通常の物質を構成する粒子という意味で用いられる。



図3.2.1: 初期宇宙史の概略図 (Loeb 2006 の図を改変)。宇宙誕生後数億年経過した頃に初代星・初代銀河等の宇宙最初の天体が誕生したと考えられる。これらの天体から生成・放射される高エネルギー電離紫外光によって周辺の宇宙空間 (主に中性水素ガス) が電離され始める。電離ガスが銀河を包み込むこの状態を電離バブルと呼ぶ。電離バブルがお互いに連結し徐々に電離ガス空間が広がり、宇宙年齢10億年 (赤方偏移にしておよそ6) までには宇宙空間がほぼ完全に電離したことが知られている。現在の宇宙に見られる多種多様な天体の形成・進化過程を知る上でその初期条件を決める初代星・初代銀河の性質を理解することが必要不可欠である。

Credit: Illustration by Jean-François Podelvin; Furlanetto et al. 2004

これら初代星・初代銀河・宇宙再電離を明らかにするためには、すばる望遠鏡とTMTの融合による観測戦略が鍵となる。すばる望遠鏡とTMTを組み合わせることで、初代銀河の観測能力を飛躍的に向上させ、統計的に研究する事が可能となる。それにより、初代銀河の形成メカニズムに加え、宇宙再電離への寄与を同時に明らかにする事ができるだろう。そして、この時代の重元素を含まない種族III星の星団からなる銀河を発見する事ができれば、世界初の初代星形成現場の観測的証拠となる。

3.2.1.2 すばる望遠鏡とTMTによる初代銀河探査

ハッブル宇宙望遠鏡やすばる望遠鏡による観測により、これまでに1000個を超える銀河が赤方偏移6 (宇宙年齢9億年) より遠方の宇宙で見つかっている (Bouwens et al. 2015; Ono et al. 2018 など)。一方、赤方偏移10以上 (宇宙年齢5億年未満) の宇宙に存在する初代銀河は、ハッブル宇宙望遠鏡のデータを全て使っても10個程度しか候補が見つかっておらず、ライマンアルファ輝線や金属輝線を使った分光同定もほとんどなされていない (Oesch et al. 2018; Bouwens et al. 2019 など)。唯一分光同定されている銀河 (GN-z11: Oesch et al. 2016; Jiang et al. in preparation) も典型的な銀河に比べて3倍も明るく (紫外光度³>3L_{*}、L_{*}は銀河の典型的な光度)、赤方偏移10を超える初代銀河の一般的な性質に迫ることはできていない。これは既存の観測装置の探査面積・感度の両方が初

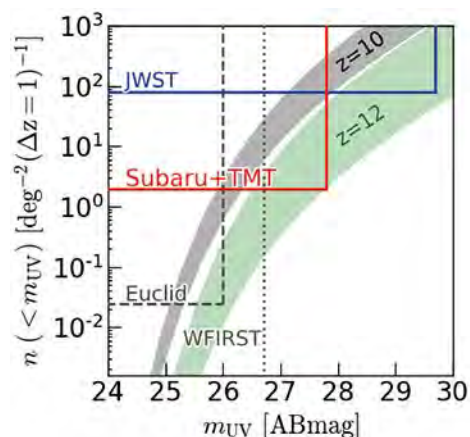


図3.2.2: 赤方偏移10を超える銀河が1平方度あたりに存在する個数 (個数面密度) の予想と各探査の観測範囲。黒色と緑色の領域は予想される赤方偏移10、12の銀河の個数面密度⁴。赤実線、青実線、黒破線、黒点線はそれぞれすばる望遠鏡とTMT、JWST、Euclid、WFIRSTによる探査で観測される等級と銀河面密度の範囲を示している⁵。

代銀河の探査には不十分なためである。

すばる望遠鏡のULTIMATEと次世代望遠鏡TMTはこの問題を解決し、2020年代の天文学において初代銀河探査をリードする。ULTIMATEの近赤外線撮像により、ライマンブレイク法⁶を使うことで赤方偏移10を超える初代銀河の候補を探索することができる。得られた銀河候補をTMTにより分光することで、後述のように初代銀河を同定しその性質を調べることができる。図3.2.2に示すように、ULTIMATEとIRISの組み合わせにより静止系紫外線での見かけ等級が26-28等 (典型的な銀河に比べて0.5-2.0倍程度) の明るさをもつ赤方偏移>10の初

3 光度はある天体から全方向に放射されるエネルギー総量。

4 銀河の個数密度が (1+z) の -0.25 乗、-0.6 乗で減少すると仮定して、z<10 の観測値を外挿して計算。

5 ULTIMATE については現在仕様策定の最中であり、ここに示す感度限界については理想的な状況を仮定している。

6 銀河間物質中の中性水素により、遠方銀河のスペクトルには91.2-121.6nmより短波長側に吸収がみられる。この吸収を複数の広帯域フィルター画像で捉えることで遠方銀河を選択する手法。

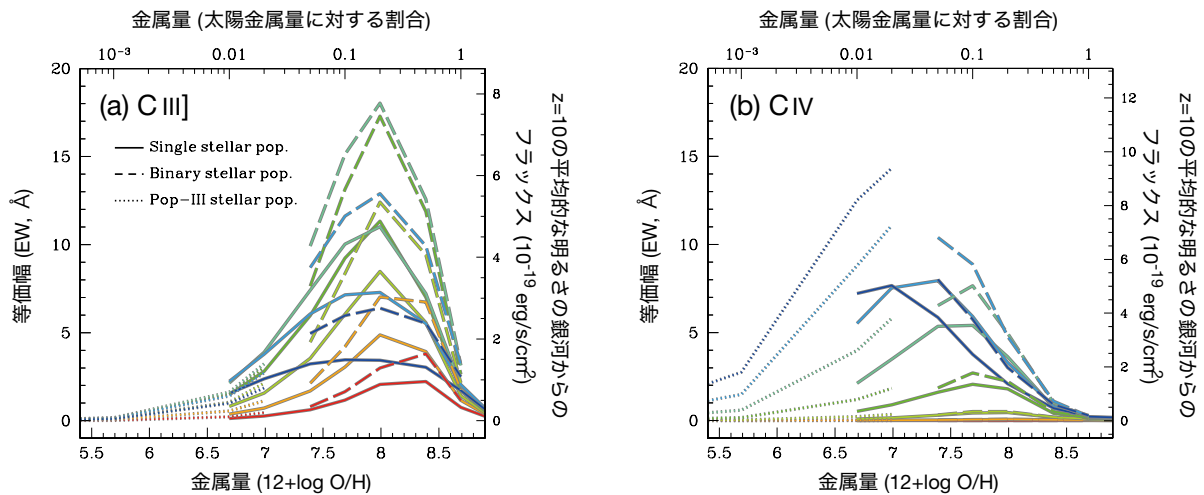


図3.2.3：光電離モデルに基づく炭素の電離輝線 (a) C III] λ 1909 と (b) C IV λ 1549 の輝線強度の金属量依存性。実線が従来の星種族モデル、破線が連星進化を含めた星種族モデル、そして点線が極低金属量の星種族（種族III）モデルを用いた結果であり、色の違いは異なるガスの電離状態を表す。左縦軸に等価幅（Å）、右縦軸に赤方偏移10の平均的な明るさを持つ銀河から期待される輝線フラックス（ $10^{-19} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ ）を示す。
Credit: Nakajima, K. et al. A&A, 612, 94, 2018, reproduced with permission © ESO. (一部改変)

代銀河を20-110個同定できると予想される。ジェームズウェッブ宇宙望遠鏡（JWST）による深宇宙探査では探査面積が不十分なため、赤方偏移10を超える初代銀河は10-60個しか見つからず、紫外線での明るさも典型的な銀河に比べて7割程度以下と暗いため、初代銀河候補が見つかったとしても分光観測による詳細な調査は難しい。一方ユークリッド衛星（Euclid）と広視野赤外線サーベイ望遠鏡（WFIRST）は観測波長の制限から赤方偏移10までしか探査できない。加えてEuclidの広視野探査では感度が足りず、紫外光度が典型的な銀河に比べて2倍以上明るい銀河しか探査できない。よって2020年代において、すばる望遠鏡とTMTの組み合わせは典型的な初代銀河の様子を知るうえで重要な手段であり、次世代の宇宙望遠鏡と比べても十分競争力がある。初代銀河のような個数の少ない天体を広視野観測で探し、分光同定により詳細に調べるという研究は、日本チームがまさに今までのすばる望遠鏡のSuprime-Cam、HSCを使って行ってきたことであり、日本のこれまでの経験を生かしてこの分野をリードすることが期待される。

3.2.1.3 初代銀河の物理的性質と宇宙再電離の理解

ULTIMATE等によって見つけ出された暗い初代銀河の詳細な性質を得る上でTMTの分光観測装置は必要不可欠である。近赤外線に感度のあるIRISや近赤外多天体面分光装置（IRMOS）を用いることで、赤方偏移6から12の遠方銀河に対して、水素の再結合線であるライマンアルファ輝線やヘリウムの再結合線、そして炭素や窒素、酸素といった主要金属の様々な電離状態の輝線が静止系遠紫外波長域（100-200nm）で観測可能となる。これらの

輝線強度比や等価幅⁷を光電離モデル予想（Nakajima et al. 2018など）で解釈することで、初代銀河のガスの物理状態（金属量、電離状態）を決定する。図3.2.3では炭素の電離輝線の等価幅の光電離モデル予想を載せている。この予想から、赤方偏移10の典型的な明るさの銀河であれば、TMT1晩の観測で太陽金属量の1%程というわずかな金属量の有無を探査することが可能となる。これは現在知られているどの銀河よりも低い金属量を赤方偏移10という遠方宇宙で検出する能力をTMTが有していることを表している。さらに3倍以上の観測時間をかければ、一桁以上低い金属量を測定し、原始ガスから誕生したばかりの銀河（種族III銀河）を同定することもできる。

IRISやIRMOSを活用し、10個以上の銀河の加算平均スペクトルを作成することで、種族III銀河特有の強いライマンアルファ輝線（Yajima & Khochfar 2017など）⁸やヘリウム輝線の検出、そして極端に弱い金属輝線（i.e. 太陽金属量0.1%以下に相当する金属輝線強度、もしくはその上限値）を確認することは十分可能である。

また、遠紫外輝線スペクトルは様々な電離状態の輝線を含むことから、初代銀河を構成する星の性質（星種族）、更には銀河の中心部から強い電磁波を放出する活動銀河核（AGN）を持つのかを調べるができる。興味深いことに、近年の観測によって赤方偏移6-9の銀河から高い割合で通常の星種族合成では説明のつかない高電離輝線スペクトルが観測されている（Mainali et al. 2018）。初代銀河ではより大質量の星が効率良く生成されている可能性もあれば、活動銀河核を持つ可能性もあり、その星種族に関しては未だ多くの謎が残されている。現在は10個ほどの明るい天体に偏った小さなサンプルによる議論にと

⁷ 輝線強度（フラックス）を連続光強度で規格化した量。

⁸ 宇宙再電離期の銀河からのライマンアルファ輝線は銀河間空間において吸収を受けやすくなるため必ずしも強く観測される訳ではないが、銀河が電離バブルに属する場合、十分観測可能である。次段落参照。

どまっており、TMTによる大きなサンプルを元にした分光観測によって初代銀河の平均的な星種族の描像が初めて手に入る。

以上のように、初代銀河の星種族とガスの詳しい性質を観測的に得ることで、初代銀河形成・進化に関わる複雑なバリオン物理過程の理解を飛躍的に深めることができる。では、これらの性質を持つ初代銀河は宇宙再電離を引き起こすことができたのであろうか？この問いに答えるためには、銀河内の星種族によって生成される電離紫外光のうち、銀河から宇宙空間へ放射される割合を更に知る必要がある。これを電離光子脱出率 (escape fraction, f_{esc}) と呼び、初代銀河の個数分布や星種族・ガスの性質と組合せることで宇宙再電離期における銀河の役割を結論づけることができる。宇宙再電離期の銀河間空間の光学的厚さによりこの物理量を直接観測することは不可能である (Inoue et al. 2014)。その代替案として、遠紫外スペクトルの吸収線を活用できる (Heckman et al. 2011 など)。吸収線の深さから星形成領域が中性水素ガスで覆われている割合 (covering fraction, C_f) を推定することができるため、覆われていない割合 ($1-C_f$) が電離光子の中性水素ガスによって吸収を受けずに銀河外へ出られる割合 (電離光子脱出率) に相当する。暗い遠方銀河からの吸収線の検出はこれまで非常に困難であったが、TMTのIRISは静止系紫外線の見かけ等級で約25等級 (AB) の銀河から3時間弱の観測時間で連続光を分光モードで検出する能力があり、本研究を躍進させる。静止系紫外線での等級が25等というのは、赤方偏移6での典型的な銀河より約1等、そして赤方偏移10では約2等明るい銀河に相当する。これら明るい銀河に対しては個別に、より暗い平均的な銀河に対しては10-40個ほどの銀河の加算平均スペクトルを作成することで連続光と付随する吸収線の検出が可能である。多天体分光モードを搭載するIRMOSを活用することで更に効率良く本研究を進めることができる。宇宙再電離の残された謎を解明する上でTMTの初代銀河直接分光観測が決定的な役割を果たす。

3.2.1.4 巨大電離バブルに包まれた初代銀河群を捕まえる

近年の観測により赤方偏移8を超える銀河が数多く検出された (Hashimoto et al. 2018; Bouwens et al. 2019 など)。また、JWSTにより、赤方偏移10を超える銀河が複数個分光同定されることが期待できる (Zackrisson et al. 2011 など)。従って、2020年代は、すばる望遠鏡とTMTによって、初代銀河を見つける事からその形成メカニズムを明らかにする時代に突入していだろう。そのためには、どのような領域を、どのようなアプローチで調べるか工夫が必要である。

近年のHSCによる銀河サーベイによって、宇宙再電離

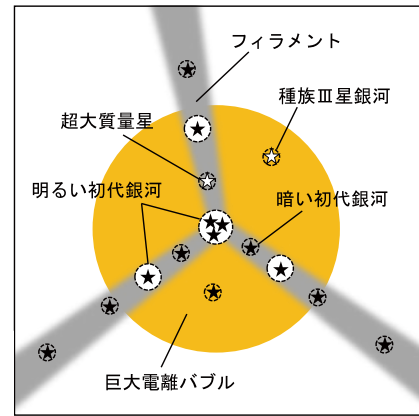


図3.2.4：赤方偏移10程度の時代の超高密度領域で予想される構造。フィラメントに沿った多数の初代銀河と付随する巨大電離バブル (直径数百キロパーセク以上)。明るい初代銀河付近では、輻射フィードバックによる種族III星銀河と超大質量星の形成も予想される。

終了時期である赤方偏移7付近において、多数の原始銀河団候補が発見されている。このような超高密度領域では、ライマンアルファ輝線が広がって観測されるライマンアルファブロップやサブミリ波銀河なども同時に密集していることが明らかになりつつある (Harikane et al. 2019)。それでは、宇宙再電離開始時期である赤方偏移~10の超高密度領域ではどのような天体形成や現象が起きているだろうか？理論的には、初期宇宙の超高密度領域において、現在の宇宙では見られないような激しい銀河形成を促進する、図3.2.4に示されるような興味深い現象が起きていると考えられる。それらはまとめると、(1) フィラメントに沿った初代銀河群の形成、(2) 初代銀河群による数百キロパーセク以上の巨大電離バブル形成、(3) 初代銀河からの輻射フィードバックによる種族III星銀河や超大質量星の形成などがある。

まず、ULTIMATEによる広視野サーベイにより初代銀河群候補を見つける。ライマンブレイク法によって、 $m_{\text{UV}}=26$ 等以上の明るい初代銀河の大域的分布を調べ、数百キロパーセク内の数密度が大きく超過している領域を見つける。その後、IRISでの撮像観測によって、暗い銀河 ($m_{\text{UV}}=28$ 等程度) まで捉える事でフィラメント構造を浮き彫りにする。また、TMTによる分光観測によって、ライマンアルファ輝線の有無を調べる。赤方偏移~10では通常ライマンアルファ輝線は銀河間ガスに遮蔽される。しかし、半径200キロパーセク程度以上 (physical scale) の巨大電離バブルが形成されている場合、銀河間ガス透過率は10%以上になり得るため (Yajima et al. 2018)、初代銀河群におけるライマンアルファ輝線の検出は巨大電離バブルの存在を示唆する。図3.2.5は、電離バブルと銀河間ガス透過率を考慮したライマンアルファ輝線銀河個数密度の理論モデルである。フラックス検出感度が $10^{-18} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ の場合、赤方偏移10程度では $n \sim 10^{-6} \text{ Mpc}^{-3}$ (Mpc: メガパーセク) の個数密度が期待できる。また、初代銀河による強い電離フィードバック下では、重

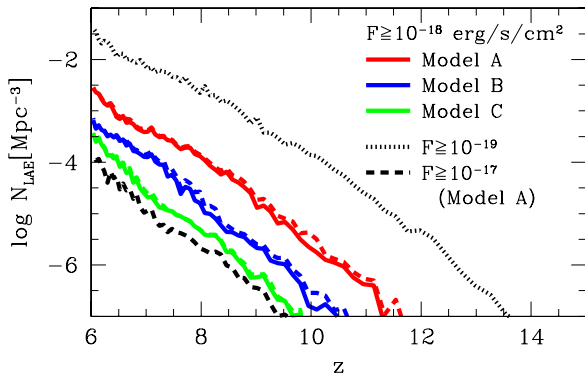


図3.2.5：各赤方偏移におけるライマンアルファ輝線銀河の数密度モデル。銀河周辺の電離バブル、銀河間ガスのライマンアルファ透過率も考慮されている。色の違いは銀河から放射されるライマンアルファ輝線プロファイルのモデルの違いをあらわす。

Credit: Yajima et al. 2018⁹

元素を含まない種族 III 星からなる種族 III 星銀河が形成されると考えられている (Visbal et al. 2016)。

そして、強い紫外線フィードバックによって水素分子破壊が続く場合は、10-100 万太陽質量の超大質量星が形成されうる (Regan et al. 2017)。この超大質量星は崩壊して巨大ブラックホールになるため、遠方キューサーとも密接な繋がりがある。超大質量星は 5000 K 程度の黒体放射をしており (Hosokawa et al. 2012)、全光度は $\sim 3 \times 10^{10}$ 太陽光度である。放射のピークの波長帯としてはスピッツァー宇宙望遠鏡 (Spitzer)、JWST、次世代赤外線天文衛星 (SPICA) の帯域となる。

このような研究は、すばる望遠鏡の超広視野、TMT の高感度観測が融合して初めて達成可能である。超高密度領域をすばる望遠鏡で見つけ、TMT による徹底的な調査によって、(a) 大規模構造における銀河進化メカニズム、(b) 宇宙再電離の始まり、(c) 輻射フィードバックと天体形成の関係について統合的に解明する事ができる。また、この分野における日本の数値シミュレーションは世界をリードしており、理論と観測を融合させることで世界に類を見ないユニークな成果を生み出すだろう。

3.2.2

超巨大ブラックホールと銀河の共進化

3.2.2.1 背景

21 世紀初頭の天文学の大きな成果として、多くの大質量銀河の中心に超巨大ブラックホール (太陽の 100 万倍以上の質量) があり、そのブラックホール質量と母銀河のバルジ質量 ($M_{\text{BH}}-M_{\text{bulge}}$ 関係) や恒星系速度分散 ($M_{\text{BH}}-\sigma$ 関係) とが比例関係にあると分かったことが挙げられる (Kormendy & Ho 2013 など)。空間的には 7 桁程度の大

きな隔たりがある構造の相関は、両者が様々な物理過程を通じて密接に相互作用して成長したことを示唆し、ブラックホールと銀河の「共進化」として認識されるようになった。すなわち「銀河進化」と「ブラックホール進化」の両者を複合的な視点で捉えることが、天体進化を理解するうえで重要だと考えられ始めたのである。さて、共進化の一翼を担う超巨大ブラックホールを宇宙の古今にわたって探査する最も一般的な手法は、「キューサー」と呼ばれる活動期のブラックホールからの明るい紫外放射を頼りにする方法である。2000 年代以降の大規模サーベイ観測の活躍により、宇宙初期のキューサー探査は現時点で宇宙誕生後 7 億年 (赤方偏移 7) の時代にまで到達している (Bañados et al. 2018 など)。驚くべきことに、発見された宇宙初期のキューサーの多くは現在の宇宙に存在する最大級のブラックホールと同程度の質量 (1-100 億太陽質量) を既に獲得していることが知られている。ところが、ブラックホールへの質量降着現象に臨界降着¹⁰の制限がある限りは、宇宙年齢 10 億歳以下の若い時代で既に太陽質量の 10 億倍に達する大質量ブラックホールを形成することは非常に困難である。そのため、巨大ブラックホールの「種」が初期宇宙でいつ・どこで・どのように生まれたか、そこからどのような過程を辿って進化したかは、観測・理論の両面から議論の対象となっている。また、諸々の観測的困難さから、それらのキューサーを宿主母銀河の性質 (星質量など) についても詳しいことは分かっていない。以下に述べるように、TMT 時代には現状の観測限界を超えて巨大ブラックホールの起源、そして共進化の成り立ちに迫る多くのブレイクスルーが期待できる。

3.2.2.2 超巨大ブラックホールの起源を探る

宇宙初期のキューサーは非常に稀な天体であるが故に、その探査には広い領域を観測することが必要となる。この点において集光力に長けた 8m 級望遠鏡の中で圧倒的な広視野観測能力を誇るすばる望遠鏡の競争力は高い。事実、現時点でも HSC による深い広域サーベイ観測で見つけた遠方天体候補に可視光分光観測をすることで、赤方偏移 4-7 の遠方キューサーが続々と発見されつつある (例えば、Matsuoka et al. 2016; Akiyama et al. 2018; 図 3.2.6)。近い将来には超広視野多天体分光器 (PFS) で大量の天体の可視光分光観測が進み、すばる望遠鏡の観測に基づく遠方キューサーの大規模サンプルの構築は飛躍的に進むだろう。TMT 時代には、このユニークなサンプルを用いて初期宇宙での巨大ブラックホールやその母銀河の性質を詳細に調べることが期待される。

まず、TMT の IRIS を用いた近赤外線分光観測によって、

⁹ Figure 11, “Modelling of Lyman-alpha emitting galaxies and ionized bubbles at the epoch of reionization”

¹⁰ 自己重力に対してガスと輻射による圧力勾配で静力学的平衡を保っているとしたとき、放射可能な光度の上限値 (エディントン限界) に対応する降着率

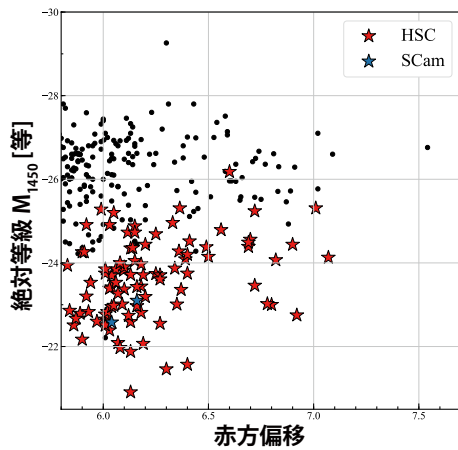


図3.2.6：現在までに発見された赤方偏移5.8以上のクェーサー赤方偏移一絶対等級分布。すばる望遠鏡で発見されたクェーサーを星で示した（赤：HSC、青：Suprime-Cam）。

HSCで見つかったクェーサーのブラックホール質量と質量降着率の分布に制限をつけたい。これまで発見された遠方クェーサーの多くは、その時代で最も明るい、つまり質量が重く質量降着率の高い種族に限られている。一方HSCクェーサーの光度範囲はこれと比べて約一桁暗く、ブラックホール質量が小さいことが期待される。ブラックホール成長のより初期の過程を知るためには、より質量の小さいブラックホールを同定することが重要である。ここで、TMTのIRISを用いて広い光度範囲にわたる巨大ブラックホールサンプルに対し質量測定を行うことで、初期宇宙から現在に至るまでの巨大ブラックホールの質量分布の時代推移を追うことができる。また、臨界降着の理論的制限を超えて急激に成長する若いブラックホールが同定されれば、初期宇宙でのブラックホール形成問題に対して解決の糸口が見えるかもしれない。

HSCクェーサーに対するもう一つのキーサイエンスが、ブラックホールのごく近傍領域である広輝線電離領域（高電離ガスが激しく運動している領域）の金属量測定である。クェーサーのスペクトルには電離した炭素や窒素、鉄といった金属原子からの輝線が見られるが、これらの輝線強度比は広輝線電離領域ガスの金属量、つまり銀河中心部での星形成史と結びついている。ここで興味深いことに、明るいクェーサーについては最遠方の赤方偏移7に至るまで広輝線電離領域金属量に時間進化が見られていない（De Rosa et al. 2014など）。これは母銀河の化学進化が宇宙初期10億年未満に早急に完了したことを意味する。一方でブラックホールと母銀河の共進化が初期宇宙に既に起こっているとすれば、低光度でブラックホール質量の小さなHSCクェーサーの中にはブラックホール成長と母銀河の化学進化が共に途上、ないしは初期段階にある種族が含まれていると期待される。上記の初期宇宙でのブラックホール質量測定とその広輝線電離領域金属量

測定には近赤外線分光観測が必要になる。現状の8m望遠鏡の感度では最も暗いHSCクェーサーに対して十分な質のスペクトルが得られていないが、IRISによる大規模観測によって精度の高い測定が初めて可能になると期待される。

赤方偏移7を超える「最遠方」クェーサー探査の重要性も強調したい。この時代のクェーサーはライマンブレイクが近赤外線の領域まで赤方偏移するため、近赤外線で見ると可視光で非常に暗い性質を持つ。2020年代にはEuclidやWFIRSTといった宇宙望遠鏡、そして東京大学のTAO望遠鏡による近赤外線サーベイ観測が予定されており、宇宙最初の天体形成から生じた初代クェーサーの発見が期待される。すばるコミュニティとしては北天領域におけるすばる望遠鏡のHSC可視光撮像で、これらのプロジェクトに貢献する。日本は遠方ブラックホールの分野で観測理論共に豊富な研究者を擁するため、発見後のTMTによる詳細観測も含めて遠方ブラックホール探査のフロンティアに挑み続ける意義は大きい。

近傍宇宙の観測と理論的考察から巨大ブラックホールの起源に迫る方法もある。現在観測されている恒星質量ブラックホールと銀河中心の巨大ブラックホールとの間の100-10万太陽質量の範囲（中間質量ブラックホール）はまだほとんど観測データがないフロンティアである。有力視されている種ブラックホール（質量降着等を経て超巨大ブラックホールになる前段階のもの）の形成シナリオではそれぞれ初期質量が異なるので、ブラックホールが存在しない質量範囲を特定することは形成シナリオを制限するために重要である。図3.2.7は、現在見つかったブラックホールの質量分布から種ブラックホールの質量に制限を付けた理論的研究の結果であり、種質量が全て10万太陽質量であるモデルは棄却されている（Shirakata et al. 2016）。より質量の小さな中間質量ブラックホールは、上記の質量ギャップを埋めて種ブラックホールに繋がりうるミッシングリンクであり、TMTが達成する大集光力と高空間分解能によって大きく理解が進展すると期待される。中間質量ブラックホールを直接観測できれば、種ブラックホールだけでなく母銀河との共進化関係の成り立ちにも新たな知見をもたらすだろう。具体的には、その存在が予想されている球状星団や矮小銀河中心をTMTのNIREX（およびAO）で高分散分光モニタリングし、ブラックホール重力圏にある星の運動を調べることが必要になる。さらには、中間質量ブラックホールの存在が疑われている超高光度X線源と呼ばれるX線天体についても対応天体の同定がTMTで可能になると期待される。超高光度X線源は連星系ブラックホール周囲の降着円盤¹¹からのX線放射だとされているが、未だ正体は不明である。TMTのIRISとAOによ

11 ブラックホールに周囲からガスが落ち込む場合、角運動量をもっているガスはまっすぐに落ちず、ブラックホール周囲に形成された円盤上を回転しながら落ちていく。これを降着円盤という。

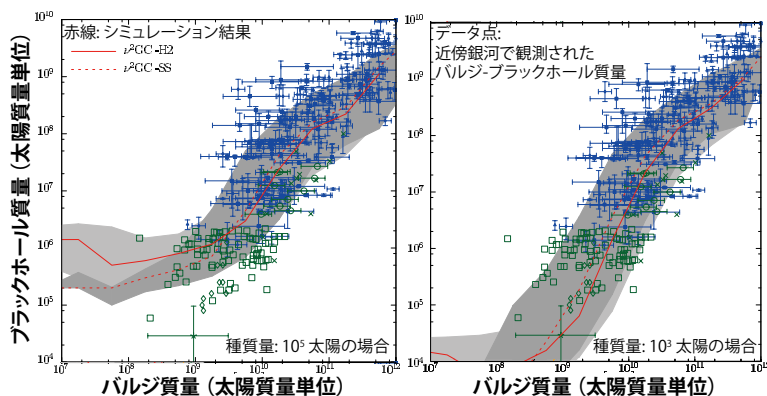


図3.2.7：準解析的モデルシミュレーション (v2GC) による赤方偏移0でのバルジブラックホール質量関係 (Shirakata et al. 2016, 図1を改変)。モデル予測を赤線と灰色部、観測値を点で示した。種ブラックホール質量を全て10万太陽質量 (左)、1000太陽質量 (右) とする。低質量側のモデル予測が大きく異なり、10万太陽質量の場合に観測値と合わないことがわかる。
Credit: Shirakata et al. 2016¹² (一部改変)

る面分光観測により、超高光度X線源の周りにみられるシェル状あるいはバブル状の輝線領域のガスの運動の様子を捉えられれば、ブラックホールの質量が求められる。伴星のスペクトル型や降着円盤の物理状態等も合わせて、この天体の正体の理解が大幅に進むだろう。

3.2.2.3 ブラックホールと銀河の共進化関係の起源解明に向けて

共進化関係を作り出す物理機構としては、銀河同士の合体に伴う爆発的星形成と活動銀河核の発現、それに続く中心核からのフィードバックによる星形成の抑制という過程が有力視されている (Hopkins et al. 2008 など)。そこでは必定、ブラックホール周辺から母銀河に至る様々な空間スケールでの物理過程がモデル化されており、TMTのような高解像度と高感度が両立する装置を用いた観測的検証が望まれる。

たとえば一つの観測的アプローチとして、「宇宙の古今にわたる共進化関係の変遷」を調べて物理モデルの時間進化予測と比較することが挙げられる。その際に重要な観測量となるのは、過去の質量獲得史の積分量としての「ブラックホール質量」・「星質量」と、その現在進行形の微分量としての「ブラックホール質量降着率」と「星形成率」だろう。現在のところ、赤方偏移が6-7を超えるような、遠方クェーサー母銀河に対しては、ALMAに代表される長波長帯の干渉計観測に基づく「力学質量」の測定が行なわれている (Izumi et al. 2019 など)。HSCで続々と見つかりつつある低光度クェーサーは、「大きなブラックホール質量の天体=明るいクェーサーほど観測されやすい」という従来の観測の傾向を排除して、当時の天体形成の一般的な描像をより適切に反映する天体サンプルを提供する。近年のALMA観測からは、こうしたHSCクェーサーは、赤方偏移~6の時点で近傍宇宙と同じ共進化関係に従う、ないしは近傍関係に対してより小さい質量のブラックホールを持つ傾向にあることが示唆された (図3.2.8)。これは共進化が、母銀河の成長に引き続いて中心ブラックホールが成長する、という質量獲得過程を経て達成され、なお

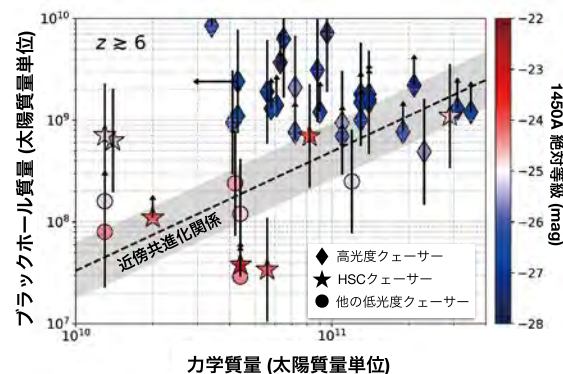


図3.2.8：ALMA観測で導出された母銀河の力学質量とブラックホール質量の比較図 (Izumi et al. 2019を改変)。灰色の帯部分が近傍宇宙での共進化関係 (ただし横軸は星質量となる) を表す。より低光度のクェーサーは近傍関係に沿う、または近傍関係よりもブラックホール質量が小さいという傾向にある。

かつその過程が極めて急激なものであることを要請しており、銀河合体に伴う急激な天体形成を支持するように思える。ただし、この手の研究には依然として (i) 星質量の直接測定がされていないために近傍宇宙でのブラックホール質量と星質量の関係との直接比較ができていない、(ii) 現状の8m級望遠鏡の感度限界により1億太陽質量以下のブラックホールの観測例が乏しく、ごく一部のパラメータ空間での限定的な議論しかできていない、といった問題点がある。これに対してTMTのIRISには、(1) 望遠鏡の大集光力を活かしてより小さいブラックホール質量の測定が可能、(2) 補償光学を駆使して0.01 - 0.02 秒角 (赤方偏移3以遠で~100パーセクに相当) という超高空間分解能を達成することで、クェーサー母銀河の放射を低光度天体でもはっきりと検出できる、という大きな利点がある。たとえば現在計画されているIRISの波長範囲の0.84-2.4 μ mでは、赤方偏移2-4程度の銀河の4000Åブレイクが捉えられ、星質量のより正確な測定、引いては近傍宇宙で測定された共進化関係との直接比較が初めて可能となる。

2020年代後半でも第一線の活躍が確実なALMAを用いた遠赤外線連続光や一部の微細構造輝線の観測からは、母銀河の塵に埋もれた星形成率の測定が可能である。これとは相補的に、ALMAと同程度の空間分解能を持つ

12 Figure 1, "Theoretical re-evaluations of the black hole mass-bulge mass relation - I. Effect of seed black hole mass"

TMTで電離輝線の観測を行なうことで、塵に埋もれていない領域の星形成率が銀河を解像した上で測定可能となる。これらを合わせた合計星形成率と、こちらもすばる望遠鏡とTMTの可視光・近赤外線観測から測定したブラックホール降着率とを、広い光度範囲の天体について調べることで、銀河進化のどの段階でブラックホール成長は活発化するのかを明らかにでき、理論モデルへの強い制限となる。たとえば、ブラックホールの成長の「勢い」の尺度であるエディントン比（クェーサー光度とブラックホール質量で定義される）が、星質量や星間物質の量で特徴付けられた母銀河の成長段階とどう関係付けられるかは興味深い調査対象である。一方、個々の天体の詳細な撮像分光観測とは別に、すばる望遠鏡を用いた広視野かつ高感度な可視光・近赤外線撮像観測も共進化の研究に役立ち、特に初期宇宙クェーサーの周辺環境の徹底的な特徴付けが重要である。銀河合体が共進化を促す重要な機構であるなら、クェーサーは銀河の密度超過領域に鎮座すると期待できる。HSCやULTIMATEによる広域撮像観測、ならびにPFSによる高効率な赤方偏移決定が鍵となる。

クェーサーを含む活動銀河核から吹き出す星間物質のガス流出（アウトフロー）は、中心核と母銀河を空間的に接続しうる物理過程なので、共進化関係の実現において重要だと考えられている。ここで、すばる望遠鏡とTMTの組み合わせはこのアウトフローの研究にも威力を発揮する。主に低光度のセイファート銀河とよばれる種族を対象とするこれまでの近傍宇宙の活動銀河核の観測からは、そのX線から赤外線に至る幅広い波長範囲の電離ガス輝線でアウトフローに特徴的な輝線ないしは吸収線の形状が確認されている（King & Pounds 2015など）。TMTのIRISを用いれば、同様の観測が比較的遠方（たとえば[OIII] 5007輝線の場合だと赤方偏移3.7程度まで）のクェーサーまで、空間的に分解した観測が可能である。クェーサーは宇宙で最も明るい活動銀河核種族であり、しかるに活動銀河核による銀河の進化への影響（いわゆるAGNフィードバック）が最も強力に作用する現場だと期待できるので、そのアウトフローの性質を空間情報を交えて研究する意義は大きい。アウトフローガスがどこで発生したのか、その加速機構は何なのか、といった重要問題に中心核近傍を解像しながら挑むことが望まれる。特に赤方偏移 ~ 2.4 程度までは[SII]輝線が観測可能なので、二重線の強度比から電離ガスアウトフローのガス密度、ひいてはどれくらいの質量のガスが噴出しているかを導出できる利点がある（Kawaguchi et al. 2018）。もちろん、より低赤方偏移の天体については、WFOSの面分光機能で同じ測定が可能である。このような詳細な面分光用の母サンプルは、たとえば[SII]二重線の高品質測定がなされているべきである。そのようなサンプル構築には、大集

光力を活かしたPFSによる多天体分光が役立つ。得られた結果を同等の空間分解能を持つALMAを用いた低温分子・原子ガスアウトフロー観測と比較することで、中心核近傍から母銀河まで一貫して、全ての相の星間物質（星形成活動の母体）に対するAGNフィードバックの様子を完全に明らかにすることができる。

3.2.3

銀河形成とバリオン物質の循環

3.2.3.1 背景

現代宇宙論において、宇宙の階層的構造形成は物質の主成分であるダークマターによって支配されている。一方で、銀河の形態や性質の決定には物質の残り17%を占めるバリオン物質（電磁波によって知覚できる通常の物質）が主要な役割を担っており、この物理過程を明らかにすることは天の川銀河を含む銀河の形成史および銀河の多様性を理解する上で極めて重要である。本節では銀河の形成を根底から支えるバリオン物質を取り巻く物理現象について俯瞰し、「すばる望遠鏡とTMT」で期待されるビッグサイエンスを概説する。

銀河の形成と進化において、ガス降着・星形成・フィードバックの3つの物理現象を根幹とするバリオン物質の循環が重要な役割を果たす（図1.2）。星の材料となるガスは銀河間空間から供給され、銀河の内部では冷えて凝縮したガスから大小様々な星が生まれる。中でも太陽質量の8倍以上の大質量星は超新星爆発を引き起こし、膨大なエネルギーを放出し、周囲のガスを加熱する。超新星爆発の影響は規模によっては銀河周辺部に達し、ガス降着を阻害し、銀河スケールでのアウトフローを生じさせる。このような星形成活動に伴う現象、特に次に起こる星形成を抑制する効果をフィードバックと呼ぶ。バリオン物質の循環はこのようにして銀河の内外に渡ってその形成と進化を支配し、今日の銀河宇宙の多様性を生み出している。

銀河形成とバリオン循環との関係を紐解くには、今日見られる銀河の多様性が確立する以前の宇宙を調べる必要がある。赤方偏移1から3は銀河形成が最も活発であった「宇宙の激動期」として知られており、現在の銀河宇宙の成り立ちを知る上で最も注目すべき時代である。宇宙激動期の銀河の星形成率は現在の銀河のおよそ10～100倍もあり、頻発する超新星爆発によってフィードバック効果も大きくなる。これに打ち勝って高い星形成率を維持するためには、外部から大量のガスを供給する必要があり、ガスの流出入は現在よりも遥かに激しかったと考えられる。この時代はまさに、バリオンが宇宙の中をダイナミックに循環していたのである。

様々な物理現象が複雑に絡み合うバリオン循環を包括的に理解するためには、100パーセク程の星形成領域から、

その100万倍大きな大規模構造という広範なダイナミックレンジに渡って展開される様々な現象を、高い分解能かつ深い観測によって捉える必要がある。各空間スケールでの主な課題は次のようにまとめられる。

- $10^6 \sim 10^8$ パーセク：宇宙のバリオン分布、大規模構造が銀河進化に与える影響
- $10^4 \sim 10^6$ パーセク：銀河と銀河間空間を往来するバリオン流動のダイナミクス
- $10^2 \sim 10^4$ パーセク：宇宙の激動期における星形成の制御機構

すばる望遠鏡主焦点装置群の比類なき探査能力とTMTの高い集光力を最大限に活用することで初めて可能になるサイエンスケースを、この3つのスケールに分けて説明する。

3.2.3.2 宇宙のバリオン地図 ($10^6 \sim 10^8$ パーセク)

宇宙にはダークマターによって形作られるクモの巣状の大規模構造が広がり、その中ではシートやフィラメント構造、フィラメントの結合点であるノット、広範囲に渡って物質がほとんど存在しないボイド（空洞）といった特徴的な構造が成り立っている。宇宙のバリオンのおよそ半分は銀河に束縛されることなく、希薄なガスとして大規模構造に沿って分布していると考えられている（図1.2）。このように銀河と銀河の間の空間に存在するガスを銀河間物質（Intergalactic medium; IGM）と呼ぶ。銀河間物質はガスの貯蔵庫として銀河の進化に強く影響を及ぼしており、ダークマターが主役となる宇宙論的構造形成論と銀河進化を扱う天体物理学の両者に深く関与する銀河間物質の存在量や分布を調査し宇宙論との整合性を検証すること、そして大局的バリオン分布が銀河進化に与える影響を理解することは現代天文学における最重要課題の一つである。

銀河間物質は非常に希薄で自らはほとんど光を出さないため直接観測が極めて難しい。しかし背景にある天体の分光スペクトルに刻み込まれる吸収線を調べることで、手前にあるガスの視線方向距離や密度などの物理状態を知ることができる。銀河間物質の大部分は電離された水素であるが、電離されずに残っている中性水素も含まれており、その割合は概ね一定であると考えられている。そのため、中性水素によって生じるライマンアルファ吸収線は背景天体の手前にある銀河間ガスの分布を調べるのに最適な吸収線である。さらに多数の背景光源を観測して視線を密に得ることで、手前の銀河間ガスの3次元構造を復元することも可能になる。このような観測はIGMトモグラフィーと呼ばれ、高赤方偏移宇宙の大規模構造をほぼ無バイアスに探査できる唯一の手法として期待されている（図3.2.9）。

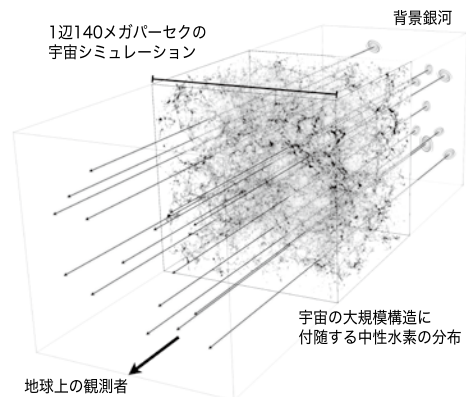


図3.2.9：IGMトモグラフィーの概念図。遠方にある背景銀河から放射された光が手前にあるIGMを通過し、我々の元に届く様子を表している。宇宙論的シミュレーションによって得られた中性水素の密度分布がグレースケールで示されている（Shimizu & Nagamine in preparation）。シミュレーションボックスの1辺の長さは共動距離¹³で140メガパーセクで、天球面上の面積はPFSの3視野分に相当する。

すばる望遠鏡の主焦点装置群はTMT時代にあっても比類なき探査能力を提供する。PFSは1.3平方度という巨大な視野の中で約2000天体の銀河の同時観測が可能で、夜空の広い範囲に渡って多数の背景銀河を観測する必要があるIGMトモグラフィーに最も適した装置である。赤方偏移2-2.5のIGMトモグラフィーを行う場合は、赤方偏移2.5-3.5の星形成銀河が背景天体となる。フィラメントやボイドなどの基本的な構造を見分けるためには、平均3-4メガパーセクの分解能が必要であり、銀河の数密度を考慮すると背景光源として24.7等級（*g*バンド）の銀河まで観測すればよい（Lee et al. 2014）。PFSならば最大10時間程度の積分時間で吸収線の解析に必要なS/N比が達成される。

さらに小スケールの構造、ノットやフィラメントの大きさを高精度に決定するためには、背景光源の面密度を上げる必要があり、より密度の高い、暗い背景銀河まで観測しなければならない。また低密度ガスを捉えるためには、より微弱な吸収線を測定する必要がある。これらを実現するために、高い集光力を持つTMTに搭載される多天体分光器WFOSを用いる。WFOSは次世代超大型望遠鏡装置の中でも突出した感度を持ち、PFSと同等の積分時間でおおよそ2等級深い観測が可能となる。より暗い背景銀河まで観測が可能になることで、約1メガパーセクスケールの空間分解能を達成できる。あるいはPFSの限界等級付近の背景銀河に対しては柱密度が約半分の水素ガスまで捉えることができる。広視野のPFSで広範なバリオン地図を描き、高集光力のTMTのWFOSで特徴のある領域を掘り下げる。両者がタッグを組むことによって銀河間空間に拡散する水素ガスの総量と分布をよりよく制限することができ、これまでにない高精度のバリオン地図を作成できる。

13 宇宙膨張とともに動く座標（共動座標）で測られる距離のこと。

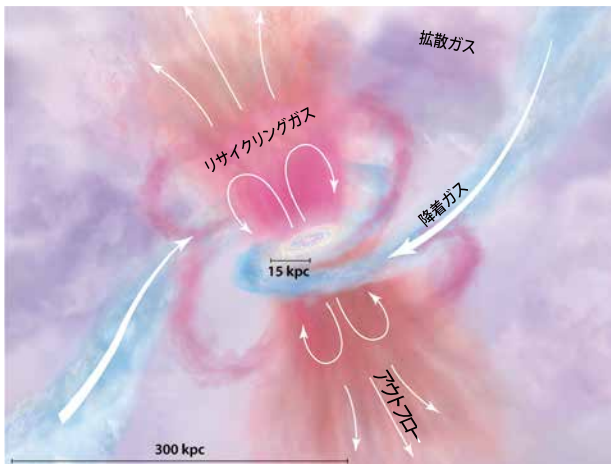


図3.2.10：銀河周辺物質の概念図。銀河面に流れ込む降着ガスやアウトフローガス、そのうち銀河に再降着する成分、銀河の周りに薄く広がる拡散ガスが描かれている。

Credit: Tumlinson et al. 2017¹⁴

3.2.3.3 銀河を取り巻くガスのダイナミクス ($10^4 \sim 10^6$ パーセク)

銀河間物質のうち、銀河から1メガパーセク程度までの銀河周辺環境に存在するガスを特に銀河周辺物質と呼ぶ。図3.2.10は銀河周辺物質のイメージ図である。銀河周辺物質は銀河と銀河間物質の橋渡しを担っており、銀河間空間から銀河へ流れ込む降着ガス、銀河から吹き飛ばされるアウトフローガス、ハローの重力ポテンシャルにより加熱された拡散ガスで構成されており、各成分はそれぞれ異なる物理状態、ダイナミクスを示すと考えられる。しかし、このような描像はこれまでのわずかな観測的研究やシミュレーションによって示唆される不確定なものであり、TMT時代における観測的検証が求められる。

星形成極大期の銀河が示す高い星形成率は、外部からの大量のガス流入なしには説明できない。銀河周辺物質を介して銀河間物質が銀河へ流れ込むことで、星形成活動が維持されていると考えられている。しかし、ガスの流入がどのように起こるのかははっきりしたことはわかっていない。特に大質量ハローでは、降着ガスは衝撃波加熱の影響を受けるため効率的なガス供給を行えないという問題がある。一方、高分解能の銀河シミュレーションでは、ガスがフィラメント状に集まって落ちていくことで加熱することなく銀河円盤まで降着するコールドストリームと呼ばれる現象が再現されており、観測による検証が急務となっている (Dekel et al. 2009; Stewart et al. 2017)。

一方、銀河の星形成活動を抑制するフィードバックのメカニズムは、アウトフローガスの観測を通して理解が進むと期待されている。銀河から飛ばされたアウトフローガスは、再び銀河に降着するもの (リサイクリングガス) もあれば、銀河間空間へ飛ばされるものもある。例えば、アウトフローガスに付随すると考えられる Si^{3+} などの金属

イオンの分布を、吸収線を用いて測定することで、吹き飛ばされた物質の行き先を追跡し、物質が銀河の内外へとどのように分配され循環しているのかを明らかにできる (Oppenheimer et al. 2018)。

吸収線系を用いて銀河周辺物質を調べるためには、手前にある調べたい銀河 (前景銀河) とそれに隣接する背景光源のペアを観測する。前景銀河の観測には、ULTIMATEを用いる。背景光源にはIGMトモグラフィーと同様に銀河を利用する。背景光源として銀河を用いる場合、これまでの観測では微弱な金属吸収線を解析するために、多数の背景銀河スペクトルを平均化する必要があった (Steidel et al. 2010)。しかし、TMTのWFOSで得られる高品質の背景銀河スペクトルを用いれば、個々の吸収体 (ガス雲) の密度や運動状態と銀河の性質を調べることが可能になる。TMTとすばる望遠鏡によって、様々な距離や位置関係にある前景銀河と背景銀河のペアを多数観測することで、ガス降着やアウトフローのメカニズムを解明し、銀河周辺物質の描像を確立する。

3.2.3.4 銀河内部の物理現象 ($10^2 \sim 10^4$ パーセク)

銀河のバリオン循環は絶妙なバランスで成り立っている。例えば我々の住む天の川銀河では、バリオンの20%程度が星として観測されており、残りの多くは分子ガスや電離ガスといった様々な相状態のガスとして存在する。バリオンに対する星の割合はダークマターを含むハロー質量によってある程度決まっており、一般に軽い銀河になればなるほど低くなることが分かっている。これは軽い銀河であるほど星を作る効率が低い、つまりフィードバックの影響が大きいことを意味する。同じ質量の銀河であっても星の割合にはばらつきがあり、このバリオン循環のバランスの違いが今日の多種多様な銀河の形態や色を生み出していることが理論的に示唆されている (Schaye et al. 2015)。

宇宙激動期では銀河の星形成活動が平均的に現在よりも10倍以上高く、天の川銀河も例外ではない。したがって銀河の形成を阻むフィードバックの規模も一層大きいたことが期待され、実際に星間ガスは現在よりも高温で、乱流運動が非常に高まっていることが報告されている (Förster Schreiber et al. 2009)。ゆえに激動期の星間ガスは極めて不安定な状態にありながら、それらをうまく制御することで高い星形成を保っている。この自己制御機構を明らかにするためには銀河全体の物理性質にとどまらず、内部の星形成領域やフィードバックの現場を直接分解して捉えなければならない。

ULTIMATEは世界有数の近赤外線探査能力を有しており、宇宙激動期にある銀河の星間ガスの金属量や物理状態を網羅的に調べ上げ、それらの規則性や普遍性を一

14 Reproduced with permission from the Annual Review of Astronomy and Astrophysics, Volume 55 © 2017 by Annual Reviews, <http://www.annualreviews.org>

同に暴くことができる。次にこの中から代表的な銀河を抽出し、TMTのIRISで追観測を行う。TMTの補償光学を駆使すれば現行装置の10倍高い分解能を発揮するため、100億光年以上離れた銀河であっても100パーセク規模で分解して観測することができる。これまでほぼ一つの点源としてしか見えなかった銀河の内部構造が詳細に捉えられ、内部で起こる諸処の物理現象を紐解くことが初めて可能となる。まず、水素の再結合線から各星形成領域の星形成率が分かる。また酸素や硫黄の1階電離輝線から各星形成領域から生じる電子密度に制限を与えることができるため、フィードバックと遠方銀河の激しい乱流運動との関係性が調べられる。さらに輝線の輪郭からバリオンの流出量も推定できる (Newman et al. 2012)。こうしてIRISによって銀河内部の物理現象が続々と解明され、銀河内部の物理現象がもたらす銀河の形態や性質の変遷について新しい知見が得られるであろう。

さらにIRISの面分光装置に偏光観測の機能が加われば、星形成によって作られたダストの力学的運動も求めることが可能となる (Yoshida et al. 2019)。金属量に富むダストの流出過程が明らかになることで宇宙に分散した金属に対して新しい制限を与えることができる。

本節では3つの異なる空間スケールで銀河の内外で起こるバリオン循環に関わる物理現象を紹介し、研究提案を行った。局所的スケールから大局的スケールに渡るバリオンが担う物理現象は互いに密接に関連し、宇宙全体の物質循環システムを構築している。それぞれ世界最高峰の視力と視野を誇るTMTとすばる望遠鏡が互いの持ち味を活かし協力して観測を行うことで、宇宙全体のバリオン循環の統合的研究が初めて実現する。

3.2.4

銀河の形態の起源と活動性の終焉

3.2.4.1 序章：銀河活動終焉史のはじまり

近年の地上大型望遠鏡やハubble宇宙望遠鏡による可視光・近赤外線観測により、幅広い時代における銀河進化の様子を垣間見ることが可能となってきた。特に「銀河の激進化期」と言われるおよそ赤方偏移1-3の宇宙では、銀河の星形成率が近傍星形成銀河と比べ10倍から100倍ほど高く (Speagle et al. 2014)、我々の銀河系や近傍で見られている多くの大質量銀河が形成されている真っ只中である。

一方で、この激進化期において、既に星形成活動を終えた大質量銀河が存在することも知られてきた (Cimatti et al. 2004など)。これらの星形成を終えた大質量銀河は、

既に星質量が 10^{11} 太陽質量以上と近傍の早期型¹⁵銀河の星質量に匹敵する。これらの銀河が激進化期になぜ、そしてどのようにして星形成活動を止めたかは未だに謎に包まれている。これらの大質量銀河の形成過程を理解するには、広い視野でのサーベイ観測を得意とするすばる望遠鏡と、高い空間分解能・感度に達するTMTによる連携した撮像・分光観測が鍵となってくる。

3.2.4.2 銀河構造から探る星形成活動の終焉

銀河の激進化期と言われるおよそ赤方偏移1-3 (宇宙年齢が20-60億年ほど) の宇宙では既に星形成活動を終えた大質量銀河が存在することが近年の観測により知られてきた。この時代に見つかっている星形成を終えた大質量銀河は、既に星質量が 10^{11} 太陽質量以上と近傍の早期型銀河に匹敵し、近傍早期型銀河から推測されている大質量銀河の形成史と矛盾しない。しかしながら、それらの銀河種族は近傍の大質量早期型銀河に比べると、半径が平均でおよそ1/5と小さいことが知られている (Trujillo et al. 2007; Kubo et al. 2018)。これらの銀河がどのようにして星形成活動を止め、そしてそれはコンパクトな形態とどのような関連があるのかなど多くの関心を集めてきた。

その物理的な理解を深める上で、特に銀河のバルジ形成と星形成活動の相関が注目されてきた。銀河のバルジ形成には多様な物理過程が伴うが、その多くは星形成活動の低下に加担していると考えられている。例えば活動銀河核や激しい星形成によるガスの加熱・消費によるものである。一方で、バルジが形成されると銀河は中心密度を増やし、その見た目の大きさは小さくなる。これは星形成を止めた銀河が同程度の質量を持つ星形成活動銀河よりも平均的に小さいサイズである観測とも矛盾せず (Morishita et al. 2014; van der Wel et al. 2014)、理論的研究からも再現が可能である (Martig et al. 2009; Dekel et al. 2014)。しかしながら、この解釈は比較されている二つの銀河集団種族 (サイズの“大きい星形成銀河”と“星形成を終えた銀河”) が同じ形成史を辿るという仮定に基づいている。つまりこのシナリオでは観測された銀河性質の相関を説明する事はできるが、あくまで解釈の一つであるということにとどまっている (Lilly & Carollo 2016)。

このような理由から、異なる種族の銀河集団を比較する間接的な手法だけでなく、個々の銀河の形成史を直接的に調査することが必要となってくる。

個々の銀河の形成史はそれを構成する星種族¹⁶から調べることができる。観測される銀河の性質は、星形成やそれに伴う重元素汚染¹⁷、フィードバック過程、周囲の環境からの質量降着などの複雑な相互作用によって決定される。そ

15 楕円銀河とレンズ状銀河を合わせて早期型銀河とよぶ。

16 星形成を止め、OB型星の寿命が尽きたあとの星種族の情報は静止系可視光のスペクトルに刻み込まれており、分光観測をおこなわなければ、パラメータの縮退を解いて正しい情報を引き出すことができない。

17 原始組成のガスが星形成由来の重元素合成によって金属量を増加させた状態。

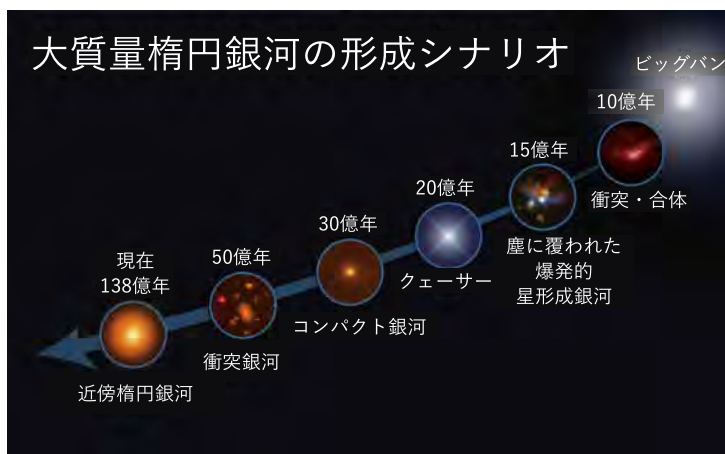


図3.2.11：130億年にわたる大質量楕円銀河の形成過程として提案されているシナリオ。初期に銀河同士の衝突合体を繰り返し、大規模な爆発的星形成（バースト）で急激にその恒星質量を増加させ、一方では衝突合体に伴う銀河中心部へのガスの流入によってクエーサー活動が誘起され、莫大なエネルギーが放出されることで星形成材料となるガスが吹き飛ばされてコンパクトな形態をもった星形成の終焉を迎えた銀河が残される。このようなシナリオが実際に正しいのかどうかを実証的に検証するため、本節で述べるような運動学的性質や星種族について詳しく調べる必要がある。

Credit: NASA, ESA, S. Toft (Niels Bohr Institute), and A. Feild (STScI)

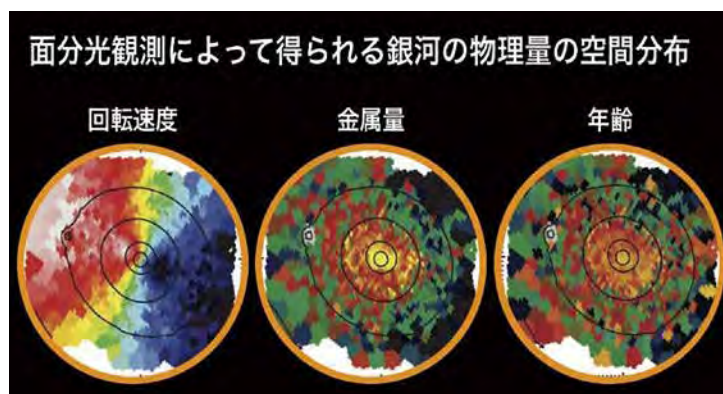


図3.2.12：近傍銀河NGC 4459の面分光観測から得られる星成分の回転速度・金属量・年齢の空間分布
Credit: Kuntschner et al. 2010¹⁸（一部改変）

の結果が恒星の物理・化学状態に刻み込まれているため、星種族を詳細にしらべることが、個々の物理過程の影響の程度を明らかにするために欠かすことができない。

これまでに行われてきた赤方偏移2-4程度の大質量銀河の分光観測からは、その形成時期はおおよそ赤方偏移4-6であるということが示唆されている (Schreiber et al. 2018; Tanaka et al. 2019)。これら的大質量銀河はおおよそ1-10億年ほどの短い間に現在の銀河系で観測されるよりも多くの数の星を作り上げたと言われているが、その時間以下のスケールで起きたとされる終焉過程は未だによく分かっていない。観測している銀河はその形成時期から既に時間が経ち過ぎているためである。また、高赤方偏移において星形成を終えた銀河種族は稀なため、未だに観測例は少なく、この時代のすべての銀河が同じ形成・終焉史を辿ってきたかについては分かっていない(図3.2.11)。その形成史に具体的な制限をつけるためには、より高赤方偏移の大質量銀河種族をできるだけ多く見つけ出し、その終焉活動の直後、あるいは真っ只中の様子を捉える必要がある。

さらに、銀河内部の構造ごとの星種族情報もその構造進化の理解には不可欠である。例えば、近傍宇宙の大質量銀河では中心部の星種族は外側の円盤に属している星種族に比べて古いことが分かっており、具体的な銀河構造の形成史が垣間見える。同様の面分光観測を見つけれ

された高赤方偏移の大質量銀河に対して行うことによって銀河内部の空間分解された星形成史を得ることができ、より具体的な物理過程の解明につながる(図3.2.12)。

これらの目的を達成するにあたりすばる望遠鏡とTMTの連携は最適である。具体的には、まずこれまでのHSCで見つかった大量の遠方銀河候補天体をULTIMATEで分光同定し、宇宙で一番最初に形成された大質量銀河のサンプル構築をする。

TMTのIRISの面分光器やAGEによる多天体面分光器は現状よりも1桁高い0.1キロパーセク以下の空間分解能を持つ。これによりすばる望遠鏡で同定された遠方銀河の局所的な構造形成・星形成活動の空間スケールにまで達することができ、その性質に制限をつけることができるだろう。宇宙初期の大質量銀河は、どのような姿で星を作り、その形成活動を止めてきたのか。そして、そこにはどのような物理過程が作用してきたのだろうか。すばる望遠鏡とTMTの連携によってこれらの疑問が解き明かされるだろう。

3.2.4.3 銀河はどのようにして回転を止めたのか？

銀河内にある星やガスの大局的な運動は、その形態や星形成活動と同様に、銀河を特徴づける重要な物理量の1つである。回転速度（回転運動）と速度分散（乱れた運動）を測定することで、銀河の運動を定量的に評価するこ

18 Figure 9, "The SAURON project - XVII. Stellar population analysis of the absorption line strength maps of 48 early-type galaxies"

とができる。現在の宇宙において、星形成活動が活発な晩期型¹⁹の銀河は回転運動が卓越しているのに対して、星形成活動を終えた早期型銀河は乱れた運動が卓越していることが広く知られている。現在は星形成活動を終え、乱れた運動が卓越した早期型銀河も、100億年以上前の宇宙では活発に星々を作っており、回転運動が卓越していたと考えられる。『現在では乱れた運動が卓越している早期型銀河はいつ、どのようにして回転運動を止めたのか?』という疑問は、すばる望遠鏡とTMTの連携観測によって取り組むべき重要な課題である。

星形成活動が活発な銀河の運動の研究は、8-10mの光赤外線望遠鏡を用いた電離ガス（主にH α 輝線）の観測によって飛躍的に進み、赤方偏移1-3（80-110億年前）にある星形成銀河の大部分は回転運動が卓越しているという観測事実は、銀河進化研究におけるマイルストーンとなった（Förster Schreiber et al. 2009など）。その一方で、星形成活動を終えた銀河の運動は星の吸収線を検出しなければならず、星形成銀河に比べて観測は遥かに難しくなる。また星形成を終えた銀河の星成分の空間サイズは非常に小さく、空間分解して吸収線を検出するためには高い空間分解能も必要となる。そのため現在のところ、星の運動の測定に成功した赤方偏移>2にある銀河は、重力レンズによって増光された3天体に限られている（Toft et al. 2017など）。

星種族の年齢（星形成を終えてからの時間）と銀河の運動についてその進化を調べるためには、星形成を終えた銀河の統計的なサンプルを構築するすばる望遠鏡と星の運動の測定に必要な高い感度と高い空間分解能を実現するTMTの連携観測が重要となる。赤方偏移1-2の時代の宇宙では、星形成を終えた銀河（Jバンドで22等より明るいもの）は1平方度辺り1200個程度存在しており、星形成銀河などの他の銀河種族に比べると個数密度は小さい。このような銀河種族の観測においてはすばる望遠鏡のPFSがより効率的な探査を可能にする。PFSを用いると、15時間程度の積分で赤方偏移1-2にある1500個程度の星形成を終えた銀河の連続光を検出することができ、正確な赤方偏移や星種族の年齢の測定が可能となる。これに加えてTMTのIRISもしくは近赤外多天体面分光装置（IRMOS）を用いて、高空間分解能の面分光観測を行い、回転速度や速度分散の測定を行い、星形成を終えた銀河における星の運動を特徴づける。

最新のシミュレーションによれば、現在の宇宙で回転していない銀河は、過去に少なくとも1回は他の銀河と衝突することで回転を止めたということがわかった（Lagos et al. 2018）。さらに衝突する相手の銀河が小さくても、その銀河内にあるガスが枯渇していれば、大きな銀河の回転

運動を効率的に止めることができることも示唆された。銀河のガスの割合は時間と共に減っており、より現在に近い時代ほど、ガスが枯渇した銀河との衝突合体は頻繁に起こると期待される。また星形成を終えてからの時間が長ければ長いほど、衝突合体する確率も高くなる。このシミュレーションによって予測される作業仮説を空間分解した星の運動の観測により検証することができるだろう。

3.2.4.4 星種族で探る銀河形成史

現在の宇宙において、恒星の多くは、星形成活動がほとんど見られず静的な進化をしている楕円銀河に属していることが知られている（Renzini 2006）。また、静的に進化する大質量銀河は、少なくとも一部は100億年前には形成が完了していたことが知られており（Cimatti et al. 2004など）、この銀河種族がいつ形成され、どのように進化してきたのかという形成史を明らかにすることが宇宙における星形成の全体像を理解するためには欠かせない。

近傍宇宙における研究から、既に星形成を止めた大質量の銀河については、その恒星の多くは赤方偏移がおよそ2.5以前の時代に形成されたことが示唆されている。また、水素とヘリウム以外の金属元素の量も太陽の値に比べて2-3倍と高いこと、さらに主としてII型超新星で合成されるアルファ元素²⁰とIa型超新星で合成される鉄の組成比が、太陽の値に比べて2-4倍になっていることから、銀河の星形成が、Ia型超新星による重元素汚染が進む前に、短いタイムスケールで爆発的に進行したと考えられている（Thomas et al. 2010など）。

これら静的進化する銀河の物理的、化学的、構造上の性質は互いに強い相関を持っていることが知られている。たとえば、上で述べた銀河の星種族の年齢、金属量、アルファ元素と鉄の組成比はすべて銀河の恒星質量や速度分散と相関している（Thomas et al. 2010）。また、銀河の大きさ、速度分散、表面輝度の3次元空間内に近傍楕円銀河は平面を形成するように分布することが知られており、基準平面とよばれている（Djorgovski & Davis 1987など）。

これらの相関関係がいつ、どのようにして形成されてきたのかを、より遠方宇宙にさかのぼって調べることで、爆発的な星形成（バースト）からその終焉に至る過程を克明に描き出し、銀河形成理論に強い制限を与えることができる。

赤方偏移が1を越えるような天体の静止系可視光にある水素のバルマー線、鉄やマグネシウムなどの金属吸収線を観測するには、赤外線をもちいる必要がある。また、天体までの距離が遠くなると必然的に見かけの明るさが暗くなるため、観測が容易ではない。そのような制約から、赤方偏移1を越える天体については、少数の天体についての調査にとどまっている（Onodera et al. 2012, 2015; Kriek

19 渦巻銀河と不規則銀河をまとめて晩期型銀河とよぶ。

20 中性子数と陽子数が偶数で等しい原子核。

et al. 2016 など)。TMT とすばる望遠鏡をもちいて、以下に述べるような観測をおこなうことによって、より遠方に拡張し、大規模なサンプルをもちいて、大質量銀河の進化史を星種族の観点から明らかにする。

HSC による撮像データをもちいて赤方偏移1程度の静的に進化している銀河のサンプルを構築し、おなじく PFS をもちいた観測をおこなう。PFS は赤外線 $1.3\mu\text{m}$ まで観測できるため、年齢や重元素の指標となる恒星大気吸収線を赤方偏移1程度まで検出できる。また、若い星種族の寄与に敏感な静止系紫外線領域のスペクトルも同時に取得できるため、静止系可視光のみを使った場合よりも、年齢やダストによる減光の影響をより正確に考慮することができる。比較的大質量の静的に進化する銀河は数密度もそれほど大きくないため、広い視野を持つ PFS はこのような観測にきわめて適している。PFS で数視野にわたる観測をおこなうことで1000天体を越える多数の赤方偏移1程度の星形成活動が抑制された銀河について深い分光観測をおこない、これらの銀河の星形成史や重元素量の間の様々な相関関係について調べる。ここで取得するような大量の天体をもちいることによって、その平均的な描像のみならず、赤方偏移1程度では一見すると既に見えに見える種族において、その星種族にどのような多様性がみられるか (Fagioli et al. 2016 など) をはじめて統計的に調査することができる。

さらに遠方の赤方偏移が1.5を超えるような天体については、PFS でカバーされる $1.3\mu\text{m}$ よりも長い波長にアクセスしなければならない。ここでは、ULTIMATE や IRIS をもちいた観測が鍵になる。ULTIMATE に搭載される中間帯域フィルターをもちいた観測によって測光学的赤方偏移の精度を1%程度まで向上させることができる (Straatman et al. 2016)。これにより、重要なスペクトル線が夜光や大気吸収の影響を受けないような赤方偏移の天体を効率よく選択できる。特に K バンド帯の中間帯域フィルターはユニークであり、星形成を止めた銀河に特有な静止系 400nm 付近に現れるスペクトル上の特徴を赤方偏移5付近まで正確に捉えることが可能である。ULTIMATE が備える広視野とあわせることで、より遠方の楕円銀河の探査への道筋が開かれるだろう。

ULTIMATE の広視野近赤外線サーベイによって選択された天体は IRIS で分光追観測をおこなう。また、一部の明るい天体については ULTIMATE の分光モードでも十分な S/N 比で観測可能である。これらの観測によって、赤方偏移1.5を超える宇宙で100天体オーダーのサンプルを現実的な観測時間で構築できる。赤方偏移2より遠方では、銀河の年齢が10-30億年程度となるため、スペクトルの解析から形成期、そして星形成の終焉期の星形成史を細

かい時間ステップに分解して解析することができるだろう。重元素合成についても、大きなサンプルをもちいての調査を欠かすことができない。また、現在は最も大質量な銀河の観測のみが可能であるが、TMT の集光力によって、低質量銀河の星種族の研究を系統的におこなうことが赤方偏移2より遠方では初めて可能になる。赤方偏移2を超えた宇宙でも低質量の静的に進化する銀河が既に現在の宇宙で見られるような星種族の性質を示していたのか、あるいは異なっていたのかを明らかにすることで、楕円銀河のような銀河の「種族」としての形成理論に強い制限を与えることができる。

さらに、ULTIMATE のサーベイ能力と TMT の集光力を最大限に発揮することで、宇宙で最初に星形成を止めた銀河の発見が期待される。Glazebrook et al. (2017) による赤方偏移3.7で既に星形成活動が見られない銀河としては当時の最遠方での発見によって、きわめて高い効率でバリオンが星に変換され得ることが示唆された。これは、現在の銀河形成モデルに大きな疑問が投げかけるものであった。さらに最近の研究によって、赤方偏移4より遠方でこのような銀河が存在することが明らかになっており (Tanaka et al. 2019)、今後は、どのくらいの数存在しているのかを調べることで、より極限的な状況でのバリオン進化についての観測的な試験ができる。これは2020/2030年代にTMTとすばる望遠鏡のシナジーによってブレイクスルーが期待されるフロンティアである。

3.2.5

銀河系と近傍銀河

3.2.5.1 背景

銀河を恒星分離して得られる個々の恒星の詳細な性質を元に、銀河全体の形成史を調べる「銀河考古学」は、銀河系と隣のアンドロメダ銀河、これら大きな銀河の周囲を公転している衛星銀河を観測対象として発展してきた。近年の大規模サーベイが明らかにした銀河系の複雑な外縁部構造とサブ構造の豊富さは、銀河の形成と成長における衛星銀河降着の重要性を物語っている (Ivezic et al. 2012)。例えば薄い円盤・厚い円盤からなる銀河系円盤の二重構造、リング状構造、折れ曲り、フレア、ウォープ²¹といった複雑なサブ構造は、円盤と衛星銀河との力学相互作用の結果生じたことが示唆されている (Slater et al. 2014)。また天の川銀河ハロー²²には、非常に暗い矮小衛星銀河が相次いで発見され、恒星の密度超過構造や潮汐ストリーム (潮汐力により引き伸ばされた結果できる恒星の非一様空間分布) など、矮小銀河合体の痕跡とみられるサブ構造も数多く見つかった。今後の観測での最

21 銀河円盤内の星間ガスが円盤の両端で上下方向にめくれて、円盤を横から見ると S 字状、ないしは数学の積分記号のように見える現象。

22 渦巻銀河の円盤を包みこむように丸く分布している星の成分。ダークマターハローとは異なる。

重要課題は、未開拓の銀河系外縁部でサブ構造の全貌を明らかにし、そのひとつひとつについて星の空間分布、運動、元素組成など詳細な物理量を広域にわたって得ることで、それぞれの起源を特定することである。また、一般的な宇宙論モデルの予測する階層的構造形成シナリオに基づく、現在の質量や大きさがほぼ同じ大型銀河同士でも、それぞれの過去の形成史と降着史に応じた痕跡を、多様な外縁部構造として維持していると予測される (Cooper et al. 2010 など)。このような多様性を観測的に検証するためには、銀河系のみならず、局所銀河群をはじめとするより多くの銀河について、外縁部構造の有無とその星種族を明らかにすることが求められている。

3.2.5.2 天の川銀河における衛星銀河降着史の解明

すばる望遠鏡の超広視野主焦点カメラ (HSC) と超広視野多天体分光器 (PFS) は、2020 年代において、広視野を生かした銀河系外縁部の深い探査に最も適した観測装置である。HSC は銀河系外縁部で衛星銀河降着の名残であるようなサブ構造を新たに発見する上で威力を発揮する。PFS では、銀河系内部から外部までサブ構造の視線速度と鉄組成 ($[\text{Fe}/\text{H}]$)、アルファ元素組成 ($[\alpha/\text{Fe}]$) を測定し、それぞれのサブ構造がいつ、どのような星形成史の衛星銀河の降着によってできたのかを調べる。また天の川銀河ハローに付随し、降着せずに生き残っている衛星銀河について、WFOS で視線速度、元素組成の測定を大規模に実施することは、サブ構造を形作った衛星銀河が過去にどのような姿だったかを理解する上で重要である。

また TMT の HROS では、アルファ元素のみならず、鉄ピーク元素²³や中性子捕獲元素など主要な元素の組成を測定し、降着した衛星銀河での元素汚染・化学進化の履歴を詳しく調べる。HSC や PFS で見つかる北天のサブ構造については TMT が唯一、追観測可能な観測装置であり、すばる望遠鏡と TMT の連携により、世界に先駆けて銀河系外縁部構造の研究を推進する。さらに WFIRST、Euclid 衛星と連携し、サブ構造の固有運動を測定することで、3次元位置情報、3次元速度情報、化学組成情報をすべて揃える。銀河中心部にある楕円体成分であるバルジなど可視光での観測が難しい領域は、赤外線での観測が必要不可欠であり、それには ULTIMATE による多色撮像、小型ジャスミン衛星による三角視差・固有運動測定、スローンデジタルスカイサーベイ (SDSS) の APOGEE で計画されている近赤外線全天分光サーベイによる元素組成測定の組み合わせにより、ダスト減光でこれまでに困難だった領域の化学動力学構造を解明する。

銀河系外縁部まで恒星の6次元位相空間と化学元素組

成の両方をこれまでにない数の恒星に対して得ることで、宇宙論の予測する矮小銀河降着を伴う円盤銀河²⁴形成のシナリオを最も詳細に検証することが可能になる (図3.2.13 左)。例えば銀河系円盤内の星の空間・速度分布からは、N 体シミュレーション等の理論予測との比較から、過去に円盤と相互作用した衛星銀河の質量や軌道が制限される。さらに鉄組成とアルファ元素組成を組み合わせることで、サブ構造に付随する恒星がどのような星形成史のもとで誕生したか、化学進化モデルとの比較から推察することが可能になる。太陽から見て銀河中心と反対方向の円盤外縁部は、現在銀河系にまさに衝突・合体しつつあるサジタリウス矮小銀河によって大きく変形を受けたことが示唆されている重要な天域で、南半球からは観測が困難なため、すばる望遠鏡と TMT の連携が特に重要となる。サジタリウス矮小銀河の合体は、天の川銀河の渦巻き構造の生成、バー構造の進化に大きなインパクトがあったとするシナリオが提唱されており (Purcell et al. 2011)、円盤外縁部の観測が理論予測検証の鍵を握っている (図3.2.13 右)。すばる望遠鏡と TMT の連携により、円盤銀河に一般的にみられる渦巻き・バー構造の起源の解明へと繋がるのが期待される。

円盤外縁部で HSC、ULTIMATE による星の空間分布、年齢、金属量の決定、さらに PFS と TMT による視線速度と詳細な元素組成の観測が理論予測検証の鍵を握っている。すばる望遠鏡と TMT の連携により、円盤銀河に一般的に見られる渦巻き・バー構造の起源の解明へと繋がるのが期待される。またハロー、バルジの大部分の星は100億年以上の年齢をもち、すばる望遠鏡による広域探査で金属元素の組成が極端に低い「超金属欠乏星」が新たに数多く見つかることが期待される。こうした星は太陽近傍では非常に希少であるため、従来の観測で未開拓の銀河系外部ハロー領域の探査が有効である。HSC に金属元素組成に敏感な狭帯域フィルターを搭載することで、外部ハロー領域での超金属欠乏星を効率的に探査することが可能になる。見つかった候補星に対し、HROS で詳しい元素組成を測定することにより、初代星による元素汚染を直接受けた星の候補が発見されるであろう。また世界で初めて、金属元素を全く含まないガスから誕生した宇宙で最初の星「初代星」の生き残りを発見する可能性もある (Ishiyama et al. 2016)。もし発見されれば1太陽質量以下の初代星が作られたことを観測的に証明する初めての成果となり、未知の初代星形成メカニズムにブレイクスルーをもたらすことが期待される。初代星は宇宙再電離を担った電離光子の供給源のひとつと考えられており、その後の宇宙の進化に大きな影響を及ぼした重要な天体であるにも関

23 クロム、マンガン、鉄、ニッケルなど。

24 円盤を持つ銀河、すなわち、渦巻銀河とレンズ状銀河の総称。

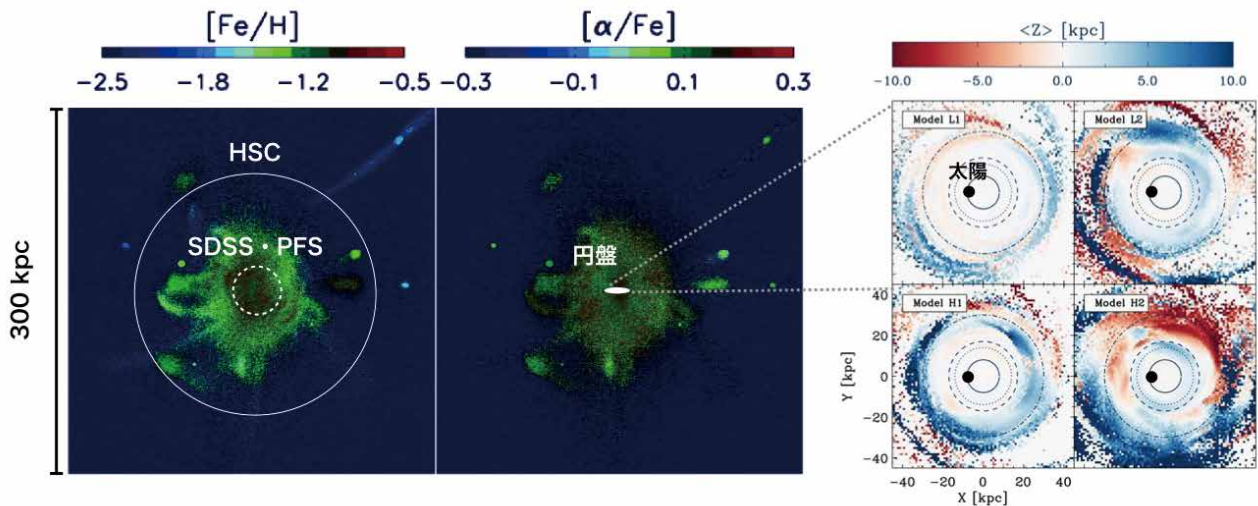


図3.2.13: (左図) 宇宙論シミュレーションで得られた銀河系サイズのハローの恒星空間分布。左側は鉄組成 ($[\text{Fe}/\text{H}]$)、右側はアルファ元素組成 ($[\alpha/\text{Fe}]$) で色付けされている。従来の小口径望遠鏡による恒星 (主系列星) 撮像サーベイ (SDSS等) の到達距離 (およそ20キロパーセク) と、すばる望遠鏡のHSCによる到達距離 (およそ100キロパーセク) を、左パネルに円で示した。PFSでは20キロパーセクより遠方のハロー星について視線速度と元素組成の系統的な探査が可能になる。また銀河系円盤のおおよその大きさを右パネルに示した。シミュレーションでは、従来のサーベイでは到達できない銀河系外縁部にサブ構造がより多く含まれていると予測しており、すばる望遠鏡によるサーベイによる新たなサブ構造の発見を通して銀河系形成に対する最新の描像が得られることが期待される。(右図) サジタリウス矮小銀河合体が銀河系円盤に及ぼす影響を調べたシミュレーション結果。円盤の各場所 (X, Y) で、円盤星の平均の高さ (Z) によって色分けされている。質量、中心集中度の異なる4つのサジタリウス銀河モデルの衝突について、結果が各パネルに示してある。サジタリウス銀河の衝突によって、銀河系円盤が大きく擾乱を受け、その結果円盤が上下に変形していることが分かる。すばる望遠鏡による円盤の恒星分布と速度分布、星の年齢の指標となる化学組成分布を詳しく調べることで、天の川銀河とサジタリウス銀河の合体メカニズム、サジタリウス銀河の物理的性質について観測的に検証することが可能になる。点線、破線は、それぞれ銀河系中心から16、18、30キロパーセクに相当し、これまでの観測で、円盤のサブ構造 (それぞれ、“Monoceros North”、“Monoceros South”、“TriAnd”) の兆候が見えている領域である。

左図Credit: Font et al. 2006 (一部改変)²⁵、右図Credit: Laporte et al. 2018 (一部改変)²⁶

ならず、その質量や物理的性質はいまだにほとんど分かっていない。

赤方偏移10を超える初代銀河直接探査 (3.2.1章) と、その時代に誕生した銀河系の古い星がもたらす化石情報を組み合わせることで、宇宙の暗黒時代における初代星・初代銀河の性質にこれまでにない制限が得られることが期待される。

3.2.5.3 恒星分離に基づく近傍銀河考古学

銀河系に見られるような複雑な外縁部構造とサブ構造は、果たして大型円盤銀河において一般的なのだろうか。局所銀河群よりさらに遠くの銀河をターゲットに銀河考古学研究を行うには、近年の大型サーベイに使われているものよりも、さらに感度が高く且つ広い視野の観測装置が必要であり、現行ではHSCのみがその条件を満たしている。そして2020年代においても、PFSと、大型シノプティック・サーベイ望遠鏡 (LSST) の広視野カメラのみが可能であると見込まれる。2019年現在、複数の近傍銀河について、外縁部の恒星分離を目的としてHSCを用いた撮像観測が進められている (Okamoto et al. 2015; Tanaka et al. 2017など)。2020年代半ばまでには、これらの銀河について様々な進化段階の星種族とその空間分布が明らかになるであろう (図3.2.14参照)。撮像観測ではLSST

が強力なライバルであるが、LSSTはサーベイ専用ということもあり、HSCによる特定の近傍銀河の深い撮像データは2020年代、30年代においても、世界最高の広視野画像であり続けるので、銀河系から10メガパーセク程度までの近傍銀河について、積極的にマッピング観測を進めるべきである。またPFS完成後には、HSCによる撮像データで検出された星種族のうち、特に明るい赤色超巨星、青色超巨星、球状星団などの候補を対象とした分光観測を行い、視線速度によるメンバー同定、およびそれぞれの銀河の外縁部から円盤領域まで広い範囲に渡る金属量分布が解明できる。そしてWFOSによる恒星ハローのさらに暗い恒星をターゲットとした金属量の測定、また明るい恒星と球状星団についてはTMTのHROSによる高分散分光観測で詳細な化学組成情報の取得を行う。さらに、各銀河の円盤部分や活発な星形成活動が行われている箇所など、恒星が密に分布している領域やダストによる吸収が大きい領域には、JWSTに搭載される近赤外線カメラ (NIRCam) やULTIMATE、TMTの広視野赤外線カメラ等の赤外線超高解像度カメラを用いて、より多くの星を分離、検出してその年齢と金属量を同定する。

まずHSCの撮像観測により、銀河系から10メガパーセク以内の様々な性質を持つ銀河について、外縁部構造の有無、空間分布、星種族、サブ構造の豊富さが解明され

²⁵ “Phase-Space Distributions of Chemical Abundances in Milky Way-Type Galaxy Halos” © AAS. Reproduced with permission.

²⁶ Figure 6, “The influence of Sagittarius and the Large Magellanic Cloud on the stellar disc of the Milky Way Galaxy”

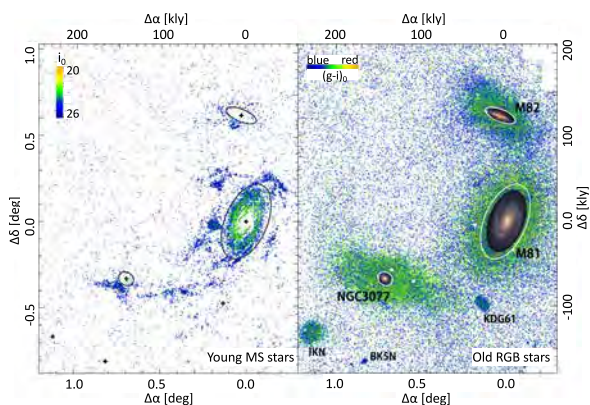


図3.2.14: 銀河系から約3.6メガパーセク(約1200万年光年)離れた大型円盤銀河M81と、近くの2つの銀河M82とNGC 3077の周辺でHSCを用いて検出された、生まれて数千万年未満の若い主系列星(左図)と年齢10億年以上の古い赤色巨星(右図)の空間分布図。軸の目盛は角距離(単位: 度)とM81における物理距離(単位: 1000光年)を表す。左図では、黄色い点ほど明るい星、青い点ほど暗い星を示す。右図では、各点の色が一つひとつの赤色巨星の重元素量に対応しており、青色はより重元素の少ない星、黄色はより重元素の多い星であることを意味する。右図に重ねた天体写真は、3つの銀河を一般的な小口径望遠鏡で撮った場合に見られる姿。

Credit: Okamoto et al. 2015²⁷ (一部改変)

る。それらの構造に含まれる多くの恒星の化学情報および運動情報を得るには、PFSの広視野多天体分光機能と、TMTの圧倒的な集光力が不可欠である。様々な形態や恒星質量、環境の近傍円盤銀河について、厚い円盤や恒星ハローなど外縁部構造の有無と性質を知ることができれば、例えば、恒星ハローの質量と平均金属量、サブ構造の豊富さとの間の相関、外縁部構造の環境依存性、円盤/バルジ比とハロー質量の相関などを統計的に調べることができる。これらの相関の有無からは、一般的な宇宙論モデルが予測するように、小さな銀河が徐々に集まり階層的に成長することで近傍大型円盤銀河とその外縁部構造ができたのか、あるいは近年、銀河系の厚い円盤とハローで指摘されているように、形成初期の比較的大きな衛星銀河による一度の降着が、銀河の外縁部構造を作り出したのか(Helmi et al 2018; Myeong et al. 2018)、制限をつけることができる。このように2020年代以降では、すばる望遠鏡とTMTを併用することで、近傍の大型銀河について、個々の恒星の詳細な性質に基づいた、精密な星形成史と構造形成史の解明が進み、そしてそれらの結果は、前節まで述べたような多数の遠方銀河サンプルに基づく研究成果と相補的に、銀河の一般的な形成と成長過程の理解に寄与するものとなるだろう。

3.2.5.4 超巨大ブラックホール近傍の星形成と物理法則

銀河系の中心約100パーセク領域を観測することで、ブラックホール近傍で起きる星形成過程を研究することができる。中心数十パーセクの範囲には、3つの大質量星団

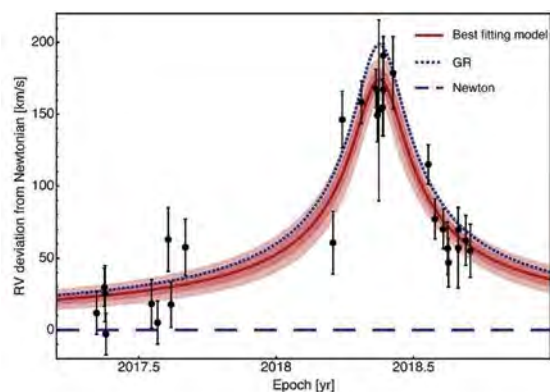


図3.2.15: 超巨大ブラックホールを周回する星S0-2の視線速度時間変化の比較。ニュートン重力から予想される視線速度を破線で、一般相対論の予想を点線で示す。Keckやすばる望遠鏡の観測結果(黒丸)は、一般相対論の予想とよく一致している。

Credit: Do et al. 2019²⁸ (一部改変)

(Arches cluster, Quintuplet cluster, Nuclear star cluster)が存在する。また、銀河系の超巨大ブラックホールSgr A*のごく近傍(数パーセク)にも若い星が存在する(Ghez et al. 2003)。これらの星の形成過程を理解することで、超巨大ブラックホールと銀河の共進化の理解も進むと考えられる。

すばる望遠鏡とTMTとの連携は、中心約100パーセクの星形成の理解を大きく進展させる。減光が大きく可視光では見通せないこの領域の広域サーベイには、ULTIMATEが適している。また星が混んだ領域なので、GLAOによる補償光学が威力を発揮する。特にULTIMATEの狭帯域フィルターを用いることで、大量にある古い星(>約1Gyr)の中から若い星や中間年齢の星を選び出すことができる(Nishiyama & Schödel 2013; Nishiyama et al. 2016)。このような星をTMTでフォローアップすることで、銀河の中心領域で起きる星形成の理解を進めることができる。

Sgr A*の近傍0.1パーセクには、S-starsと呼ばれる星が存在する。8-10m級の望遠鏡を用いてS-starsの運動を詳細に観測することで、超巨大ブラックホール近傍を物理実験室として使えるようになってきた。Sgr A*最近傍を周回する星が感じる重力場は、太陽表面よりも3桁以上大きい。つまり地球や太陽系内の実験では再現できないような、強い重力場での物理実験が可能となる。

この分野の近年の大きな進展は、強重力場における一般相対論の検証である(GRAVITY Collaboration 2018; Do et al. 2019; Saida et al. 2019)。補償光学装置を使うと、S-starsの位置と視線速度を正確に測定できる。このような観測から、星から届く光の赤方偏移はニュートン重力とは矛盾するが、一般相対論の予想とは矛盾しないことが分かった(図3.2.15)。つまり超巨大ブラックホールが作る強重力場において、一般相対論がニュートン重力よりも

27 “A Hyper Suprime-Cam View of the Interacting Galaxies of the M81 Group” © AAS. Reproduced with permission.

正しいことが検証できた。

TMTでは、超巨大ブラックホールのより近傍を周回する星がみつかり、ブラックホールのスピンの効果も検証できる可能性がある。もし星の周期が数年と短く、軌道の離心率が大きければ、短期間のモニター観測で、軌道の歳差運動が測定できるようになる。また天体の周回軌道や天体から発せられる光の伝搬は、超巨大ブラックホールのスピンの影響を受ける (Angelil & Saha 2010 など)。TMT が達成可能な位置と視線速度の測定精度があれば、ブラックホールスピンの測定も期待できる。このような観測を通して、一般相対論のより精緻な検証が進められる。

参考文献

- Akiyama, M., et al. 2018, PASJ, **70**, S34
- Angélil, R., & Saha, P. 2010, ApJ, **711**, 157
- Bañados, E., et al. 2018, Nature, **553**, 473
- Bouwens, R. J., et al. 2015, ApJ, **803**, 34
- Bouwens, R. J., et al. 2019, ApJ, **880**, 25
- Cimatti, A., et al. 2004, Nature, **430**, 184
- Cooper, A., et al. 2010, MNRAS, **406**, 744
- De Rosa, G., et al. 2014, ApJ, **790**, 145
- Dekel, A., & Burkert, A. 2014, MNRAS, **438**, 1870
- Dekel, A., et al. 2009, Nature, **457**, 451
- Djorgovski, S., & Davis, M. 1987, ApJ, **313**, 59
- Do, T., et al. 2019, Science, **365**, 664
- Fagioli, M., et al. 2016, ApJ, **831**, 173
- Fan, X., et al. 2006, ARA&A, **44**, 415
- Font, A. S., et al. 2006, ApJ, **646**, 886
- Förster Schreiber, N. M., et al. 2009, ApJ, **706**, 1364
- Furlanetto, S. R., et al. 2004, MNRAS, **347**, 187
- Ghez, A. M., et al. 2003, ApJ, **586**, L127
- Glazebrook, K., et al. 2017, Nature, **544**, 71
- GRAVITY Collaboration 2018, A&A, **615**, L15
- Harikane, Y., et al. 2019, ApJ, **883**, 142
- Hashimoto, T., et al. 2018, Nature, **557**, 392
- Heckman, T. M., et al. 2011, ApJ, **730**, 5
- Helmi, A., et al. 2018, Nature, **563**, 85
- Hirano, S., et al. 2015, MNRAS, **448**, 568
- Hopkins, P. F., et al. 2008, ApJS, **175**, 356
- Hosokawa, T., et al. 2012, ApJ, **756**, 93
- Inoue, A. K., et al. 2014, MNRAS, **442**, 1805
- Ishiyama, T., et al. 2016, ApJ, **826**, 9
- Ivezić, Ž., et al. 2012, ARA&A, **50**, 251
- Izumi, T., et al. 2019, PASJ, **71**, 111
- Kawaguchi, T., et al. 2018, PASJ, **70**, 93
- King, A., & Pounds, K. 2015, ARA&A, **53**, 115
- Kormendy, J., & Ho, L. C. 2013, ARA&A, **51**, 511
- Kriek, M., et al. 2016, Nature, **540**, 248
- Kubo, M., et al. 2018, ApJ, **867**, 1
- Kuntschner, H., et al. 2010, MNRAS, **408**, 97
- Lagos, C. D. P., et al. 2018, MNRAS, **476**, 4327
- Laporte, C. F. P., et al. 2018, MNRAS, **481**, 286
- Lee, K. G., et al. 2014, ApJL, **795**, L12
- Lilly, S. J., & Carollo, C. M. 2016, ApJ, **833**, 1
- Loeb, A. 2006, Scientific American, **295**, 46
- Madau, P., & Dickinson, M. 2014, ARA&A, **52**, 415
- Mainali, R., et al. 2018, MNRAS, **479**, 1180
- Martig et al. 2009, ApJ, **707**, 250
- Matsuoka, Y., et al. 2016, ApJ, **828**, 26
- Morishita et al. 2014, ApJ, **785**, 18
- Myeong, G., et al. 2018, ApJL, **863**, L28
- Nakajima, K., et al. 2018, A&A, **612**, A94
- Newman, S. F., et al. 2012, ApJ, **761**, 43
- Nishiyama, S., & Schödel, R. 2013, A&A, **549**, A57
- Nishiyama, S., et al. 2016, A&A, **588**, A49
- Oesch, P. A., et al. 2016, ApJ, **819**, 129
- Oesch, P. A., et al. 2018, ApJ, **855**, 105
- Okamoto, S., et al. 2015, ApJL, **809**, L1
- Ono, Y., et al. 2018, PASJ, **70**, S10
- Onodera, M., et al. 2012, ApJ, **755**, 26
- Onodera, M., et al. 2015, ApJ, **808**, 161
- Oppenheimer, B. D., et al. 2018, MNRAS, **481**, 835
- Planck Collaboration 2018, arXiv **1807.06209**
- Purcell, C. W., et al. 2011, Nature, **477**, 301
- Regan, J. A., et al. 2017, Nature Astronomy, **1**, 75
- Renzini, A. 2006, ARA&A, **44**, 141
- Saida, H., et al. 2019, PASJ, **71**, 120
- Schaye, J., et al. 2015, MNRAS, **446**, 521
- Schreiber, C., et al. 2018, A&A, **618**, A85
- Shirakata, H., et al. 2016, MNRAS, **461**, 4389
- Slater, C. T., et al. 2014, ApJ, **791**, 9
- Speagle, J. S., et al. 2014, ApJS, **214**, 15
- Steidel, C. C., et al. 2010, ApJ, **717**, 289
- Stewart, K. R., et al. 2017, ApJ, **843**, 47
- Straatman, C. M. S., et al. 2016, ApJ, **830**, 51
- Tanaka, M., et al. 2017, ApJ, **842**, 127
- Tanaka, M., et al. 2019, ApJL, **885**, L34
- Thomas, D., et al. 2010, MNRAS, **404**, 1775
- Toft, S., et al. 2017, Nature, **546**, 510
- Trujillo, I., et al. 2007, MNRAS, **382**, 109
- Tumlinson, J., et al. 2017, ARA&A, **55**, 389
- van der Wel, A., et al. 2014, ApJ, **788**, 28
- Visbal, E., et al. 2016, MNRAS, **460**, L59
- Yajima, H., & Khochfar, S. 2017, MNRAS, **467**, L51
- Yajima, H., et al. 2018, MNRAS, **477**, 5406
- Yoshida, M., et al. 2019, PASJ, **71**, 87
- Zackrisson, E., et al. 2011, ApJ, **740**, 13

28 Science, 365, 664. Reprinted with permission from AAAS.

3.3

宇宙のダーク成分と物質の起源

地球、太陽系、銀河など観測可能な天体全てを内包する入れ物としての巨大な宇宙は、ビッグバンから現在まで膨張しており、その大域的な宇宙の進化史は現宇宙の全エネルギーの約94%を占めるダークマター、ダークエネルギーに支配されていることが分かっている(図3.3.1)。宇宙の階層構造の形成を引き起こす重力を支配するダークマターの正体、および常識に反し、万有斥力により現宇宙の加速膨張を引き起こしているダークエネルギーの正体の解明は、天文学・宇宙物理学に限らず、現代物理の大問題である。これら宇宙のダーク成分の解明には、大域的宇宙における膨張史、また宇宙の階層構造の形成史を詳しく調べることを可能にする、大口径・広視野を有するすばる望遠鏡が最適な装置である。すばる望遠鏡のHSC・PFSによる広天域撮像・分光銀河サーベイは、ダークマターの詳細な三次元分布や、ダークエネルギーにより宇宙の膨張が減速から加速に変遷した進化史を明らかに

することができるだろう。さらに、TMTは天体の赤方偏移が時間とともに変化するのを直接捉えることで、宇宙の加速膨張を「直接的」に測定する唯一の手法を提供し、すばる望遠鏡の手法とは極めて相補的である。また、すばる望遠鏡による重力マイクロレンズ天体の探査は、ダークマターの有力な候補である原始ブラックホールの存在量を直接的に制限することも可能となる。

一方で、私たちが観測できる星や銀河を形づくっているのは通常物質であり、その中でも特に重元素の起源と循環のプロセスは未だ解明されていない。すばる望遠鏡による高感度の広視野観測によって、宇宙で最初に元素を放出した超新星爆発や、鉄よりも重い元素を放出する中性子星合体を捉えることができ、TMTを用いた分光によってそれら天体の確たる同定が可能となる。また、TMTの高感度赤外線観測は、星や爆発天体から元素やダストが放出される現場を捉えるだろう。

宇宙のダーク成分と物質の起源

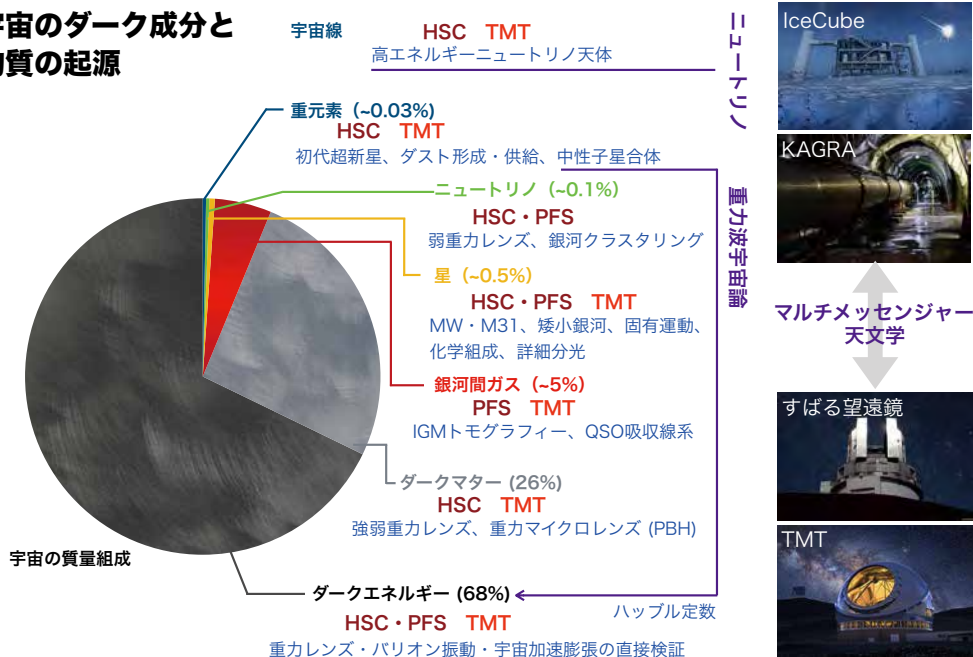


図3.3.1: すばる望遠鏡とTMTで探るダークマター・ダークエネルギーと物質の起源

右上、上図Credit: FELIPE PEDREROS, ICECUBE/NSF 右上、下図Credit: 東京大学宇宙線研究所 右下、両図Credit: NAOJ

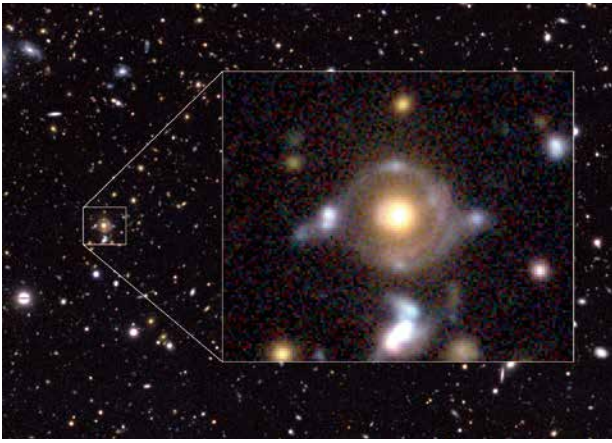


図3.3.2：HSCサーベイで見つかった強い重力レンズ効果の例。背景の2つの異なる銀河が、手前の銀河によって同時に重力レンズ効果を受けている非常に珍しい天体。拡大図の中央の赤い銀河が手前のレンズ天体、また外側の青い円弧状の天体が強い重力レンズ効果で大きく歪んだ像の背景の銀河。2つの円弧状の像があるのが分かる。その形状が、古代エジプトの神聖なる神の目に似ていることから「ホルスの目」(Eye of Horus) と名付けられた。
Credit: NAOJ・HSCプロジェクト。

宇宙のダーク成分と物質の起源の研究は、重力波やニュートリノといった新しい宇宙の観測手段とも密接に関係している。重元素を作る中性子星合体は重力波天体であり、重力波と電磁波の連携観測が必要不可欠となる。さらに、重力波天体を電磁波で同定し、その赤方偏移を測定することができれば、ハッブル定数を他の手法とは全く独立に推定することもできる。また、高エネルギーニュートリノ天体を電磁波で同定することができれば、宇宙線の起源を理解することもできるだろう。このようにすばる望遠鏡とTMTはマルチメッセンジャー天文学の時代にも重要な役割を果たすことが期待される。

3.3.1

ダークマター

3.3.1.1 重力レンズ効果による宇宙論と宇宙階層構造のダークマター分布の研究

重力レンズは、アインシュタインの重力理論が予言する効果の一つであり、文字通り重力のみによって引き起こされるので、電磁波では見えないダークマターの分布を「直接」見ることを可能にする強力な手段である。重力レンズには、その効果の大きさ、また現象の特性の違いによって、「強い」あるいは「弱い」重力レンズ効果があり、天文学の様々な分野で用いられている。

強い重力レンズ効果とは、観測者の視線方向上にレンズ天体および光源天体がほぼ並んだときに起こる、非常に稀な現象である。この効果により、同一の光源が多数の像、あるいは非常に歪んだ像として、またその見かけ

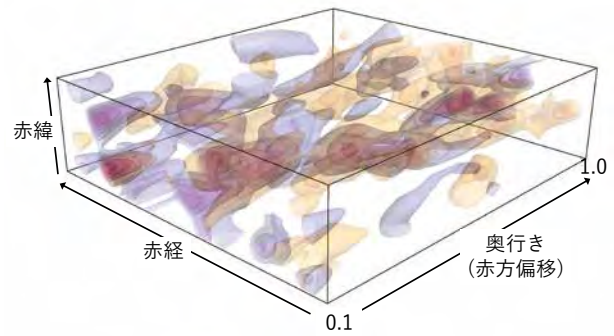


図3.3.3：HSCサーベイの弱重力レンズ効果の測定と個々の銀河までの測光的赤方偏移を組み合わせ、復元した3次元ダークマター地図の結果。紫の領域は、ダークマターが多く分布する領域。黄色い領域は銀河が多く分布する領域。ダークマターが多く分布する領域に銀河が形成されることを示唆している (Oguri et al. 2018をもとに作成)

上の明るさが増光されるという、観測的には顕著な現象を引き起こす (図3.3.2参照)。すばる望遠鏡の超広視野主焦点カメラ (HSC) の広天域領域の撮像サーベイから、強い重力レンズ効果を受けた、均一な天体サンプルを構築することができる (Tanaka et al. 2016)。特に、HSCの集光力、高い結像性能により、多数の強い重力レンズ天体を見つけることができる。また、TMTは、それらの天体を追観測することで、光源天体の赤方偏移、補償光学を用いたより微細な空間構造の測定、またレンズ天体の速度分散の決定など、すばる望遠鏡とは相補的な役割を果たすことができる。強い重力レンズ天体の詳細観測から、(1) 多重像間の時間変動の観測からハッブル定数の測定ができ、(2) 多重像のフラックスの比較から、ダークマターのサブハロー¹の存在量、原始パワースペクトル²の制限が期待される。サブミリ、ミリ波を発する光源については、アルマ望遠鏡の高空間解像度での追観測も相補的である。また、(3) 重力レンズの拡大率を利用し、星形成領域の空間分解ができるようになり、光源天体の空間構造の詳細な測定も期待される。このように、すばる望遠鏡とTMTは様々なサイエンスを可能にする。

一方、弱い重力レンズは、遠方銀河から発せられた光の経路が、手前の宇宙構造の重力場によって曲げられる効果であり、結果として銀河像に微小な「歪み」を引き起こす。多数の銀河像を統計的に解析することで、この系統的な歪み効果を測定できる。逆に言えば、信号の大きさは別にして、遠方銀河は必ずこの弱い重力レンズ歪み効果を受けており、十分に多数の銀河像を統計解析することにより、統計的に有意にこの重力レンズ信号を測定することができる。このため、HSCの広天域撮像サーベイは、この弱い重力レンズ効果の測定を極めて効率的に行

1 銀河、銀河団はダークマターが空間的に密集したダークマターハローに形成されると考えられるが、サブハローとはハローのなかに漂うダークマターが密集した小塊のこと。
2 宇宙背景放射の角度異方性、あるいは現在の宇宙構造の種となる宇宙初期に存在した物質分布の非一様性を統計的に特徴付ける量。

える。さらに、HSC戦略枠観測のような多色フィルターの撮像データを用いることで、弱い重力レンズ効果と各銀河までの測光的赤方偏移³を組み合わせることにより、宇宙の大規模構造におけるダークマターの3次元分布を測定することができる (Oguri et al. 2018; 図3.3.3を参照)。この3次元分布は、2次元は天球の2次元座標であるが、奥行き方向は赤方偏移と等価であり、宇宙の大規模構造の時間進化を直接調べるのが可能になる。また、そのダークマター分布と銀河の分布を比較することで、大規模構造中における銀河バイアス不定性⁴を観測的に解決することができる。さらに、HSCサーベイと同じ天域について、銀河の分光データ、X線の選定による銀河団カタログ、宇宙背景放射実験から発見されるスニヤエフ・ゼルドヴィッチ効果⁵の銀河団カタログなどを弱重力レンズ効果の前景レンズ天体として用いることにより、その前景天体まわりの平均的なダークマターの空間分布を復元することができる。特に、前景天体のダークマターハローの質量の情報は、上述の前景天体のデータに基づき宇宙論を行う上で、重要な役割を果たす。

上述したようにHSCの広天域多色撮像データを用いることで、様々なスケールにわたる宇宙の階層構造のダークマターの空間分布を調べることができる。例えば、天体の母体であるダークマターハローの質量で言えば、 10^8 から 10^{15} 太陽質量の約7桁にも及ぶ広い質量範囲のスケールである。これらのダークマター分布は冷たいダークマター構造成の理論モデルの定量的な検証だけでなく、宇宙背景放射あるいはX線観測などの様々な多波長、他分野との融合研究領域の開拓にも繋がる。

3.3.1.2 天の川銀河、矮小銀河のダークマターの研究

ダークマターの存在は宇宙の様々な観測により明らかであるが、その正体は未だ不明であり、物理学・天文学における最重要課題の一つである。HSC・PFSの広視野および集光力は、天の川銀河、アンドロメダ銀河 (M31) あるいは局所銀河群の銀河におけるダークマター分布を探り、またダークマターの正体を解明するのに威力を発揮する。

ダークマターの有力候補は、これまで未知の素粒子的粒子 (Weakly Interacting Massive Particles) と考えられてきたが、地下素粒子実験、あるいは欧州原子核研究機構 (CERN) の大型ハドロン衝突型加速器 (LHC) 実験などでも未だその手がかりは得られていない。ダークマターのもう一つの候補は、宇宙初期に形成された可能性がある原始ブラックホール (Primordial Black Hole、以後PBH) である。PBH形成の可能性については、1970年代

に英国のホーキングらが提唱した (Hawking 1971)。現在の宇宙の観測領域には、初期宇宙の重力で影響を与え得る領域 (ハッブル領域) を多数含んでいた。これらのハッブル領域は、見かけ上独立な膨張宇宙として振る舞うが、ごく稀にあるハッブル領域が大きな原始ゆらぎを持っていたとすると、その領域は「閉じた」宇宙として振る舞い、膨張がやがて止まり、収縮に転じ、その時代の宇宙のエネルギーを支配していた輻射 (光子などの相対論的粒子) が重力崩壊し、ブラックホールが形成される可能性がある。つまり、未知の素粒子を導入することなしに、宇宙初期に存在していた大量の輻射からPBHが形成され、その後PBHがダークマターとして振る舞うというシナリオである。このPBHは、レーザー干渉計重力波観測所 (LIGO) が観測した太陽質量の30倍程度のブラックホールの連星の起源であるという説も提案され (Sasaki et al. 2016)、近年PBHシナリオは再び注目を集めている。しかし、インフレーションモデルなどの理論的考察からは、PBHの質量範囲、またその存在量については様々な可能性があり、観測的な検証が強く望まれている (Kashlinsky et al. 2019)。

PBHの探査には、星に手前のPBHが及ぼす重力マイクロレンズ効果の測定が強力である (Niikura et al. 2019a, b; Sugiyama et al. 2019)。この重力マイクロレンズの探査にも、HSCの広視野、集光力が極めてユニークな威力を発揮する。MACHO、MOA、OGLEなどの地上実験に示されるように、重力マイクロレンズ探査には、多数の星をモニター観測し、重力レンズ効果による特徴的な増光の光度曲線を示す時間変動する星を探す必要がある。すばる望遠鏡から観測可能な絶好のターゲットは、M31、あるいは我々の天の川銀河の円盤領域である。特に、M31は最も近傍の巨大渦巻き銀河であるが、HSCあるいはPFSの視野はM31の円盤領域と同程度であり、さらにすばる望遠鏡の大口径により、大量かつ暗い星まで一度に観測することができる。また、M31は大型シノプティック・サーベイ望遠鏡 (LSST) を含めたチリの望遠鏡では観測不可能であり、4m級の望遠鏡では効率が悪いので、すばる望遠鏡独自のユニークな対象天体である。空の上でM31の星の手前をPBHが横切り、背景星とPBHが観測者の視線方向上にほぼ一直線上に並んだときに、重力レンズ効果により、その背景星の見かけ上の明るさが増光される。天の川銀河の星が固有運動しているように、PBHも天の川銀河あるいはM31の重力場中を固有運動 (典型的に秒速200km程度) しているはずであり、PBHの質量に依存したタイムスケールの重力マイクロレンズを引き起

3 測光観測のみで測定された赤方偏移。個々の天体についての分光観測による測定より精度がないが、撮像観測により多数の天体について決めることができる。

4 ダークマターの空間分布と銀河の空間分布のあいだの関係における不定性。

5 宇宙マイクロ波背景放射からの光と銀河団の中にあるような大量の熱い電子とのコンプトン散乱により、光子のエネルギースペクトルに歪みが生じる効果。

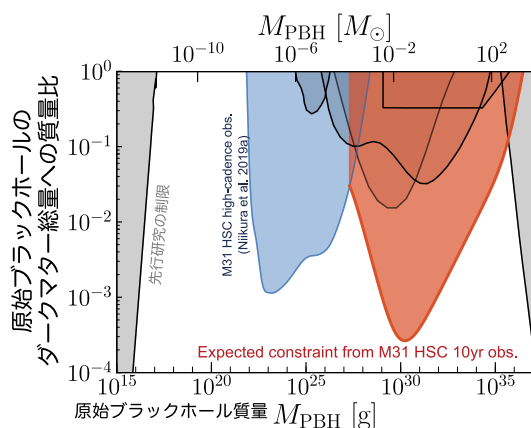


図3.3.4：HSCでM31を10年間モニター観測し、原始ブラックホール(PBH)による重力マイクロレンズ効果を探索し、一つも有力なイベントが見つからなかった場合に期待されるPBHの存在量の上限值(赤色に塗られた領域が95%CLの除外領域)。横軸は、PBHの質量(ここでは全てのPBHが単一の質量を持つと仮定)、縦軸は、天の川、M31領域のダークマターの総量に対するPBHの質量比を示す。青色の領域は、より高時間密度(2分間隔)のHSC一晚のM31データから得られたPBHの存在量への上限值を示す(Niikura et al. 2019a)。他の灰色の領域は先行研究の制限領域を示す。

こす。月質量程度のPBHの場合は、数十分程度から数時間程度の光度曲線として観測され、この時間変動は変光星などの時間変動よりは短い。例えば、太陽質量よりも軽い、コンパクトな重力マイクロレンズ天体を発見できた場合は、PBHの確証になり、ノーベル賞級の大発見に繋がる(Niikura et al. 2019a)。また、数分から数年の時間変動をカバーする最適なサーベイデザイン(観測スケジュール)でM31を長期モニターすることにより、様々な質量スケールのPBHを探ることができる。図3.3.4は、HSCでM31を10年間モニター観測した場合に期待されるPBHの制限を示している。

HSCのM31モニター観測のデータは、PBHの重力マイクロレンズだけではなく、通常の星あるいはハロー領域を浮遊する惑星の重力マイクロレンズ、あるいは変光星(セファイド・RR Lyrae変光星)、新星、恒星フレア、衝突する星など様々な時間変動天体を見つけることができる。特に、M31全体を見渡すことができるHSCデータにより、極めて均一な変動天体カタログ、またその存在量とM31銀河内の環境依存性を調べることができる。

また、重力マイクロレンズはPBHに限らず、より一般にブラックホールの質量分布を明らかにする強力な手段である。例えば、LIGOによる重力波検出後に活発に議論されている問題が、太陽質量の30倍程度の2つのブラックホールの連星の起源である。LIGOが示す結果は、我々が予想していた以上に、宇宙にブラックホールが存在するということである。重力マイクロレンズによってブラックホールの存在量や質量関数が分かれば、その起源の謎を探る鍵になると考えられている。

この場合は、HSCによる星が密集しているバルジあるいは円盤領域のモニター観測が最適である。これは、

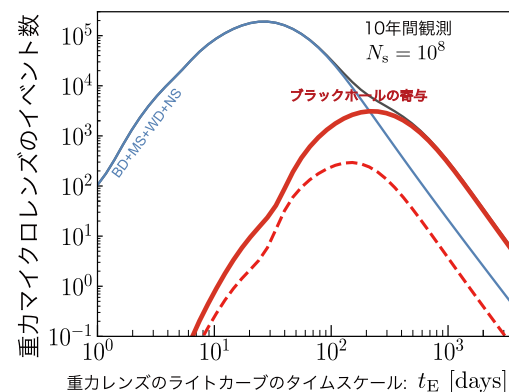
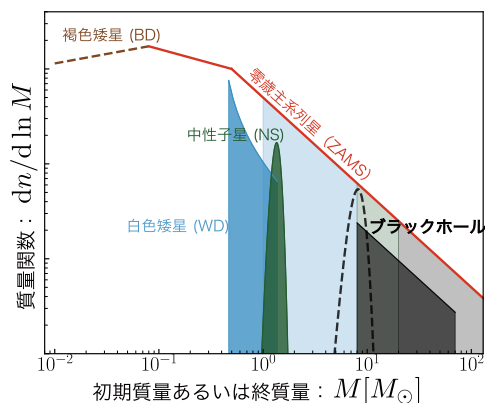


図3.3.5：(上図) 天の川銀河領域の褐色矮星、主系列星、白色矮星、中性子星、ブラックホールの質量関数。1太陽質量以上の主系列星は、白色矮星、中性子星、ブラックホールになると仮定した。このとき、それぞれの個数密度は、それぞれの質量範囲の零歳主系列星(ZAMS)の個数が保存すると仮定した。黒色で塗りつぶされた領域は、LIGO重力波イベントが示唆するブラックホールの質量関数(Abbott et al. 2018)。点線は、LIGO観測以前に信じられていたブラックホールの質量関数を示す(8太陽質量程度あたりの狭い質量範囲に分布する)。(下図) 10年間のHSCモニター観測から期待される重力マイクロレンズのイベント数。横軸は、重力マイクロレンズのライトカーブの典型的時間スケール、また1億個の光源星を同にモニター観測できると仮定した。赤の実線は、LIGOが示唆するブラックホール種族が引き起こす、大量の長いタイムスケール(数百日以上)の重力マイクロレンズ数の期待値を示している(Abrams & Takada in preparation)。破線は、上図の点線に示される8質量程度のブラックホールが引き起こすイベント数。

個々の重力マイクロレンズイベントが角度分解でき、その後の追観測ができるためである。これは南天のLSSTあるいはWFIRSTが計画しているバルジ領域の重力マイクロレンズ探索とは相補的である。図3.3.5は、HSCで円盤領域を10年間モニター観測した場合に期待される重力マイクロレンズ天体のイベント分布を示す。褐色矮星、主系列星、白色矮星、中性子星、ブラックホールのイベントを多数発見できると期待できる(Niikura et al. 2019b)。このようなデータから、ブラックホールの質量関数の制限ができる。また、太陽質量の10倍以上のブラックホールの重力マイクロレンズの有力候補を発見できた場合、TMTで追観測し、レンズ天体が暗いことを確認する。さらに星、ブラックホール、観測者は相対的に運動しているので、TMTの補償光学観測および超高精度測光により、位置天文学的重力マイクロレンズ現象を測定し、重力マイクロレンズの光度曲線における速度と質量の縮退を

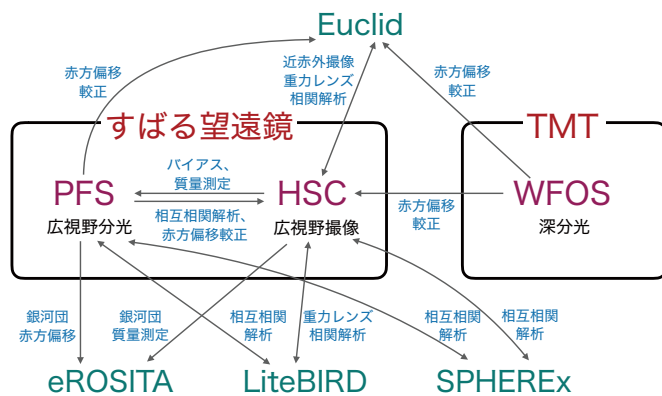


図3.3.6: すばる望遠鏡とTMTで行う密度ゆらぎ精密測定のための銀河サーベイの概略図。様々なサーベイ観測の相補性、相乗効果が見て取れる。

解くことができる。一度、ブラックホール有力候補天体が発見できれば、候補ブラックホールの運動を追跡することで、その後に起こり得る測光的、位置天文学的重力マイクロレンズ現象を観測し、ブラックホールの存在を確認できる（数十年、あるいは数百年後のイベントかもしれないが、天文学の財産になる）。さらに、天の川銀河の（中性子星および）ブラックホールの存在量、質量関数の研究は、マルチメッセンジャー天文学と相補的であり、宇宙における物質循環の物理の解明に貢献できる。上述のような重力マイクロレンズの統計的研究は、円盤領域の系外惑星の探査、主系列星の初期質量関数の制限など、天文学の重要課題にも迫ることを可能にする。

PFSの集光力、広視野、多天体分光能力は、2020年代の他の望遠鏡・装置と比較しても極めてユニークな装置である（Takada et al. 2014）。PFSは、銀河系周辺の多くの矮小銀河について、それぞれの自己重力圏内（潮汐力半径内）の多数のメンバー星の視線速度を測り、メンバー星の空間・速度構造（位相空間）の分布を調べることにより、矮小銀河のダークマター分布を正確に構築することができる。また、星形成史、現在の星形成活動、残存するガス量で異なる矮小銀河サンプルを調べることで、バリオンの効果（星形成、超新星爆発などの通常の物質が及ぼす銀河形成への影響）とダークマターの重力の効果を区別できるだろう。これら矮小銀河のダークマター分布は、フェルミ衛星（Fermi）のガンマ線のデータと組み合わせることで、ダークマターの対消滅⁶の信号の検出、あるいは検出されない場合はダークマターの素粒子的性質（衝突断面積）の制限の改善を可能にし、素粒子、天文学の融合分野の開拓に繋がる。TMTとのシナジーとして、TMTでは個々の星を空間分解し、より暗い星の速度分散を調べることで、矮小銀河のダークマターの分布をより精密に測定できる。また、矮小銀河のメンバー星、天の川銀河のハロー星の金属量をTMTの高精度分光で調べることで、矮小銀河、天の川銀河の形成史を解明する研究を改善できる。

6 粒子・反粒子が衝突・消滅してガンマ線などに代わる反応。

3.3.2

ダークエネルギー

3.3.2.1 広視野銀河サーベイによる宇宙の密度

ゆらぎ精密測定から探るダークエネルギー

宇宙の物質密度ゆらぎの時間進化は物質の自己重力と宇宙膨張のかね合いで決まるため、その精密測定は宇宙膨張を加速させる謎のエネルギー、ダークエネルギーの正体を探る上で中心的な役割をはたす。また宇宙の加速膨張を引き起こすメカニズムとして一般相対論の修正の可能性も活発に議論されているが、この場合一般相対論を仮定していた場合に成り立っていた宇宙の膨張速度と密度揺らぎの進化の関係が成り立たなくなるため、その検証にはIa型超新星爆発などの宇宙膨張を測定する観測と密度ゆらぎの観測を組み合わせることが重要となる（Weinberg et al. 2013）。

ただし、宇宙の質量分布の大半は直接観測できないダークマターが担うため、密度ゆらぎをどう測定するかは自明ではない。宇宙の密度ゆらぎを測る代表的な方法として、銀河の空間分布から質量密度分布を推定する方法、および銀河の形状測定から得られる重力レンズ効果を用いた測定がある。精度の良い密度ゆらぎの測定のためには、広い天域を深く撮像および分光することが必要になるが、HSCとPFSを擁するすばる望遠鏡はまさにこの研究にうってつけと言える。

そのようなHSCとPFSを用いた広天域撮像分光サーベイは、現行のすばる望遠鏡戦略枠観測によるHSC撮像観測（Aihara et al. 2018）およびPFSの完成後に予定されている戦略枠分光観測（Takada et al. 2014）で約1400平方度の天域に対して行われる。さらに、TMT時代に上記の撮像分光サーベイを計8000平方度まで拡大し、北天の高銀緯領域をほぼカバーするサーベイを行うことができれば、密度ゆらぎの進化を詳しく測定しダークエネルギーの状態方程式を1%の精度で決定することができる（図3.3.6）。

HSCとPFSの広天域サーベイ観測は上記のHSCと

PFSのすばる戦略枠観測に準拠しており、HSCによる g 、 r 、 i 、 z バンドの26等程度の深さの撮像観測に加えて、HSCの g 、 r バンド撮像観測データから選ばれた赤方偏移0.6から2.4までの強い[OII]輝線を示す星形成銀河のPFSによる分光観測を柱とする。分光銀河サンプルから銀河分布の三次元地図を作成し、それとHSCの重力レンズ測定との相互相関から銀河分布とダークマター分布の関係を直接測定することで、宇宙論パラメータの決定精度を大幅に向上させる。また下で述べるように一部の領域でTMTを用いた深い分光観測を行い、これを測光的赤方偏移の校正に用いる。

このような非常に広い天域を深く撮像するサーベイでは、宇宙論パラメータの統計誤差は非常に小さくなる。従って、系統誤差をどのようにして統計誤差と同程度かそれ以下に抑え込むかが最重要の課題になるが、ここで提案する深い撮像観測と分光観測の組み合わせは様々な系統誤差を抑え込む上で多くの利点がある。例えば重力レンズ解析において最も重要な系統誤差の要因の一つが測光的赤方偏移の校正だが、PFSとTMTの分光はその校正のための分光銀河サンプルの作成において最も強力な組み合わせである(Newman et al. 2015)。特にTMTの高い集光力は重力レンズ解析に用いる24-25等の銀河に対して無バイアスな校正用分光サンプルを構築する上で必須である。それにとどまらず、HSCと同じ天域にあるPFSの分光銀河カタログと重力レンズ測定に用いる銀河の空間分布の相互相関を測定することで測光的赤方偏移を校正する手法である「クラスタリング赤方偏移」(Newman 2008)も活用することで非常に精度の高い測光的赤方偏移推定が可能となる。

またPFSで得られた分光銀河の空間分布から質量分布を推定する際に両者の関係を特徴付ける「バイアス」の不定性が問題となるが、HSCの重力レンズ測定と組み合わせることでそのバイアスを直接決定できる。さらにPFSの分光観測による三次元銀河分布の宇宙論解析における系統誤差として、ハロー内での銀河の運動の効果があるが、これもPFSで分光された銀河の周りの質量分布をHSCで撮像観測された背景銀河の重力レンズ測定をすることでハロー内での銀河の運動の効果を直接的に推定し補正することが可能となる(Hikage et al. 2013)。このように同じ天域で撮像サーベイと分光サーベイを行うことで、様々な相乗効果が見込める(図3.3.6)。

さらに、他のサーベイ観測とデータを組み合わせることでさらなる相乗効果も見込める。例えば欧州が主導する近赤外線宇宙望遠鏡Euclid衛星(Laureijs et al. 2011)により大部分の天域において24等程度の Y 、 J 、 H バンドの近赤外線撮像画像が得られ、これをHSCの g 、 r 、 i 、 z バン

ド可視光撮像データと組み合わせることで測光的赤方偏移の精度のさらなる向上が期待される。Euclid衛星では V 、 I 、 S バンドでの撮像観測を元にHSCサーベイと同程度の数密度の銀河を用いて重力レンズ解析を行う予定になっているが、一つの面白い可能性として、同じ天域のHSCとEuclid衛星の銀河形状測定との相互相関をとることで、もう一つの重要な系統誤差、銀河形状測定との系統誤差を大幅に低減することができる。またこうした広視野サーベイは様々な波長の全天サーベイとの強い連携も期待できる。例えば、全天X線サーベイ衛星eROSITAのデータから選ばれたX線銀河団サンプルの赤方偏移測定や質量校正、全天分光サーベイ衛星SPHERExで選ばれる赤外分光銀河の空間分布との相互相関解析、全天宇宙背景放射観測衛星LiteBIRDによる宇宙背景放射マップを用いた重力レンズ測定との相互相関解析などが挙げられる。

またスローンデジタルスカイサーベイがそうであったように、これら広天域の撮像および分光サーベイは非常に広範な応用が可能でありそのレガシー価値も極めて高い。例えば上記のデータセットも用いて、銀河進化、銀河団、クエーサー、近傍銀河などの研究にも大幅な進展が期待できる。さらに下で述べるように変動天体探索の参照データを提供するという重要な役割も見逃せない。また、サーベイ領域は主に赤緯30度以上の天域であり、チリに設置されるLSSTからは観測できない天域である。従って、これらサーベイデータは今後多くの年数に渡ってその天域において最も良質の撮像および分光データを提供する基本データとして長く使用されることが期待できるだろう。

3.3.2.2 宇宙の絶対距離の精密測定と ダークエネルギー

ハッブル定数は宇宙の絶対距離と宇宙の年齢を決める最も重要な宇宙論パラメータであり、その精密測定は天文学の究極の目標の一つである。それに止まらず、ハッブル定数の精密測定はダークエネルギーの謎を解明する手がかりを与える可能性がある。その理由は、近傍宇宙でいわゆる距離はしご⁷を用いて測定されたハッブル定数と宇宙背景放射の観測から推定されたハッブル定数の間に矛盾の兆候が見られるからである(Riess et al. 2019; 図3.3.7)。後者は標準宇宙論モデルを仮定して得られる間接的な測定であることを考えると、この矛盾は現在の標準宇宙論モデルの綻びを示唆している可能性があり、大きな注目を集めている。

この矛盾の有力な解決策の一つとして時間変化するダークエネルギーの状態方程式があり(Poulin et al. 2019)、まさにダークエネルギー問題と関係し得る研究テーマであることがわかる。また他の可能性として、我々

7 天体の距離測定において、近いほうから異なる手法を次々につないで遠方の距離を測ること。

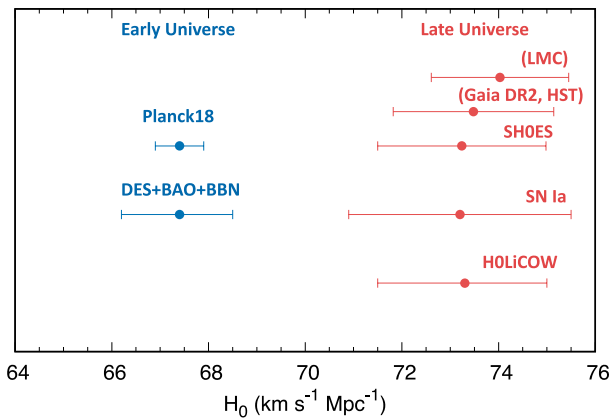


図3.3.7：距離はしごとを用いて測定されたハッブル定数(赤)と宇宙背景放射の観測、弱重力レンズ・バリオン音響振動・ビッグバン元素合成から推定されたハッブル定数(青)。

の近傍が宇宙全体に比べて低密度領域に該当するいわゆる近傍ボイドモデルもあるが(Ichiki et al. 2016)、このモデルでは密度の違いに起因する見かけの加速膨張が生じるためダークエネルギーの研究においても重要となる。

距離はしごとを用いたハッブル定数の測定は多くの経験則を組み合わせて行われるので、系統誤差の見積もりが難しい。したがって将来的にさらに高精度かつ信頼性の高い測定のためには、距離はしごとと独立な手法による測定を行い、結果を相互比較することが重要となる。ここでは、距離はしごとと独立な方法として重力波と重力レンズ時間の遅れを考える。すばる望遠鏡とTMTを駆使することで、ハッブル定数を広い距離スケールで0.5%の精度で直接測定することができ、ハッブル定数問題の起源を解明することができる。

まず前者の重力波を用いた方法は、中性子星やブラックホールなどのコンパクト天体の合体から発生する重力波の観測によってその重力波源までの光度距離が直接測定できるという事実を用いる(Schutz 1986)。ハッブル定数を測定するには重力波の観測に加えて合体に伴って放射される様々な波長の電磁波(電磁波対応天体)を観測し赤方偏移を測定する必要がある。重力波観測の位置決定精度は数平方度から数十平方度とそれほどよくはなく、この広い天域から電磁波対応天体を探索するのは容易ではない。例えば将来のLIGOやKAGRA大型低温重力波望遠鏡(KAGRA)といった重力波検出実験では連星中性子星合体が500メガパーセクの遠方まで観測できると期待されているが、この距離での合体2日後の電磁波対応天体の明るさは24等程度で非常に暗く、小口径望遠鏡で対応天体を発見するのは極めて難しい。一方、HSCの視野と集光力をもってすれば、上記のような暗い電磁波対応天体の探索も現実的なものとなり(次節)、ハッブル定数決定に適した連星中性子星合体を多く同定することができる。

上記のような暗い電磁波対応天体を探索するためには、

それに対応した十分に深い参照用の撮像画像が必要不可欠である。先に述べた密度ゆらぎ測定のための広視野撮像サーベイの撮像画像はこの参照用の画像として用いることができるため一石二鳥である。

また連星中性子合体だけでなく、他の種類の重力波も用いることでより広い距離の範囲でハッブル定数を測定できる。ブラックホール・中性子星連星合体は連星中性子星合体より重力波光度が高いためより遠方まで観測できる。また歳差運動を検出できれば連星中性子星合体よりも高い精度で光度距離を測定できるという利点もある(Vitale & Chen 2018)。電磁波対応天体の明るさがどの程度かまだ不確定性もあるがハッブル定数の決定に有用と期待されている。連星ブラックホール合体については電磁波対応天体の検出の見込みは少ないが、将来多数の連星ブラックホール合体が観測されれば、その空間分布と分光銀河の空間分布の相互相関を測定することで統計的にハッブル定数を測定できる(Oguri 2016)。この目的には先に述べたPFSを用いた広視野分光サーベイの結果が大いに活用できる。

もう一つのハッブル定数測定の有力な方法として、重力レンズ時間の遅れを用いた方法がある。現在すでに重力レンズキューサー複数像間の時間の遅れから他の方法と遜色のない精度の測定結果が得られつつある(Birrer et al. 2019)。この方法の精度はレンズ天体の質量をいかに精度よく決定できるかが重要となる(Treu and Marshall 2016)。TMTの近赤外線撮像分光装置(IRIS)によりハッブル宇宙望遠鏡(HST)やジェームズウェッブ宇宙望遠鏡(JWST)をも凌駕する高空間分解能画像が得られるので、これにより重力レンズを受けたキューサー母銀河の詳細観測により質量分布の決定精度を向上させ既存のキューサー重力レンズ系からハッブル定数をさらに精度よく決定する。TMTの集光力と高空間分解能を生かし、レンズ銀河の二次元面分光観測を行い動力学解析から質量分布の決定精度をさらに向上させる。この観測により、赤方偏移1程度までの広い距離の範囲でハッブル定数が1%以下の高精度で測定できるだろう。

また新種の強い重力レンズも活用することで、系統誤差のチェックおよび精度の向上も期待できる。その候補として、重力波、ガンマ線バースト、超新星爆発、高速電波バースト⁸といった時間変動天体の強い重力レンズがある(Oguri 2019)。これらは時間変動が短いためキューサー重力レンズと比べて時間の遅れの測定精度が高く、また爆発前後の観測により重力レンズを受けた母銀河もよりはっきりと観測でき、レンズ銀河の質量分布をより精密に決定できる。HSC、PFSの活躍によりこれら新種の強い重力レンズをより多く発見し既存のキューサー重力レンズ

8 1000分の1秒程度の短い時間で強い電波が突発的に放射される天体現象。

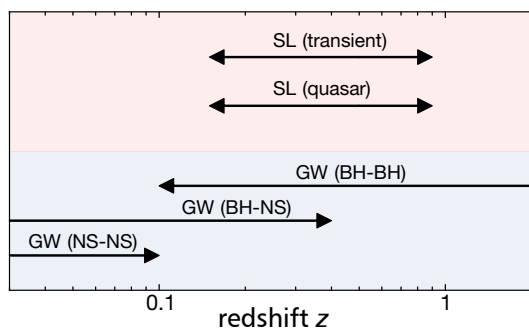


図3.3.8：重力波と重力レンズ時間の遅れを用いて測定できる絶対距離の赤方偏移の範囲。GWは重力波でNS-NSが連星中性子星合体、BH-NSがブラックホール・中性子星連星合体、BH-BHが連星ブラックホール合体を表す。SLは重力レンズ時間の遅れで、クェーサー(quasar)を用いる場合と様々な爆発現象(transient)を用いる可能性を本文中で議論している。

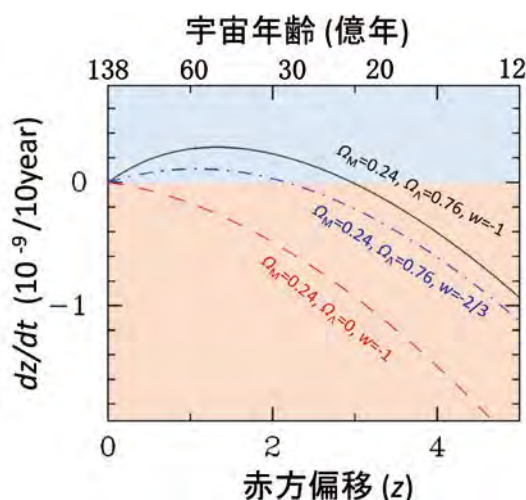


図3.3.9：各赤方偏移で期待される赤方偏移の時間変化 (Liske et al. 2008を参考に作成)。色の違いが宇宙論パラメータの違いを表す。

を用いた解析と比較することで系統誤差の詳しい検証を行い測定の信頼性を高める。図3.3.8に重力波と重力レンズ時間の遅れを用いて典型的にどの赤方偏移までの絶対距離を測定できるかをまとめる。

3.3.2.3 宇宙の加速膨張の直接測定

ダークエネルギーをより直接的に調べる方法として、遠方天体の赤方偏移の時間変化を検出することで膨張速度を直接測定する方法がある (Sandage 1962; 図3.3.9)。この方法は、ダークエネルギーを調べる全く新しい方法を提供するだけでなく、宇宙膨張の加速の直接的な検証が可能であるという意味においても意義深い。また膨張速度を直接測定するので、重力理論やダークエネルギーのモデルの詳細によらないという利点もある。

しかしながら期待される赤方偏移の時間変化は、赤方偏移にも依存するが典型的に10年間で視線速度に換算して 0.03ms^{-1} 程度と非常に小さく、その観測は容易ではない。この小さな速度変化を検出する具体的な手法として、クェーサースペクトル内の吸収線系を利用する方法が考えられている (Loeb 1998)。クェーサーのスペクトルには手

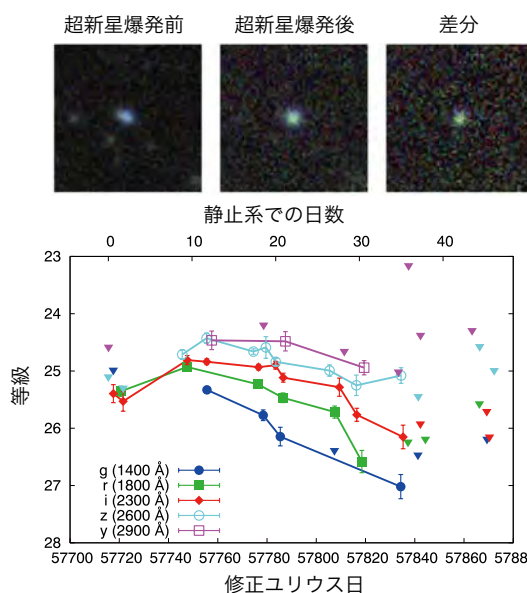


図3.3.10：HSCによって発見された赤方偏移2.4の超新星爆発の画像と光度曲線 (Moriya et al. 2019 a)。(横軸の修正ユリウス日はある時点基準にした経過日数。)

前のガス雲に起因する吸収線が多数みられ、これら吸収線の波長の時間変化をみる。多くの吸収線を用い、またいくつかのクェーサーのスペクトルの解析結果を組み合わせることで測定精度を高めることができるのが利点である。

この方法をもってしてもクェーサーのスペクトルを非常に高いS/N比で観測する必要があるので、既存の望遠鏡では非現実的である。TMTの集光力により初めてその測定が現実的なものとなる。例えば、TMTにより赤方偏移3の明るいクェーサーのスペクトル観測がS/N比 10^4 程度を実現できると考えられ、これを約30個のクェーサーについて行った場合、検出できる速度変化はおおよそ 0.01ms^{-1} と見積もられるので (Liske et al. 2008)、10-20年の時間変化を追うことで宇宙膨張の直接検出が可能となる。この目的を達成するためには波長分解能が 10^5 程度の安定な高分散分光装置が必要不可欠であり、TMTでは可視光高分散分光器HROSを用いてこの観測を行うことができる。またこうしたクェーサースペクトル内の吸収線の高精度観測で達成される他の研究課題として、微細構造定数(電磁相互作用の強さを表す物理定数)などの物理定数の時間変化などの高精度検証もある (Uzan 2011)。

3.3.3

物質の起源とマルチメッセンジャー天文学

3.3.3.1 宇宙で初めて重元素を作る超新星爆発をとらえる

ビッグバンで水素とヘリウムが合成された後、主に鉄までの元素は星の中で合成され超新星爆発によって散りばめられる。宇宙誕生直後からどのように元素が誕生し、

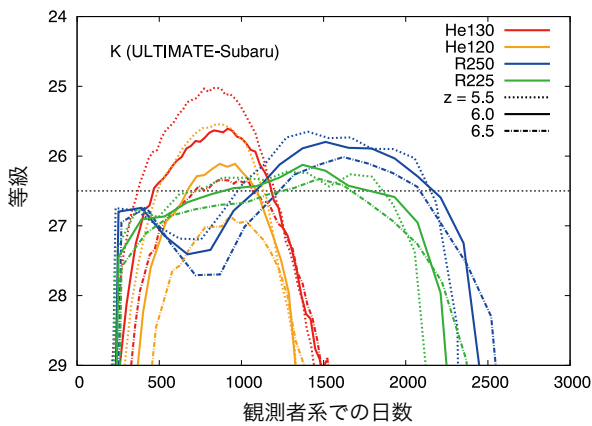


図3.3.11: ULTIMATEのKバンドで予想される対不安定型超新星爆発の光度曲線。4つの理論モデル (He130、He120、R250、R225) に対して、赤方偏移5.5、6.0、6.5で現れた場合の光度曲線を示している (Moriya et al. 2019b)。水平の点線は、ULTIMATEで到達できる観測感度 (26.5等級)。

循環していくかを解明するためには、宇宙誕生直後の超新星爆発を直接観測することが必要不可欠となってくる。このためには、より遠くより暗い超新星爆発を発見する必要がある。

HSCは可視光で暗い超新星爆発を発見するのに非常に優れた観測装置であり、現在までに最大赤方偏移2.4の超新星爆発が発見されている (図3.3.10)。この超新星爆発はHSCで辛うじて発見され (Moriya et al. 2019a)、その正体を確かめるためにケック望遠鏡によってスペクトルが取られた (Curtin et al. 2019)。しかし、得られたスペクトルは赤方偏移を確かめることができる程度のもので、超新星爆発の種類を特定するのに十分なスペクトルを得ることはできなかった。HSCでギリギリ発見されるほど暗いため現在スペクトルを取ることが困難な超新星爆発であっても、TMTで簡単にスペクトルを取ることが可能となる。例えばHSCにより27等級程度で発見され、最大でも25等級程度にしかならない遠方の超新星爆発であっても、TMTのWFOSやIRISを用いることで、数時間でスペクトルをとり、その正体を確かめることが可能となる。

すばる望遠鏡とTMTのシナジーはULTIMATEを用いて近赤外線超新星爆発探査を行うことで最大限に発揮される。TMTと同時期にULTIMATEが実現すると、可視光観測装置であるHSCでは捉えることの不可能な宇宙誕生直後に現れる超新星爆発をすばる望遠鏡によって発見し、TMTを用いてそのスペクトルを取ることによってどのような元素が宇宙初期の超新星爆発によって合成されているかを直接確かめることが可能となる。ULTIMATEによる超新星爆発探査によって初めて発見できる可能性のある、初期宇宙での元素合成に重要な役割を果たした超新星爆発として、対不安定型超新星爆発⁹ (Pair Instability

Supernova) が挙げられる。この超新星爆発は、1960年代にその存在が予言されたものの、現在に至るまでまだ発見されていない幻の超新星爆発である。この理由として、対不安定型超新星爆発は金属量が少なく質量の大きい星の起こす爆発であることが挙げられる。誕生直後の宇宙は金属量が実質的にゼロであり、大質量星も現在より多く作られたと考えられているため、対不安定型超新星爆発は初期宇宙に多く現れ、宇宙誕生直後の元素の起源に重要な役割を果たすとともに、力学的・化学的なフィードバックを通して初期宇宙の構造形成にも大きな影響を与えたと考えられている。

図3.3.11に対不安定型超新星爆発が赤方偏移6で起こった際にULTIMATEに搭載されるKバンドでどのような明るさの変化が予想されるかを示した。赤方偏移6の対不安定型超新星爆発でも、Kバンドで26.5等級まで届く探査を行えば検出することができることがわかる。例えば5年間に渡り半年に一度1平方度をKバンドで26.5等級まで観測する超新星爆発探査を行えば、赤方偏移6以上の対不安定型超新星が数個発見できる (Moriya et al. 2019b)。また、銀河の集まっている方向で同様の超新星爆発探査を行えば、重力レンズ効果による助けを得て10個程度の赤方偏移6以上の対不安定型超新星爆発を発見することが可能となる (Wong et al. 2019)。このようなサーベイには、5年間で約90晩のULTIMATEの観測時間が必要となる。このサーベイによってより発見される対不安定型超新星爆発の候補は、TMTのIRISによって分光することでその詳細を確かめることができる。例えばKバンドで26等級の対不安定型超新星爆発でも、1晩で分光してその正体を確定させ、どのような元素が合成されているかを確かめることが可能となる。すばる望遠鏡の広視野を活かして超新星爆発探査を行い、TMTの高い集光力を活かして暗い超新星爆発のスペクトルを取ることによって、超新星爆発探査の新たなフロンティアを切り拓くことが可能となる。

また、初期宇宙における対不安定型超新星の存在は身近な銀河系の星を観測することによって確かめられる可能性もある。銀河系内に対不安定型超新星爆発によって汚染された物質からできた可能性が指摘されている古い星が現在1つ知られている (Aoki et al. 2014)。古い星の分光をPFSによって一網打尽に行うことで、似たような星が多く発見されることが期待され、対不安定型超新星が初期宇宙でどの程度起こっていたのかを間接的に知ることも可能となる。

3.3.3.2 重元素の起源の解明：重力波天文学との連携

宇宙における重元素、特に金やプラチナ、ウランなど速い中性子捕獲反応 (rプロセス)¹⁰ によって合成される元

9 電子-陽電子対生成による重力崩壊の際に核燃焼の暴走により爆発するタイプの超新星。140 太陽質量以上の星が起こすと考えられている。

10 鉄より重い元素をつくる主要なプロセスのひとつで、爆発的環境でごく短時間に起こる。

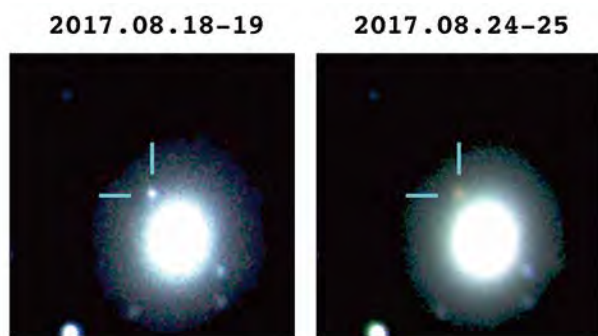


図3.3.12：すばる望遠鏡および南アフリカ赤外線天体観測所の IRSF 望遠鏡で観測されたGW170817の光赤外線対応天体の3色合成画像。
Credit: NAOJ/名古屋大学

素の起源は、宇宙物理学における大きな謎の一つである。起源天体としては、大質量星の超新星爆発や中性子星の合体現象など中性子星が関係する爆発的現象が考えられてきたが、長年直接的な証拠が得られることはなかった。しかし、2017年に中性子星合体からの重力波が初めて観測され (GW170817)、さらに重力波源の電磁波対応天体が同定されたことで、この状況が大きく変わりつつある。

中性子星合体はrプロセス元素を合成・放出し、放射性崩壊によって輝く「キロノバ」という現象が予想されてきた (Tanaka & Hotokezaka 2013)。実際にGW170817では、すばる望遠鏡などによって広範囲の探査観測と詳細な追観測が行われ (Tominaga et al. 2018)、中性子星合体が「キロノバ」として輝くことが明らかとなった (Utsumi et al. 2017; 図3.3.12)。中性子星合体でrプロセス元素が合成されている兆候が得られたのである (Tanaka et al. 2017)。このように、重力波と電磁波の連携による「マルチメッセンジャー天文学」によって重元素の起源の理解が大きく進みつつある。

しかし、宇宙における中性子星合体の頻度や、中性子星合体が作り出す元素の種類は未だ明らかにはなっていない。GW170817は40メガパーセクの距離で発見された稀な例で、より多くの中性子星合体を観測するためには、今後感度が向上する重力波望遠鏡によって発見される重力波源のマルチメッセンジャー観測を行う必要がある。2020年代には、米国のLIGO、欧州重力観測所のVIRGO、日本のKAGRAの連携観測により200-300メガパーセク程度の距離からの重力波が検出されることが予想される。その場合、観測される「キロノバ」は最も明るいときで22等級より暗く、わずか1-2日で24等級程度となる。重力波天体の位置決定精度は典型的には数十-百平方度程度であり、このような広い領域から暗い天体を即座に探し出すためには、HSCによる探査が必要不可欠である。

すばる望遠鏡で見つけた対応天体をTMTで分光することで、中性子星合体の重元素合成の情報を引き出すことが可能となる。「キロノバ」の放射は数日のタイムスケールで可視光から赤外線へ急速に進化していく (図3.3.13)。

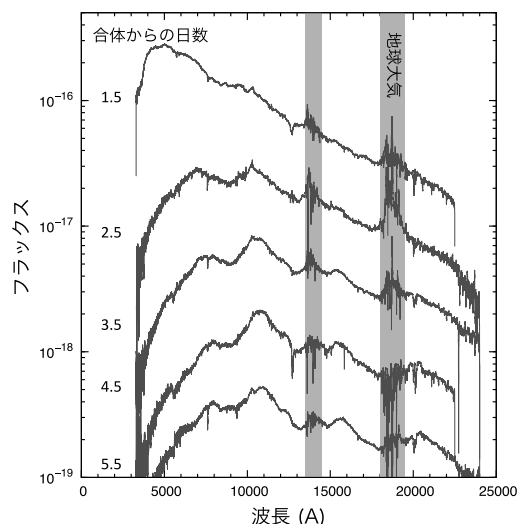


図3.3.13：GW170817の可視光・近赤外線スペクトルの時間進化 (Pian et al. 2017)。200-300メガパーセクの距離でこの質のスペクトルを得るには、TMTのWFOSとIRISによる分光が必要となる。

TMTは全ての観測装置の迅速な装置の切り替えが常に可能な望遠鏡で、このような速い時間進化を示す天体、広域な波長域の観測が必要な天体の観測に適している。TMTのWFOSとIRISによって「キロノバ」の可視光から近赤外線にわたる広域スペクトルを継続的に取得することができれば、中性子星合体の重元素合成の全容を明らかにすることができる。

3.3.3.3 恒星進化と物質循環

宇宙進化のなかで重元素がつくられ、それらが増加していくなか、星間物質中ではその多くがダスト (塵粒子) を形成し、光の星間吸収や星形成過程に大きな影響を与えるようになる。ダストは星や超新星爆発などからの放出物質中で形成され成長し、星間空間に供給されると考えられるが、そこでは破壊や変性も起こると考えられ、その過程を具体的に明らかにすることは積年の課題である。ダストに加えて有機物の形成・進化を理解することも重要課題である。すばる望遠鏡とTMTの連携観測により、超新星爆発や中小質量星からの質量放出、そして新星爆発や大質量星といった多様な恒星進化に関連する現象におけるダストや有機物の形成・進化の解明に新たな前進をはかる。これは星からの質量放出機構の解明とも密接に関連しており、恒星進化の研究にも大きく貢献するものである。

(1) 爆発天体・質量放出天体におけるダストの形成時期およびサイズ

超新星爆発の際には、放出された重元素からはダストが形成されるが、破壊もされる。超新星爆発によって実際にどのようなダストがどの程度作られ、星間物質に与えるのか観測的に解明するには、爆発後1年くらいからの光度曲線の測定や分光観測が重要となるが、これまではSN1987Aをはじめとするごく少数の超新星爆発で

しかこういった観測は実現できていない (Whitelock et al. 1989)。TMTの巨大な集光力は、例えば、1年に数例観測することができる30メガパーセク以内で起こる超新星爆発の後期段階の観測を可能にする。このような爆発は、最初の150日から200日程度まではすばる望遠鏡で追跡観測が可能である。その後、より長期間にTMTで観測を行うことで、光度曲線にいつ、どのようにダストによる減光が現れるのか特定するとともに、分光観測により減光の波長依存性を得ることで、形成されるダストサイズに制限を与えることができる。

超新星爆発から星周物質へのダスト供給を解き明かすという目的から、対象とするのは標準的なII型およびIa型超新星爆発である。特にIa型超新星については多量の重元素が放出されるにも関わらずダスト形成が確認された例がこれまでになく、新規性の高い重要な観測となる。

同様の観測を、新星爆発やウォルフ・ライエ星、高光度青色変光星¹¹などの質量放出を行う天体に対しても応用することで、放出物質のなかでのダストや有機物の形成・成長をトレースすることができる。これには質量放出の初期から放出物質の分布形状と放射スペクトルを観測でとらえることが鍵となる(図3.3.14)。これまでの観測からは、例えば新星爆発においてははじめに炭素質ダストが形成されて中心星(白色矮星)の紫外線を遮蔽することが以後のシリケート形成の要因となったという指摘もある(Sakon et al. 2016)。こういった観測を新星その他の天体での物質進化の包括的理解につなげるには、TMTの高空間分解能・高感度で時間変化を追う観測が必要となる。実際の観測プログラムとしては、すばる望遠鏡で比較的長期にわたって近・中間赤外線観測を行ってスペクトル変化を追う。そのなかで、特に早期の放出物質に対してTMTにより中間赤外線で、すばる望遠鏡により近赤外線で補償光学観測を行うと、ともに0.1秒角レベルの高空間分解能を実現できる。これにより、どこでどのようなガスが消費されダスト形成が起こっているのか、といった物質進化と星周物質との相互作用を特定することが可能となる。

(2) 中小質量星の星周でのダスト形成と質量放出

中小質量星は、その数の多さから、星間物質に最も多量のダストを供給している天体であると考えられている。また、放出物質中には有機物が含まれる場合も多い。これらの物質がいかに形成され、成長して星間空間に入っていくのか、さらにはそれが惑星系形成にどう影響しているのか、そしてどのようにして惑星系有機物の起源となったのか、といった重要課題が提起されている。

最も簡単には、星から放出された物質は球対称に広がって星間物質にとりこまれていき、その過程で中心星からの放射や星間空間の紫外光などの影響を受けながら

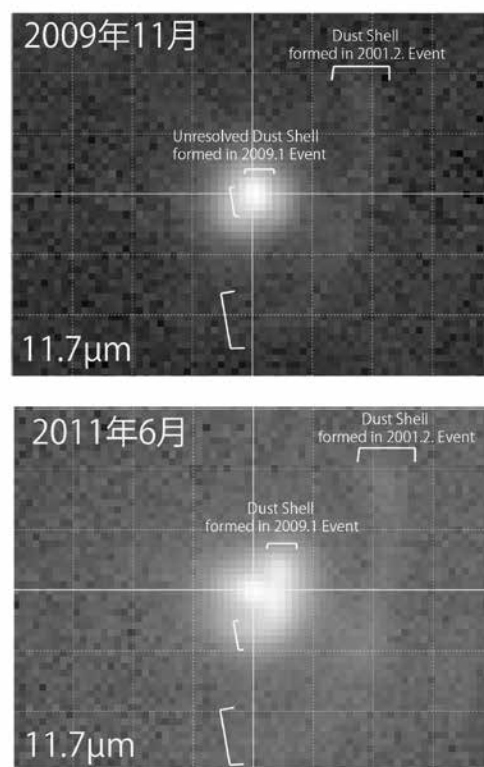


図3.3.14：すばる望遠鏡のCOMICSで捉えられたウォルフ・ライエ星WR140の画像。

さまざまな分子・ダストが形成されていくとモデル化される。しかし実際には、放出される物質の密度には大きな不均一性があるなかで星周殻が形成され、その星周殻は異なる温度の成分から成っている様子が明らかになってきている。形成されるダストや有機物はそのなかで成長し、変性をうけていく。星のごく近傍をTMTによる超高空間分解能での赤外線観測で、大きく広がった星周殻(の低温成分)についてはすばる望遠鏡による広視野観測で観測することにより、質量放出過程における物質進化を解明する。

ダストは中小質量星の質量放出機構とも密接に関連している。すなわち、ダストが受ける星からの輻射圧はダストを駆動し、それが周囲のガス粒子を引きずりながら飛んでいくということが想定され、もっとも簡単にはダストとガスは同じ流速をもつと仮定される。これを観測的に検証し、ダスト・ガス間の相互作用を定量的に理解していくには、ガスとダストの流速を測定することが重要である。ガスの流速は分子(原子)輝線の観測ですでに測定例が多数ある。ダストについてはこれまで実現してはいないが、中心天体からの輝線(無偏光)と流速をもったダストによって散乱される同輝線(偏光あり)の速度差(ドップラシフト)を偏光分光観測によって測定することで調べることが可能であると考えられる。このような観測は大量の大質量星が短期間に生成している銀河(スターバースト銀河)から放出されるダスト流速の測定で行われた例がある。し

11 ウォルフ・ライエ星や高光度青色変光星は、大質量星のなかでも特に質量の大きな星が主系列段階を終えた後の進化段階に対応する天体と考えられている。

かし、星からの質量放出は毎秒数km程度であり、これを検出するには高波長分解能偏光分光観測を必要とする。すばる望遠鏡での近傍の明るい天体で試験的に観測を実施し、TMTの高分散分光器に偏光機能を搭載し、多様な星に適用していくといった戦略が考えられる。

3.3.3.4 宇宙線の起源：IceCube 高エネルギーニュートリノの対応天体

アイスキューブ・ニュートリノ観測所 (IceCube) による PeV-TeV (10^{15} ~ 10^{12} 電子ボルト) 帯の高エネルギーニュートリノの検出により、宇宙における高エネルギーニュートリノ及び高エネルギー宇宙線の起源を探る観測的天文学が新たに拓けた。しかし、これまでその起源天体が同定された例は、IceCube-170922 A に対するブレーザー (相対論的ジェットが視線方向を向いている活動銀河核) TXS 0506+056 たった1天体のみである (IceCube Collaboration 2018; 図3.3.15)。その理由は、IceCube 実験のニュートリノ到来方向の決定精度が典型的には1度角程度とそれほど良くないこと、及び電磁波での追観測施設の性能が不十分であったことがあげられる。初の同定例となったブレーザーという種族は、ガンマ線衛星 Fermi により全天で3000以上の天体がモニター観測され、また可視光においても中小口径望遠鏡で詳細観測が可能な天体が多い。実際、TXS 0506+056 はニュートリノ検出前後に Fermi 衛星でガンマ線での増光が観測され、可視光での追観測により距離 (赤方偏移) が決定された (Paiano et al. 2018)。

一方、高エネルギーニュートリノの起源はブレーザー以外にも、ガンマ線バーストや特殊な超新星などが理論的に提唱されている。ブレーザーは上記のように対応天体として同定された例があるものの、統計的には検出されるニュートリノ全体の27%程度以下の寄与しかないと考えられている。ガンマ線バーストも同様に数%以下の寄与であり、超新星に対する観測的制限 (Morgan et al. 2019) またはニュートリノ対応天体としての超新星の同定が強く期待されている。

ここで想定している超新星は、ジェットが何らかの理由 (例えばジェットのエネルギーが不十分、厚い星周物質など) で外部に出ることができずに、ガンマ線バーストとしては観測されない Ic 型と呼ばれるタイプの超新星 (重力崩壊型超新星の1%程度) である。一般論として、IceCube 実験の検出する高エネルギーニュートリノは典型的には赤方偏移1程度の天体から放射されたと考えられ、その距離での Ic 型超新星の明るさは26等級程度である。このような暗い超新星の発見には、8m級以上の望遠鏡が必要となる。また上記のように、IceCube 実験のニュートリノ到来方向の典型的な位置決定精度は1度角程度である。これらを同時に実現するためには、すばる望遠鏡 HSC でのサー

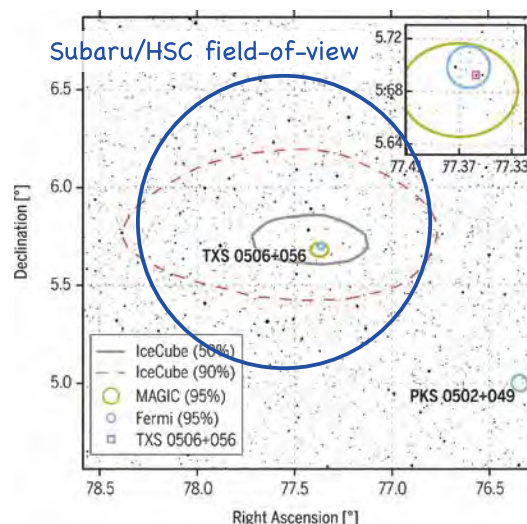


図3.3.15：初めての対応天体同定が実現したIceCube-170922 Aの到来方向 (赤) とHSCの視野 (青)。TXS 0506+056 が対応天体。

ベイ観測が必須となる (図3.3.15)。

一方で、ニュートリノ検出時 (もしくは前) に爆発したと考えられる超新星は到来方向誤差内に100天体程度存在する。この中で偶然同じ時期に爆発したニュートリノ放射とは無関係な Ic 型超新星の数の期待値は1を切るため、そのような天体が同定できれば、ニュートリノ放射との因果関係が期待される。既存の望遠鏡では26等級の超新星の分光同定は不可能であるが、TMTでの可視光分光観測が可能となれば、超新星タイプ及び距離 (赤方偏移) の決定が可能となる。後者は母銀河の赤方偏移で代用可能なケースもあるが、どの銀河が超新星の母銀河か不明の場合もあるため、超新星スペクトルによる赤方偏移の決定が望まれる。

現在、年間数イベント程度のニュートリノ検出であるが、TMT運用時にはIceCube実験自身もGen2と呼ばれるアップグレードが完了している予定であり、感度上昇に伴うイベント数の増加が見込まれる。また到来方向の決定精度の改善も見込まれているが、依然としてHSCのような広視野カメラでのサーベイ観測が必須である。

HSCによる広視野突発天体サーベイ観測とTMTによる分光追観測を年数回のIceCubeアラートに対して行うことによって、Ic型超新星が高エネルギーニュートリノ及び高エネルギー宇宙線の起源天体であるかどうか初めて決着がつく。その頃までにはブレーザーの寄与の割合についてより厳しい制限がついていと期待され、本観測により高エネルギーニュートリノ及び高エネルギー宇宙線の起源の全貌が明らかになると期待される。

参考文献

- Abbott, B. P., et al. 2019, ApJL, **882**, L24
- Aihara, H., et al. 2018, PASJ, **70**, S8
- Aoki, W., et al. 2014, Science, **345**, 912
- Birrer, S., et al. 2019, MNRAS, **484**, 4726

Curtin, C., et al. 2019, *ApJS*, **241**, 17
 Hawking, S. 1971, *MNRAS*, **152**, 75
 Hikage, C., et al. 2013, *MNRAS*, **435**, 2345
 IceCube collaboration 2018, *Science*, **361**, 1378
 Ichiki, K., et al. 2016, *Phys. Rev. D*, **93**, 023529
 Kashlinsky, A., et al. 2019, *BAAS*, **51**, 51
 Laureijs, R., et al. 2011, *arXiv:1110.3193*
 Liske, J., et al. 2008, *MNRAS*, **386**, 1192
 Loeb, A. 1998, *ApJ*, **499**, L111
 Morgan, R. 2019, 36th International Cosmic Ray Conference (ICRC2019), 963
 Moriya, T. J., et al. 2019a, *ApJS*, **241**, 16
 Moriya, T. J., et al. 2019b, *PASJ*, **71**, 59
 Newman, J. A. 2008, *ApJ*, **684**, 88
 Newman, J. A., et al. 2015, *Astropart. Phys.*, **63**, 81
 Niikura, H., et al. 2019a, *Nature Astronomy*, **3**, 524
 Niikura, H., et al. 2019b, *Phys. Rev. D* **99**, 083503
 Oguri, M. 2016, *Phys. Rev. D*, **93**, 083511
 Oguri, M. 2019, *Reports on Progress in Physics*, **82**, 126901
 Oguri, M., et al. 2018, *PASJ*, **70**, S26
 Paiano, S., et al. 2018, *ApJL*, **854**, L32
 Pian, E., et al. 2017, *Nature*, **551**, 67
 Poulin, V., et al. 2019, *Phys. Rev. Lett.*, **122**, 221301
 Riess, A. G., et al. 2019, *ApJ*, **876**, 85
 Sakon, I., et al. 2016, *ApJ*, **817**, 145
 Sandage, A. 1962, *ApJ*, **136**, 319
 Sasaki, M., et al. 2016, *Phys. Rev. Lett.*, **117**, 061101
 Schutz, B. F. 1986, *Nature*, **323**, 310
 Sugiyama, S., et al. 2019, *arXiv:1905.06066*
 Takada, M., et al. 2014, *PASJ*, **66**, R1
 Tanaka, M., & Hotokezaka, K. 2013, *ApJ*, **775**, 113
 Tanaka, M., et al. 2016, *ApJL*, **826**, L19
 Tanaka, M., et al. 2017, *PASJ*, **69**, 102
 Tominaga, N., et al. 2018, *PASJ*, **70**, 28
 Treu, T., & Marshall, P. J. 2016, *Astron. Astrophys. Rev.*, **24**, 11
 Utsumi, Y., et al. 2017, *PASJ*, **69**, 101
 Uzan, J. -P. 2011, *Liv. Rev. Relativity*, **14**, 2
 Vitale, S., & Chen, H. -Y. 2018, *Phys. Rev. Lett.*, **121**, 021303
 Weinberg, D. H., et al. 2013, *Phys. Rep.*, **530**, 87
 Whitelock et al. 1989, *MNRAS*, **240**, 7P
 Wong, K. C., et al. 2019, *PASJ*, **71**, 60

第4章

Chapter 4

すばる望遠鏡と TMTの科学戦略

4.1 今後の科学戦略

ここでは第3章にまとめられた、すばる望遠鏡とTMTの連携によって進めるべき科学観測を、実際に実行すべき戦略としてまとめる。特にTMT建設期である2020年代のすばる望遠鏡での探査プロジェクトの推進、TMT初期運用期である2030年代初頭のTMTの第一期装置群によるすばる望遠鏡で見つかった課題の解明の観測、TMT本格運用期である2030年代のTMTとすばる望遠鏡を連携した独自性の高い観測の推進、という3つの時期と観点に分けて提案する。

4.1.1.

2020年代～すばる望遠鏡による 探査プロジェクトの推進

TMTの建設期にあたる2020年代には、TMTとの連携を見据えつつ、すばる望遠鏡が観測計画を進めることになる。すでに多数の探査およびプロジェクト観測の計画が提案されている。主な計画とその科学目標を整理したものを表4.1.1に示す。これらの多くは、2030年代初頭に本格運用が予定されているTMTで初期成果をあげることにつながるものである。すでに観測計画が具体化されているものから、今後の装置開発・大幅アップグレードを前提にしたものまで幅があるが、ここでは観測の実施時期を想定しつつ、主な計画を概観する。

4.1.1.1 PFSによる大規模分光探査

PFSは2022年からの運用開始を予定して装置製作が進められている。8m級望遠鏡では他に例をみない広視野とファイバー本数で可視光だけでなく近赤外線の一部まで

カバーする極めて強力な観測装置であり、宇宙論および銀河研究のための大規模探査計画が準備されている。

計画としては、1400平方度の領域に対し赤方偏移2.4までの銀河約400万天体のスペクトルを取得し、宇宙論モデルに対する決定的な制約を加えることが提案されている。また、銀河系やその周辺の銀河の星の分光観測から、銀河形成と暗黒物質の性質の解明とそれを通じた Λ CDM（ラムダ コールドダークマター）モデルの検証が提案されている。銀河進化の研究においては、赤方偏移5程度までの銀河約30万天体の分光観測により、星形成史や化学進化、AGN活動など銀河の基本的な性質の関連を解明することを目指している。

300夜あるいはそれ以上の観測を2022年から約6年で進める計画が、7つの国と地域にまたがる23研究機関からなる国際チームにより準備されている。この計画で得られる科学的成果はTMTでの研究につながるとともに、得られる多数の銀河と星の低・中分散スペクトルからは、より直接的にTMTの観測ターゲットが供給されることになると期待される。

4.1.1.2. HSCによる超広視野探査

2014年からHSCの戦略的観測が継続して実施されている。すばる望遠鏡の330夜を投入して進められているこの観測は、Wide / Deep / UltraDeepの3つのレイヤーからなり、Wideレイヤーでは1400平方度を26等級（ r バンド、 5σ ）の深さで多色撮像しようという、かつてない広さと深さを実現する探査である。2020年代以降もHSCによる大規模撮像観測を行うことは、広視野探査を主たる特徴とする今後のすばる望遠鏡にとって当然検討されるべきであり、例えば3.3.2節では8000平方度の広天域サーベイが提案されている。後述する時間軸天文学と組合せるためにも、HSCによる次世代の広視野サーベイ計画をさ

PFSによる大規模分光探索	
目的1	宇宙の密度揺らぎから探るダークエネルギー (3.3.2.1)
目的2	宇宙のバリオン地図の作成 (3.2.3.2)
目的3	銀河系と近傍銀河の星の観測による銀河系考古学 (3.2.5.2; 3.2.5.3)
目的4	銀河統計的探索 (3.2.4.4)
規模・夜数	300夜以上
HSC 超広視野探索	
目的1	ダークエネルギー状態方程式の精密測定 (1%) (3.3.1.3; 3.3.2.1)
目的2	銀河系最外縁部構造の解明 (3.2.5.2)
目的3	強重力レンズの統計的探索 (3.3.2.2)
目的4	太陽系小惑星の深探索、惑星大移動モデルの解明、初代クエーサーの探索 (3.1.2.2; 3.2.2.2)
規模・夜数	8000平方度
HSC時間軸天文学・マルチメッセンジャー天文学	
目的1	重力波天体の光学同定、放出物質の解明 (3.3.3.2; 3.3.3.3)
目的2	ニュートリノ天体の起源解明 (3.3.3.4)
規模・夜数	随時観測
ULTIMATE WFIによる近赤外線深宇宙撮像探索	
目的1	宇宙初期 ($z > 10$) の銀河の探索 (3.2.1.2)
目的2	大質量銀河形成史の解明 (3.2.4.2)
目的3	宇宙初期の超新星爆発 (対不安定型超新星爆発) の探索 (3.3.3.1)
規模・夜数	5年間で約100夜
WFIRSTと広視野フォローアップ連携	
目的1	重力マイクロレンズ法の視差効果 (HSC/ULTIMATE) による系外惑星探索 (3.1.1.4)
目的2	PFSによる測光赤方偏移校正 (3.3.2.1)
規模・夜数	100夜程度
neo-IRdによる晩期M型星周りのハビタブル系外惑星探索	
目的1	ハビタブル地球型惑星の統計的サンプルの構築 (3.1.1.2)
目的2	雪線以遠の系外惑星の網羅的探索 (3.1.1.4)
規模・夜数	長期モニター観測
SCEXAOによる大規模直接撮像サーベイ観測	
目的1	雪線付近の系外惑星の直接撮像探索 (3.1.1.4)
規模・夜数	検討中

表4.1.1：すばる望遠鏡を用いた探索およびプロジェクト観測の候補リスト。各科学目的には対応する節の番号を示してある。

らに具体化していくべきである。

HSCは重力波や高エネルギーニュートリノが検出された際に、起源天体を光学同定するうえで強力である。HSCによる探索観測が継続的に行われている間、こういった突発天体の出現に対応した観測を実施する。HSCの観測そのものから超新星を多数検出することとあわせて、これらの時間軸天文学・マルチメッセンジャー天文学は、TMT運用開始後はそれによる分光フォローアップ観測と連動することでユニークな成果を得ることを可能にする。

4.1.1.3. ULTIMATE による近赤外線探索

高赤方偏移天体の観測には、当然ながらより長波長域での観測が必要となる。HSCとPFSで推進する可視光での広視野撮像・分光観測に対応し、近赤外線での広視野観測を実現しようと計画されているのがULTIMATEである。ULTIMATEは広視野補償光学の実現を目指す計画で、視野200平方分角にわたって星像を改善し、8m級望遠鏡の近赤外線観測ではこれまでにない広視野探索能力を獲得

し、かつ多天体分光観測も実施する。これにより、赤方偏移10を超える初代銀河の探索や、大質量銀河の形成史の解明に挑む。また、高赤方偏移の超新星爆発を探索し、対不安定型超新星のような初期宇宙の時間変動天体を探索する。

HSC・PFSに続き、ULTIMATEも2020年代後半に100夜規模（最大300夜程度）の時間を投入して大規模観測を実施する計画が提案されている。特に重要となるのが、2020年代に打上げが予定されるスペース望遠鏡では実現できない広視野のKバンド、および近赤外線の多彩なナローバンド・ミディウムバンドを組み合わせた撮像探索である。数平方度から10平方度を26等級程度でカバーする広域探索に加え、0.5平方度～1平方度の同じ領域をKバンドで繰り返し観測することで、遠方宇宙の時間変動天体を探索する計画が提案されている。後者は全データを足しあげることで、最終的にはかつてない深さのKバンド帯の深撮像データを提供することができる。これは波長2 μ mより短波長での観測に特化された欧州のユークリッ

ド衛星 (Euclid) や米国の広視野赤外線サーベイ望遠鏡 (WFIRST) などのスペース望遠鏡ときわめて親和性が高いものである。

4.1.1.4. WFIRST との連携

2020年代半ばに打ち上げが計画されている WFIRST は赤外線広視野探査を計画しており、地上からの可視光広視野撮像・分光観測との連携はユニークな観測成果を生み出すことが期待される。WFIRSTによる広域銀河探査に対し、すばる望遠鏡は測光的赤方偏移の測定精度の向上等で貢献する。WFIRSTは重力マイクロレンズを用いた低質量の太陽系外惑星 (系外惑星) を多数検出することが期待され、すばる望遠鏡の可視光・近赤外線撮像との同時観測は惑星系の質量決定に重要な役割を果たす(3.1.1節)。広視野観測による銀河の研究においては、WFIRSTとすばる望遠鏡は波長域と感度の点で相補的な関係にある(3.2節)。

連携観測は、WFIRSTの打ち上げ時期によるが2020年代後半に実施することが計画されている。重力マイクロレンズを用いた系外惑星の研究は同時観測が重要となるため、同時期にすばる望遠鏡で対応する観測装置が稼働している必要がある。

4.1.1.5. 近赤外線ドップラー観測によるハビタブル惑星探査

2019年からIRDによるM型矮星まわりの系外惑星の探査が実施されている。これにより地球サイズの系外惑星がハビタブルゾーンに検出されることが期待されている。発見される天体は将来のTMTの観測ターゲットとしても重要である。現在の探査計画終了後には、IRDの感度を向上させ、多様な系外惑星における生命存在可能性を調査することができるように探査を拡張することが提案されている(3.1.1節)。

IRDの運用およびその機能向上は、TMTのMODHISの開発とそれを用いた研究につながるものである。

4.1.1.6. 極限補償光学による系外惑星直接撮像

系外惑星の直接撮像および検出された惑星の分光観測は、系外惑星とそこでの生命活動の調査に決定的な役割を果たす。現在、すばる望遠鏡では超高コントラスト補償光学システムSCEXAOとコロナグラフ装置を用いた観測、およびSCEXAOとIRDを結ぶなどの新たな開発が精力的に行われている(3.1.1節)。これらはすばる望遠鏡による系外惑星研究を推進するとともに、TMTの系外惑星観測装置PSIにつながる開発としても重要な役割を果たすと期待される。

4.1.2.

2030年代初頭～すばる望遠鏡の成果を踏まえて推進するTMT初期観測

2029年に予定されているTMTの科学運用開始以降、第一期観測装置を活用していち早く科学成果を得ていくことが重要となる。そのためにすばる望遠鏡の探査観測の成果をふまえて、TMTによる観測を入念に準備する必要がある。TMTの第一期観測装置として予定されている3つの観測装置ごとに期待される観測とそれにむけた準備を整理する。

4.1.2.1. IRIS

IRISは近赤外線での回折限界の撮像・分光観測を行う装置であり、様々な観測対象とテーマに活用される。特に高感度の分光観測や、高解像度を活かした位置天文学において抜群の観測性能を発揮する。

太陽系外惑星 (系外惑星) の研究においては、IRISによる面分光観測を行うことで、系外惑星の検出と大気成分の測定を行う。これは後述するMODHISとは異なり、惑星の直接観測を行うものであり、第2期観測装置がめざすより本格的な系外惑星大気の研究につながるものである(3.1.1節参照)。

遠方銀河の観測においては、重要な輝線が近赤外線領域に入ってくるような高赤方偏移の天体の高感度分光観測において威力を発揮する。特に赤方偏移6以上の天体のライマン α 輝線やヘリウム輝線の観測により、初代星や初代銀河の同定に挑む(3.2.1節参照)。

またマルチメッセンジャー天文学においても、初期宇宙において期待される対不安定型超新星の同定や、すばる望遠鏡HSCなどで光学同定される重力波天体の分光観測を実施する(3.3.3節参照)。

このほか、銀河系中心の超巨大ブラックホール近傍における星形成や物理法則の検証においては、IRISによりブラックホール周りの星の位置・運動の精密測定を行う(3.2.5.4節参照)。また、すばる望遠鏡HSCなどで見いだされた高赤方偏移クエーサー候補天体の分光追跡観測(3.2.2節参照)、さまざまな時代の銀河の進化過程をさぐるための面分光観測も期待される(3.2.4節参照)。

4.1.2.2. WFOS

WFOSは可視光の多天体分光観測を行う基盤的装置である。

特に様々な赤方偏移の銀河の分光観測を行うことにより銀河間物質の分布を測定し、宇宙の大規模構造・バリオン地図の作成を行う(3.2.3節参照)。また、宇宙における星形成の最盛期における銀河・銀河間物質の相互作用を解明する。

マルチメッセンジャー天文学においては、すばる望遠鏡HSCなどで光学同定される重力波天体やニュートリノ対応天体の可視光分光追跡観測がTMTに期待されるが、WFOSはその中心的な役割を担う(3.3.3節参照)。

また、銀河系をはじめとする局所銀河群における星の分光観測により化学組成や視線速度の測定を行い、衛星銀河の降着過程や矮小銀河の暗黒物質分布の解明を行う(3.2.5節参照)。

これらの銀河の研究においては、すばる望遠鏡のHSCやPFSによる広視野撮像・分光観測で選ばれた天体や領域の観測を実施することにより、類を見ない研究成果を得ることが期待できる。

4.1.2.3. MODHIS

MODHISは近赤外線において高分散分光を行う装置であり、補償光学装置とともに用いてコンパクトながら高い波長分解能を実現し、高精度の視線速度測定を可能にするのが特長である。すばる望遠鏡IRDの発展と位置付けることもでき、装置開発の面でもすばる望遠鏡との連携が重要となる。

この性能を活かし、地球サイズの系外惑星の視線速度法による同定や、トランジット分光観測により系外惑星の大気組成の測定を行う(3.3.1節参照)。これらは、系外惑星における生命存在可能性の探査における中心的な課題である。また、赤外線領域における高波長分解能を活かし、原始惑星系円盤の観測により、惑星形成を左右する雪線の同定や円盤の消失の解明に威力を発揮すると期待される(3.1.3節参照)。

4.1.3.

2030年代～TMTの本格運用と すばる望遠鏡との連携

2030年代にはTMTが本格運用に入り、第一期観測装置に続いて多彩な観測装置が搭載される。これを活かし、多様な科学的成果を得ることが期待される。第二期観測装置としては、可視光の高分散分光器や中間赤外線の撮像分光装置、極限補償光学を用いた太陽系外惑星観測装置などが提案されており、開発の優先順位が今後つけられていく予定である。

このなかで日本の研究者が独自性の高い研究成果を得ていくには、すばる望遠鏡とTMTを一体的にとらえて科学観測を進める連携が重要である。

まず、マルチメッセンジャー天文学においては、両望遠鏡を同時に運用することによって成果が期待される。すなわち、重力波やニュートリノ、ガンマ線バーストの検出をうけ、すばる望遠鏡による広視野探査によって光学対応天体を同定する。超新星爆発については、すばる望遠鏡

自身によるモニター観測で現象を検出できる。これらの天体や現象に対して、TMTを用いて高解像度撮像や分光での追跡観測を実施する。

一方、遠方銀河や銀河系内の星における重要天体候補をすばる望遠鏡による広視野探査で検出し、これをTMTで分光観測するという連携は幅広く行われると期待できる。そのためには、2020年代に行われるすばる望遠鏡による探査観測を、装置性能の向上をはかりながら拡充していくことが重要となる。

また、長期的な時間変動を起こす天体については、すばる望遠鏡で長期モニターを実施し、これによって見いだされた重要天体や重要な観測時期にTMTの観測時間を割りあてるという連携も期待される。

このほか、2030年代に登場してくるX線や赤外線等の様々な波長での観測装置、とくにスペースミッションで新たな天体や現象が検出されると期待される。その光学同定をすばる望遠鏡で行い、TMTの高感度分光観測につなげるという連携も期待できる。こういった観測は、物理分野や惑星科学分野への波及も期待できるものである。

このように、2030年代にはすばる望遠鏡の役割はよりいっそう広視野および長期的な探査に移行すると見込まれる。そのための観測体制の整備が必要である。

4.2 すばる望遠鏡とTMTの運用

望遠鏡が大型化し、国際協力で少数の望遠鏡のみ建設可能な状況となると、望遠鏡時間をより効率的に使用できるような運用の工夫が重要となる。すばる望遠鏡とTMTの連携により独自性の高い観測成果を生み出すことを目指す日本においては、それにむけた共同利用運用や国際協力のありかたの検討を深め、実行に移していくことが重要である。

4.2.1.

すばる望遠鏡の運用ビジョン

4.2.1.1. 観測の実施スタイル

すばる望遠鏡は、採択された観測プログラムに対して観測日を割りあて、観測者が現地に足をはこんで観測を実施するという形(クラシカル観測)で運用をスタートした。これは観測者が責任をもって観測時間を最も有効に使うための工夫を行うことを促すものであり、多くの研究者が観測手順や装置に精通する機会となってきた。一方、観測スケジュールが固定されるため、天候などの条件の変化に対応して最適な装置や観測天体を選択することができなくなるという点がデメリットである。観測の効率化を図る観点から、他の大望遠鏡では、高評価を得た観測プログラ

リモート観測の割合の推移

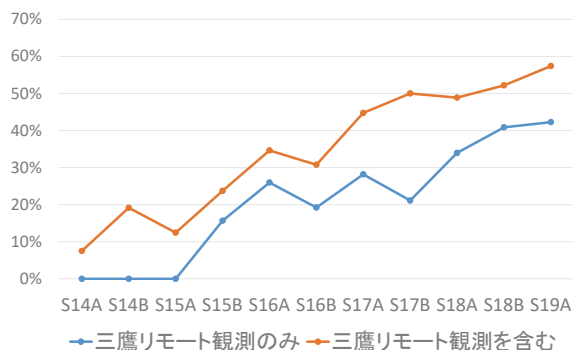


図4.2.1：三鷹からのリモート観測の割合の推移。S15A（2015年前期）までは三鷹からのリモート観測はサポートの位置づけで、観測の責任者がハワイを訪問することとなっていたが、S15B（2015年後期）からは三鷹からの参加のみで観測を実施することが認められた。現在では三鷹リモート観測が約半数となっている。

ムを評価点や観測条件を考慮して観測所が順次実施する方式（キュー観測）をとるケースが増えてきている。また、クラシカル観測であっても望遠鏡サイトに足を運ぶのではなく、山麓の観測所施設あるいは自身の研究機関から観測を実施するリモート観測とする天文台も多い。

すばる望遠鏡も、山麓施設あるいは国立天文台三鷹キャンパスから観測者が観測を実施するリモート観測を取り入れてきた（図4.2.1）。また、短時間のプログラムは観測所が観測を実施する「サービス観測」とするとともに、HSCの運用では本格的にキュー観測を取り入れている。

今後、すばる望遠鏡は大規模探査プログラムにこれまで以上に重点がおかれることから、キュー観測中心の運用に移行し、科学的成果の最大化をはかりつつ運用を効率化することが望まれる。また、観測装置やプログラムによってはクラシカル観測の必要性も残ると想定されるが、その場合もリモート観測を基本とし、柔軟なスケジューリングに対応する必要がある。

4.2.1.2. 大規模探査プログラムと小規模一般共同利用プログラムのバランス

今後のすばる望遠鏡の運用においては、広視野観測機能を活かした大規模探査プログラムの重要性が増してくる。実際、4.1節で見たように、重要性および緊急性の高いプログラムが次々と計画・提案されている。一方、長期的な天文学及び関連分野の発展のためには、個々の研究者や研究グループのアイデアや経験に立脚した小規模観測プログラムの機会を確保し、新しいテーマや研究分野を広げ、発展させていくことも重要である。例えば、現在では多くの天文台で大規模に取り組まれているドップラー法による太陽系外惑星探査も、当初は観測装置に工夫を凝らして地道に観測に取り組んでいた小さな研究グループの成果から発展してきたものと言える。すばる望遠鏡の観測プログラムの種類別の夜数割合の推移を図4.2.2に

観測プログラム別の夜数割合の推移

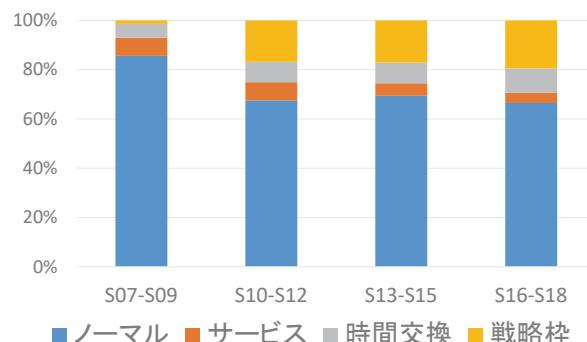


図4.2.2：観測プログラムの種類別の夜数割合の推移。3年（6期）の合計で示している。共同利用に占める割合であり、観測所時間やハワイ大学の時間は除いている。時間交換はジェミニ望遠鏡・ケック望遠鏡との観測時間交換の合計。2009年から戦略枠観測が始まり、現在では共同利用の約2割を占めている。

示す。これまでは戦略枠観測の割合は2割程度であるが、今後PFSを用いた戦略枠観測プログラムが実施され、他の戦略枠観測と重なる時期に入ると、その割合は3割以上に達すると見込まれる。特に暗夜の観測時間は戦略枠の割合が非常に高くなる可能性がある。

すばる望遠鏡は、広視野観測機能だけでなく、マウナケアの優れた環境を活かした高空間分解能観測や幅広い波長域での観測において小規模でも独自性の高い研究を実施できる条件を備えている。限られた観測時間のなかで、大規模探査プログラムと小規模一般共同利用プログラムのバランスをどうとっていくのかは、今後の研究動向をみながら継続的に検討していく必要のある課題である。

4.2.1.3. 国際協力の推進

～観測時間交換と国際共同運用

ファーストライト以来、主焦点観測装置をはじめとして多彩な観測装置を駆使して成果をあげてきたすばる望遠鏡には、国外からも注目と期待がよせられ、国際協力での観測プログラムや装置開発が多数行われてきた。現在進行中あるいは今後期待される国際協力でのプログラム・装置開発の一部を4.1節で紹介したが、今後は望遠鏡運用を含めてより国際協力の重要性が増してくる。

サイエンス面では、特色をもった地上・スペース望遠鏡との協力によりすばる望遠鏡単独では成しえない成果が期待される。国内の研究者で十分カバーされていない分野の海外者との協力により、新しいアイデアですばる望遠鏡の機能を活用することも期待できる。

観測所の運用面からも国際協力は重要である。すばる望遠鏡はファーストライト以来、多数の観測装置により多様な観測機会を提供してきたが、観測装置の大型化もあり、すべてを維持し、頻繁な装置交換を実施することは困難となっている。南半球からの観測を含めて多様な観測機会を確保するには、ジェミニ望遠鏡やケック望遠

鏡など、他の望遠鏡と観測時間の交換を行い、それぞれに特色のある観測装置を利用できる仕組みを作ってきた(図4.2.2)。今後はすばる望遠鏡の特色である広視野観測機能への重点化のためにも望遠鏡時間の交換はより重要となる。マウナケアの天文台との協力はとりわけ重要である。

さらに、望遠鏡運用そのものも国際共同で行うことが検討され、すでにいくつかの国と協議も行われている。このなかでは、TMT参加国間での協力の強化が期待される。共同運用の中でサイエンス面や装置開発での協力を強化していくことは最重要であるが、運用への参加の仕組みや観測時間配分の考え方、さらには国際共同が拡大していった場合の意志決定の仕組みなど、協議のなかで具体的に検討を進めていく必要がある。

4.2.2.

TMTの運用ビジョン

4.2.2.1. すばる望遠鏡と TMT の一体的な共同利用運用

TMTの運用はTMT国際天文台(TIO)が担う。観測時間は建設期の貢献と運用費の支出に応じて参加国・参加機関ごとに割り当てられ、そのなかで実施される観測プログラムの選択・時間割付は各国・各機関が行い、観測の準備・観測の実施・データ処理等は、TIOが供給するツールとサポートを得て、観測者が実施する。日本の貢献は約2割であり、これに応じた観測時間が割り当てられる見込みである。

日本においては、TMTの観測時間は基本的に共同利用観測に供される。3章までに見てきたように、日本の研究者が先端的かつ独自性の高い観測成果を生み出すには、すばる望遠鏡との連携が鍵であり、これを実現するための方策のひとつとして、TMTの日本の観測時間を用いた共同利用とすばる望遠鏡の共同利用と一体的に実施する。具体的には、現在のすばる望遠鏡の共同利用で行っている観測提案の募集・選考、観測者への観測準備支援、観測データ配布、データアーカイブ、データ解析支援の枠組みを活用し、TMTの観測およびデータの取り扱いもこれに取り込むことを予定している。これにより、利用者はすばる望遠鏡の利用経験を活かしてTMTの観測にすぐに取り掛かることが可能になるとともに、両望遠鏡を活用した提案を行うことも容易となる。

4.2.2.2. TMT の観測モード

TMTの観測は、まずは提案者に時間を割り当て、提案者が観測を実施するクラシカル観測が想定されている。ただし、観測者は現地に足を運ぶのではなく、リモート観測が基本となる。リモート観測はヒロの山麓施設もしくは各国の機関から行う。日本においては、まずは国立天文

台(三鷹キャンパス)からの観測を可能にすることが考えられ、そこではすばる望遠鏡のリモート観測との一体化も想定できる。

一方、採択され、時間が割り当てられた観測プログラムを観測所(TIO)スタッフが実施するサービス観測も予定されている。さらに、審査によって優先度の順位付けされた観測プログラムを、優先度とシーイングや観測条件に応じてTIOスタッフが実施するキュー観測も取り入れていくことが予定されている。

また、天体現象等であらかじめ観測時期を決めて行う観測(Time Critical Observing)や突発天体の観測等、タイミングに応じて観測プログラムを実施するToO(Target of Opportunity)観測の枠組みも予定されている。

4.2.2.3. データアーカイブとデータ解析

TMTで取得されたデータ(生データ)はTIOによって恒久的に保存され、観測者もしくは各国で優先的に使用できる期間の経過後に公開される。優先期間内のデータの利用や解析済みデータの提供は各国の責任で行う。

観測とデータ解析を支援する基本的なツール(観測シミュレータやデータ解析パイプライン等)はTIOで整備され、TMT参加国・機関と共有化される。これらを活用しつつ、日本の観測時間による成果の最大化のために、解析済みデータの提供を行うことが重要となる。データの配布や国内向けのアーカイブは、すばる望遠鏡のデータの扱いと一体化するなどの工夫で、利用者の利便性を図る。

4.2.2.4. TMT キーサイエンスプログラム

一方、TMTの運用の検討においては、すばる望遠鏡で既に導入されている戦略枠観測のように、TMTの能力を最大限に活かした大規模、あるいは長期にわたる観測などを可能にするために、国の枠を超えたキーサイエンスプログラムの導入も議論されている。この枠組みをどの規模にするべきか、いつから開始すべきか、日本はどのように関与し、貢献していくのか、といった点は今後、慎重に検討を進める必要がある。

4.2.3.

TMTにつながるすばる望遠鏡での装置開発

TMTの運用が本格化する時代のすばる望遠鏡は、連携した観測を実施するという科学的な面にとどまらず、TMTに搭載する装置に必要な最先端の技術を観測条件の良いサイトにある大型望遠鏡を用いて開拓する、という技術開発の面でも重要な役割を果たす。最先端の技術の実証においては、個別の要素技術の成立性を試験的な観測によって示すだけではなく、大型望遠鏡を用いた科学的な観測を行い、新しい成果を世界に先駆けて示すことも

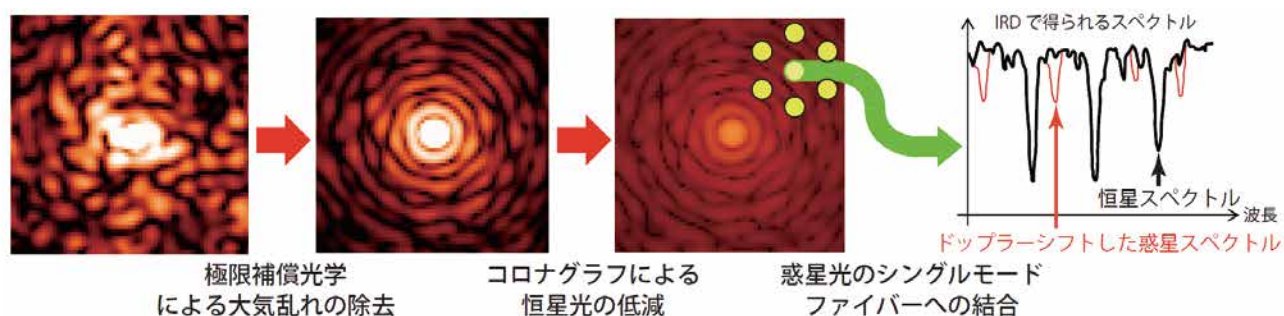


図4.2.3：すばる望遠鏡のREACHでは極限補償光学とコロナグラフで主星の光を低減し、シングルモードファイバーに結合した分光器で、高安定の高分散分光を行う。主星光の低減とドップラー効果による波長シフトを組み合わせ、惑星の微弱な吸収線を捉えることが初めて可能になる。

重要となっている。すばる望遠鏡で検討が進んでいる補償光学や観測装置群の整備と開発は、それ自体がTMTに向けた最先端の技術の実証であるだけでなく、特にナスミス焦点を活かして将来の最先端の技術を取り入れるプラットフォームとなるという意味でも期待される。

TMTの第一期観測装置として搭載が決まっているMODHISは、補償光学を用いて補正した星の光をシングルモードファイバーに導入することで、コンパクトな装置で高安定の赤外線高分散分光を可能にする計画であり、太陽系外惑星（系外惑星）の視線速度探査や透過分光による惑星大気中の分子の検出での活躍が期待される。開発要素として、高安定性の分光器の実現、シングルモードファイバーへの高効率での光結合の実現、赤外線での地球大気分子による吸収線の高精度の除去の実現が挙げられる。すばる望遠鏡のIRDで取り入れられたセラミック光学ベンチを用いた温度変化の影響を最小限に抑えた分光器は、高安定性の分光器を実現する技術としてMODHISへの応用が可能である。また開発が進められているSCExAOとIRDをシングルモードファイバーで結合するREACH（図4.2.3）は、極限補償光学によって大型望遠鏡の回折限界像をシングルモードファイバーに結合することで、ノイズ源となる恒星光を極限まで小さく抑え惑星光を分光することを可能にし、またNeo-IRDによる視線速度測定の実現をも大幅に向上させる計画であり、MODHISの実現に直結する技術として要素技術の確立が期待される。さらに、赤外線での高分散分光においては特に地球大気分子の吸収線の影響を除去することが精密な視線速度決定や分子検出の鍵となるが、IRDあるいはNeo-IRDのデータ解析を通じて解析手法を確立することで、MODHISを用いて得られる観測データの科学的解析においても世界をリードすることが期待される。

TMTの大口徑を活かした系外惑星の探査を行うためには、第2期装置として提案される極限補償光学を中心とするPSIを実現することも必要である。例えばMODHISは初期運用においては初期補償光学NFIRAOSと結合した運用が想定されるが、PSIの極限補償光学と結合することで、透過分光においてはより高い結合性能を達成し、さらに系外惑星自体を分離して高分散分光することも

可能となる。TMTの極限補償光学を実現する上では多素子の可変形鏡を開発することが必要である。すばる望遠鏡の極限補償光学SCExAOプロジェクトでは2000素子の可変形鏡が用いられているが、TMTの場合にはその16倍以上の素子数の可変形鏡が必要となる。SCExAOプロジェクトではMEMS技術を用いた多素子可変形鏡を実証してきたが、さらに多素子かつ大きな可変量を可能にする静電アクチュエータ構造の可変形鏡の実証に向けたアップグレードも検討が進んでおり、このようなすばる望遠鏡での開発実証はPSIに必要な技術に直結するものとなる。

TMTを用いた宇宙初期の銀河の分光探査観測や銀河構造の確立過程を解明する観測においては、広視野に存在する多数の天体を同時に高空間分解能で観測する多天体補償光学を搭載した赤外線多天体面分光器IRMOSが威力を発揮する。多天体補償光学は複数のレーザーガイド星を用いた波面測定によるトモグラフィー補償光学を基盤技術としており、すばる望遠鏡で行われているトモグラフィー補償光学ULTIMATE-STARTや地表層補償光学ULTIMATE-Subaruの開発はトモグラフィー補償光学の確立を通してIRMOSの開発に直結するものと期待される。さらにULTIMATE-Subaruで導入が想定される可変副鏡はTMTにおいては初期の導入の予定はないが、すばる望遠鏡においてその技術が確立し、性能が実証されれば、TMTの性能を向上する機能として導入へと議論をすすめる基盤となる。

すばる望遠鏡のナスミス焦点で進められている、補償光学の後ろに搭載される多数の装置を瞬時に切り替えることを可能にするナスミスビームスイッチャー光学機構の開発は、TMTに向けた装置開発のプラットフォームを整備し提供する上で重要である。ナスミス焦点の重力的に安定した環境の上で、補償光学で補正された光をフィードするポートを準備することで、大学などで開発された最先端の技術を取り入れた小型の観測装置を持ち込んで観測を行うことを可能にする。例えば可視光から赤外線までを同時にカバーする広波長域の高感度の分光器の開発は、マルチメッセンジャー天文学で見つかる天体の正体を解明する装置として重要とされており、すばる望遠鏡ナスミス焦点での開発と導入を経て、TMTでの装置開発へ

とつながっていくことも期待される。

TMTでは、第一期観測装置以降の装置開発・搭載は、科学諮問委員会（SAC）を中心にその科学的重要性や実現可能性などを評価し、TIOとして計画を決定して進められる。日本として科学的成果の優先度を議論し、観測装置を選択し、SACに提案し、TIOの計画に反映していく必要がある。独自の技術開発や先行研究の結果に基づいてTIOに対して説得力のある提案を構築する上でもすばる望遠鏡での実証試験観測の重要性は高い。

4.3 すばる望遠鏡とTMTの連携： 今後の展望と課題

本書では、2020年代以降の天文学および関連分野のなかですばる望遠鏡とTMTの連携で切り拓かれる科学研究、およびそれにむけた装置開発や望遠鏡運用計画などについての検討をとりまとめた。両望遠鏡の研究対象は幅広いが、本書では太陽系外惑星、銀河の形成と進化、および宇宙論・マルチメッセンジャーの3つに大別して主要な研究対象と観測計画を報告してきた。現時点においてもすでにいくつもの重要な研究課題があがっており、これをもとに今後さらに観測計画を練っていくことが重要である。

その作業にあたっては、これから活躍が期待される関連分野の観測施設による研究動向を注視し、最新成果を取り込んでいくことが重要である。2020年代にはJWSTが稼働し、高感度赤外線観測により多方面で成果をあげることになる。この望遠鏡によって実際に何が見つかり、どんな研究が成し遂げられるのか見極めながら、すばる望遠鏡とTMTの観測計画に反映させていく必要がある。同じく2020年代に稼働するLSSTは、時間軸天文学において画期的な観測施設となるであろう。南半球に建設されるLSSTに対して、すばる望遠鏡とともにTMTは北半球に建設されるが、観測領域には大きな重なりがあるとともに、LSSTサイトとは経度が違うことから発見された天体を時間において追跡観測できるという面もある。時間軸天文学の進展を踏まえて、すばる望遠鏡とTMTの運用形態も継続的に検討を行っていく必要がある。

すでに稼働し、大活躍しているアルマ望遠鏡についても、2020年代にはアルマ2プロジェクトとしてアンテナ展開範囲を拡大して解像度を上げるとともに、新受信機の搭載で感度・周波数帯域と視野を向上させるなどの大幅な観測性能の向上を計画している。これに対応する高解像度・高感度の赤外線観測の必要性はますます高まると期待される。

これらの計画に引き続き、WFIRSTやSPICAといった計画もあり、これらの計画との関係は本書でも一部触れられた。これらのプロジェクトやミッションの動向をみなが

ら、日本が主要な役割を果たすすばる望遠鏡とTMTによる研究課題の明確化と、その実現にむけた国際協力を含む道筋の検討に取り組むことが重要である。本書がその一歩となることを期待する。

第 1 章 背景と概要

● 1.1 本書の趣旨と科学目標のハイライト

執筆者：秋山正幸（東北大学）、児玉忠恭（東北大学）

● 1.2 2020-2030 年代のすばる望遠鏡と TMT を連携した戦略

執筆者：秋山正幸（東北大学）、児玉忠恭（東北大学）

第 2 章 すばる望遠鏡と TMT の将来計画

● 2.1 すばる望遠鏡 - 「すばる 2」計画

執筆者：小山佑世（国立天文台）

● 2.2 TMT 計画

執筆者：岩田生（国立天文台）、空華智子（国立天文台）、濱野哲史（国立天文台）

第 3 章 すばる望遠鏡と TMT の連携で取り組むサイエンス

● 3.1 惑星系の理解と生命探査

3.1.1 太陽系外惑星における生命探査

（担当編集委員：小谷隆行・アストロバイオロジーセンター）

執筆者：河原創（東京大学）、葛原昌幸（アストロバイオロジーセンター）、
小谷隆行（アストロバイオロジーセンター）、佐藤文衛（東京工業大学）、福井暁彦（東京大学）

3.1.2 太陽系で探る惑星系形成とハビタビリティ

（担当編集委員：吉田二美・千葉工業大学）

執筆者：阿部新助（日本大学）、荒井朋子（千葉工業大学）、有松亘（京都大学）、
飯野孝浩（東京大学）、伊藤孝士（国立天文台）、臼井文彦（神戸大学）、
浦川聖太郎（日本スペースガード協会）、大澤亮（東京大学）、大槻圭史（神戸大学）、
大坪貴文（宇宙科学研究所）、岡田達明（宇宙科学研究所）、笠羽康正（東北大学）、
河北秀世（京都産業大学）、北元（宇宙科学研究所）、木村宏（千葉工業大学）、
小林仁美（京都虹光房）、小林浩（名古屋大学）、坂野井健（東北大学）、佐川英夫（京都産業大学）、
鳶生有理（宇宙科学研究所）、新中善晴（京都産業大学）、関口朋彦（北海道教育大学）、
関根康人（東京工業大学）、高遠徳尚（国立天文台）、寺居剛（国立天文台）、
中川朋子（東北工業大学）、中村昭子（神戸大学）、中本泰史（東京工業大学）、
長谷川直（宇宙科学研究所）、パトリック・S・リカフィカ（近畿大学）、
樋口有理可（国立天文台）、前澤裕之（大阪府立大学）、藪田ひかる（広島大学）、
吉田二美（千葉工業大学）、和田浩二（千葉工業大学）

3.1.3 惑星誕生現場で探る惑星系・太陽系の起源

（担当編集委員：本田充彦・岡山理科大学）

執筆者：田崎亮（東北大学）、野津翔太（ライデン大学）、野村英子（国立天文台）、
武藤恭之（工学院大学）

3.1.4 星の誕生

(担当編集委員：大朝由美子・埼玉大学)

執筆者：大朝由美子（埼玉大学）、Tae-Soo Pyo（国立天文台）、高木悠平（国立天文台）、
田中圭（大阪大学 / 国立天文台）、町田正博（九州大学）、元木業人（山口大学）

● 3.2 銀河進化のゆりかごから墓場まで

(担当編集委員：柏川伸成・東京大学)

3.2.1 初代星、初代銀河、宇宙再電離

執筆者：中島王彦（コペンハーゲン大学）、播金優一（国立天文台）、
矢島秀伸（筑波大学）

3.2.2 超巨大ブラックホールと銀河の共進化

執筆者：泉拓磨（国立天文台）、尾上匡房（MPIA）、川口俊宏（尾道市立大学）

3.2.3 銀河形成とバリオン物質の循環

執筆者：柏野大地（ETH）、嶋川里澄（国立天文台）

3.2.4 銀河の形態の起源と活動性の終焉

執筆者：小野寺仁人（国立天文台）、但木謙一（国立天文台）、森下貴弘（STScI）

3.2.5 銀河系と近傍銀河

執筆者：石垣美歩（東北大学）、岡本桜子（国立天文台）、西山正吾（宮城教育大学）

● 3.3 宇宙のダーク成分と物質の起源

(担当編集委員：高田昌広・東京大学、田中雅臣・東北大学)

3.3.1 ダークマター

高田昌広（東京大学）

3.3.2 ダークエネルギー

大栗真宗（東京大学）

3.3.3 物質の起源とマルチメッセンジャー天文学

植田稔也（デンバー大学）、左近樹（東京大学）、田中雅臣（東北大学）、野沢貴也（国立天文台）、
守屋堯（国立天文台）、諸隈智貴（東京大学）

第4章 すばる望遠鏡と TMT の科学戦略

● 4.1 今後の科学戦略

執筆者：青木和光（国立天文台）、小山佑世（国立天文台）

● 4.2 すばる望遠鏡と TMT の運用

執筆者：青木和光（国立天文台）、秋山正幸（東北大学）

● 4.3 すばる望遠鏡と TMT の連携：今後の展望と課題

執筆者：青木和光（国立天文台）

単語一覧、用語集、装置・プロジェクト略語集

作成者：空華智子（国立天文台）、中島静（国立天文台）

発行日：第1版 2020年3月13日

発行者：自然科学研究機構国立天文台

編者：青木 和光、秋山 正幸、岩田 生、大朝 由美子、小野寺 仁人、柏川 伸成、小谷 隆行、
児玉 忠恭、小山 佑世、空華 智子、高田 昌広、田中 雅臣、中島 静、本田 充彦、吉田 二美

制作：株式会社アズディップ

表紙デザイン：柴田 純子



すばる望遠鏡

<https://subarutelescope.org/>

TMT プロジェクト

<https://tmt.nao.ac.jp/>

