



東邦大学 物理学科
in Hawaii

すばる望遠鏡研修

2017

目次

1、ハワイの自然	2
2、すばる望遠鏡本体	8
3、すばる望遠鏡観測装置	16
4、すばる望遠鏡による観測成果の例（銀河系内）	28
5、すばる望遠鏡による観測結果の例（銀河系外）	35

1 ハワイの自然と文化

みづきちゃん
なな

1.1 ハワイ島の概観

ハワイ島は、ハワイ諸島の中で最大の面積を持ち、最も南東に位置する。島の中央部には標高 4000mを超える山の「マウナケア山」と「マウナロア山」がある。両方とも火山であり、マウナケア山の山頂には世界各国から天文台が集まっている。

ハワイ諸島のどの島でもいえる特徴として、高山の東西での降雨の違いがある。ハワイ島では、貿易風の影響によりほぼ1年を通して北東からの風が吹くため、その風が島の中央に位置する高山によって東側の地域に多くの雲をつくり、その地域に大量の雨を降らせる。これに対して島の西側の地域では、比較的乾燥した気候となる。

また、ハワイ島の都市ヒロから南下していくとハワイ国立公園という、今も活動を続けているキラウエア火山の火口であるカルデラを中心とする火山地帯が広がっている。カルデラの東西で気候が違うことから植生が異なり、東側には熱帯雨林が多く、また西側には低木と草原が多いのが特徴である。[1]



図 1.1 : ハワイ島[1]

1.2 ハワイ島の火山

ハワイ諸島にはかなり高い火山がいくつも存在する。その理由はハワイ島の地下の「ホットスポット」と呼ばれるところに関係している。この「ホットスポット」とはマグマの上昇部分のことであり、その上では火山活動が活発化する。昔はただの海底であったところが、噴出した溶岩が積み重なったことにより海面から飛び出してしまう、現在のハワイ諸島が出来上がった。

ハワイ島の火山は、玄武岩質の溶岩から作られており、粘度が小さいため緩やかな傾斜を持っている。このような特徴の火山のことを楕状火山という。マウナケアの山頂に向かう道も、緩やかに標高が上がっていくようになっている。また、火山の噴火の様子を日本の火山と比べると、日本の火山が激しく噴火するのに対して、現在のハワイ島の火山は激しく噴火することなく、穏やかに溶岩が流れ出るような噴火の仕方をする。そのため噴火のすぐそばまで行って観察することが可能である。しかし、過去にハワイ島の火山は、激しい水蒸気爆発を起こしている。[2]

1.2.1 マウナケア山



図 1.2：マウナケア山[2]

ハワイ島の高山の一つであるマウナケア山は標高 4205m である。マウナケアとはハワイ語で「白い山」の意で、冬になると山が雪で覆われることからそのように名付けられた。

天体観測を行う場所として必要な条件に、

- ① 天気が良いこと
- ② 大気が安定していること
- ③ 湿度が低いこと
- ④ 夜空が暗いこと

などが挙げられる。これに対してマウナケア山の山頂は以下のように満たしている。

- ① マウナケア山の晴天日は年間 300 日以上ある。
- ② 山頂の大気は安定しているため、星像の揺らぎがなくはっきりと見ることができる。
- ③ 赤外線望遠鏡の感度に原理的な限界を与える要因として大気に含まれる水蒸気がある。水蒸気は宇宙から届く赤外線放射の多くを吸収してしまうため、赤外線望遠鏡は大気中の水蒸気の大部分が存在する高度よりも高く、乾燥した場所に建てられるのが望ましい。マウナケア山頂は非常に乾燥しており、平均湿度は 40% である。(参考として、ヒロは 80%、千葉県は 69%)
- ④ 都市部から離れた場所にあるので、周囲の光害が非常に少ない。山頂付近では車のライトが星の観測に悪影響を及ぼすため、暗くてもライトの点灯は禁止されている。そのためツアーガイドは暗闇の中をハザードランプのみ点けながら走っている。なお、山頂では日没後 30 分以内に下に降りなければならないという規則もある。

よってマウナケア山は、これらの条件がすべてそろった理想的な天体観測の場所であるため、世界 12 か国の研究機関が合計 12 基の天文台をマウナケア天文台群(1.2.2 参照)に設置している。すばる望遠鏡については、日本からハワイへのアクセスの良さもマウナケア山頂を設置場所に選んだ理由として挙げら

れている。

そのほかにも、山頂付近の傾斜がなだらかであることや、マウナケア山が赤道付近に位置するため北半球の天体と南半球の天体ほぼすべてを見ることが可能であるという利点もある。

このように、天体観測を行うには非常に理想的な場所であるマウナケア山は、「宇宙に一番近い場所」と呼ばれることもある。[2][3]

1.2.2 マウナケア天文台群



図 1.3：マウナケア天文台群[4]

マウナケア山頂から 100m 下った標高 4100m 付近に広がる天文台群は、様々な国の政府機関の予算で建設されている。

マウナケア天文台群に広がる観測器の一覧(カッコ内は観測開始年)は以下の通りである。[4]

- カルテクサブミリ波天文台 (1987)

10.4mのアンテナを持つサブミリ波天文台。カリフォルニア工科大学（通称カルテク）によって運営されている。

- カナダ・フランス・ハワイ望遠鏡 (1979)

直径 3.6mの光学望遠鏡。カナダ、フランス、ハワイによって共同運営されている。

- ジェミニ望遠鏡（ジェミニ北望遠鏡）(1999)

直径 8.1mの光学赤外線望遠鏡。アメリカ、イギリス、カナダ、チリ、オーストラリア、アルゼンチン、ブラジルによって共同運営されている国際プロジェクトである。

- NASA 赤外線望遠鏡施設 (1979)

直径 3.0mの赤外線望遠鏡。NASA によって運営されている。

- ジェームズ・クラーク・マクスウェル望遠鏡 (1987)

直径 15mの望遠鏡を持つサブミリ波天文台。ギリス、オランダ、カナダによって共同運営されている。

- すばる望遠鏡 (1999)

直径 8.3m の光学赤外線望遠鏡。日本によって運営されている。

- スミソニアン・サブミリ波干渉計 (2002)

6m ある 8 つのサブミリ波干渉計。スミソニアン天体物理観測所 (アメリカ)、台湾によって共同運営されている。

- イギリス赤外線望遠鏡 (1979)

直径 3.8m の赤外線望遠鏡。イギリスによって運営されている。

- ハワイ大学 88 インチ望遠鏡 (1970)

ハワイ大学天文学科の学部生と卒業生が主に使用している 2.2m の光学赤外線望遠鏡。

- ハワイ大学 24 インチ望遠鏡 (2010)

1969 年に最初にマウナケア山に設置された望遠鏡で、元々直径 0.6m の反射鏡であったが、2010 年に現在の直径 0.9m の反射鏡を持つ望遠鏡に置き換わった。

- W・M・ケック天文台 (1993・1996)

二つの 10m ある望遠鏡からなる。カリフォルニア大学とカリフォルニア工科大学によって運営されている。Keck I は 1993 年に、Keck II は 1996 年に観測を開始した。

- 超長基線アレイ受信機 (1992)

直径 25m の超長基線アレイ受信機。最西端にあるこのアンテナは、山頂から 4.8m 下に位置している。

1.3 ハワイ原住民にとってのマウナケア山

マウナケア山は神様の住んでいる、ハワイ原住民にとって最も神聖な場所のひとつである。山頂には、雪の女神ポリアフ(1.3.1 参照)を祀った祭壇があり、ここへは立ち入ることが許されていない。そのため、マウナケア天文台群は山頂よりも少し低いところに広がっている。また、取り決めに より 13 基以上の天文台は設置しないことになっているため、新しく建設する場合には既存のものを取り壊すか、新たな了承を取り付ける必要がある。

1.3.1 雪の女神ポリアフ



図 1.4：雪の女神ポリアフ[5]

古くから伝わるハワイ神話によると、マウナケア山には雪の女神「ポリアフ」が住んでいる。スポーツが好きだった彼女は人間たちと一緒にスポーツに興じていた。そんなある日、ポリアフの前に豪華な美人の姿で火山の女神ペレ(1.3.2 参照)が現れる。ポリアフは彼女を歓迎しようとしたが、美しいポリアフにペレは最初から敵意むき出しであった。やがて争いが起こったことにより、雪に覆われるマウナケア山の現在の様相が出来上がっていく。

ポリアフとペレはこれ以外にも何回も戦いを繰り返すが、その都度ポリアフの勝利に終わっている。しかし、ポリアフはペレを追放しハワイ全土を統治しようとはせず、マウナロア以南をペレが統治し、マウナケア以北をポリアフが統治するといったかたちで共存関係を築き、それをずっと続けたという。
[5]

1.3.2 火の女神ペレ



図 1.5：火の女神ペレ[6]

ハワイ島では今も活動が続ける火山キラウエアがある。その火口に住むといわれる火の女神ペレもその美しさ、気性の激しさから、ハワイ島で人気のある女神の一人である。キラウエアの珍しい溶岩の中にはペレの名がつくものもあり、とうもろこしのひげのような形をした溶岩は「ペレの髪」、米粒大の形をしたものは「ペレの涙」と呼ばれている。このことからペレも原住民から信仰されていることが分かる。

ペレの気性の激しさを物語る逸話に、オヒアレファの花にまつわる話がある。ペレは男性オヒアに恋をしたが、オヒアにはレファという恋人がいたためペレを拒絶してしまう。怒ったペレはオヒアを木に変えてしまう。悲しむレファを見かねた神は、レファを赤い花に変えてオヒアの木に咲かせた。木の名前がオヒア、花の名前がレファと別々なのはこういった理由である。花を摘むとオヒアと離れ離れになって悲しむレファが雨を降らせると言われている。

また国立公園では、訪問者が溶岩や植物を持ち帰ることを禁止しているがその規定がされる前から、これらは全てペレのものであり、「溶岩を持ち帰ると不幸になる」とある時代の国立公園のパークレンジャーがそのように言ったら、効き目があったという話から、ハワイの人々は持ち帰ることはしなかった。

[6]

2 すばる望遠鏡本体

ひやまん
さほちゃん

2.1 概要[9][12]

1999 年 1 月、試験観測開始

建設費 400 億円

システム設計・建設 多くを三菱電機

すばる名称由来

「すばる」は、プレアデス星団の和名である。奈良、平安の時代から親しまれてきた星のやまと言葉であり、「すまる」(集まる、続べるの意)から転じたとされている。望遠鏡の建設が始まった 1991 年に名前の公募を行い、全国から集まった 3350 通の中から「すばる」が選ばれた。

2.1.2 主反射鏡[7]

有効口径: 8.2[m]

厚さ: 20 [cm]

重さ: 22.8 [t]

材質: ULE ガラス (超低熱膨張ガラス)

研磨精度: 平均誤差 0.012 [μm]

焦点距離: 15 [m]

2.1.3 望遠鏡本体[7]

形式: 経緯台式反射望遠鏡

基本光学系: リッチークレチアン方式

焦点: 4 箇所

主焦点 (F 比 2.0 補正光学系含む)

カセグレン焦点 (F 比 12.2)

ナスミス焦点 (可視光: F 比 12.6)

ナスミス焦点 (赤外線: F 比 13.6)

高さ: 22.2 [m]

最大幅: 27.2 [m]

重さ: 全回転部分 555 [t]

最大駆動速度: 0.5 度角/秒

天体の追尾誤差: 0.1 秒角以下

観測可能仰角範囲: 10 ~ 89.5 度

総合星像分解能: 0.2 秒角 (補償光学なし、2.15 [μm])

2.1.4 ドーム[7][13]

形式: 楕円柱型自動風制御方式

特徴: 円筒形, 望遠鏡と同期回転

高さ: 43 [m]

回転レール直径: 40 [m]

重さ: 回転部分 (ドーム上部) 2000 [t]

外壁: アルミニウム板張り

2.1.5 すばる望遠鏡4つの焦点 [7][8]

主焦点、カセグレン焦点、2つのナスミス焦点の4つの焦点を持つ。

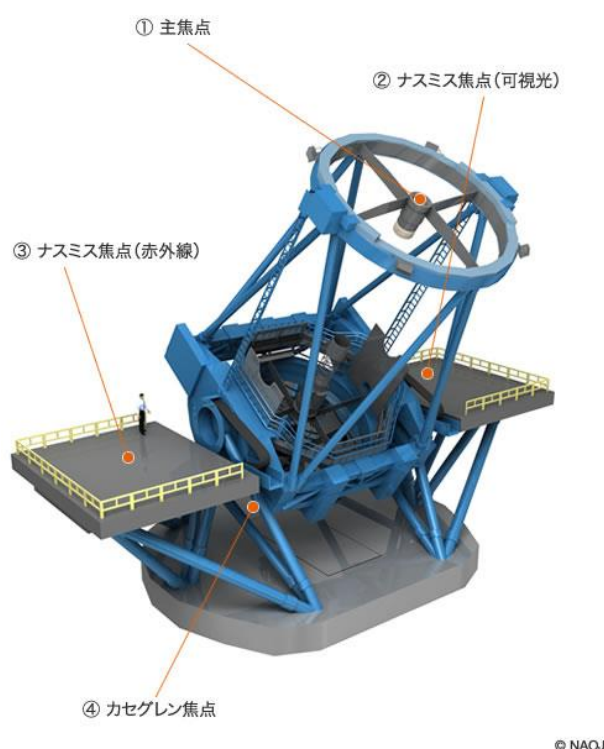


図 2.1 : 望遠鏡本体[7]

特徴

主焦点

主鏡（回転放物面）に垂直に入射した平行光線が像を結び、視野を広くとれる。

搭載観測装置: 超広視野主焦点カメラ HSC
(Hyper Suprime-Cam)

カセグレン焦点

主焦点の直前に副鏡（回転双曲面）を置いて、主鏡の中心部に開けた穴を通して像を結ぶ。比較的複雑な装置でも取り付けることができる。

搭載観測装置: 微光天体分光撮像装置 FOCAS

(Faint Object Camera And Spectrograph)

: 冷却中間赤外線分光撮像装置 COMICS

(Cooled Mid Infrared Camera and Spectrometer)

: 多天体近赤外線撮像分光装置 MOIRCS

(Multi-Object Infrared Camera and Spectrograph)

ナスミス焦点

カセグレン焦点の直前に斜鏡を置き、光軸を高度軸と一致させて像を結ぶ。望遠鏡の姿勢が変わっても装置の姿勢が変わらないので、重さやサイズの大きい装置も据え付けることができる。

搭載観測装置: 188 素子波面補償光学装置 AO

(Adaptive Optics)

: 高分散分光器 HDS (可視光)

(High Dispersion Spectrograph)

: 近赤外線分光撮像装置 IRCS (赤外線)

(Infrared Camera and Spectrograph)

: 近赤外線高コントラスト撮像カメラ HiCIAO (赤外線)

2.1.5.1 主焦点[15]

主焦点の集光力

集光力とは、肉眼口径 7[mm]に対して望遠鏡の口径が集める光の量である。集光力は以下の式で求められる。

$$\text{集光力} = (\text{口径})^2 \div 7^2$$

ここで、すばる望遠鏡の口径を代入して計算すると、集光力は肉眼の 137 万倍であることがわかる。

$$\begin{aligned}\text{集光力} &= (\text{口径})^2 \div 7^2 \\ &= (8200)^2 \div 7^2 \\ &= 1372244.9\end{aligned}$$

更に等級に換算すると (等級 = $2.5 \log(\text{集光力})$) 望遠鏡で見える極限等級が 21.34 等級となる。(肉眼で見ることができる極限等級が 6 等級)

2.1.5.2 ナスミス焦点（赤外&可視）

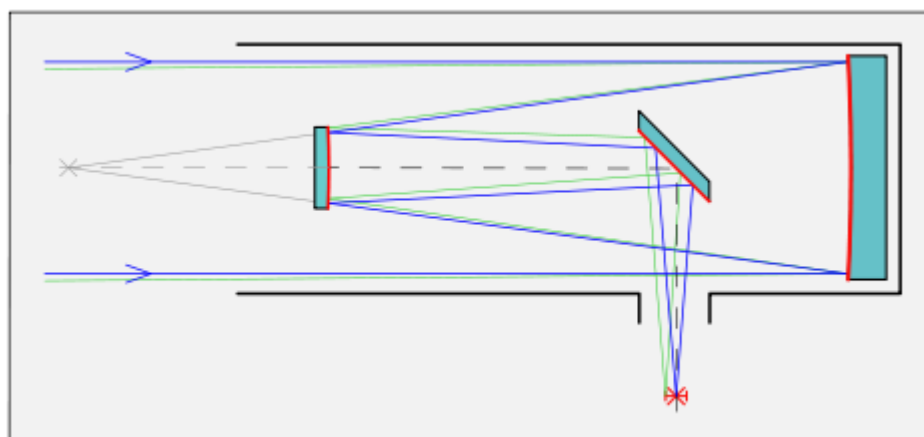


図 2.2：ナスミス焦点[13]

カセグレン式望遠鏡やリッチークレチアン式望遠鏡に平面鏡を 1 枚加え、光線を望遠鏡の耳軸に導いて観測する形式である。経緯台式の架台に載せれば接眼部が常に水平で高さも一定となり、大型の観測装置を脱着するのに便利であり、大型望遠鏡に採用される。

欠点としては、長時間の観測で視野が回転するため、写真撮影の場合はこれをガイドする必要がある。[13][18]

2.1.4.3 カセグレン焦点

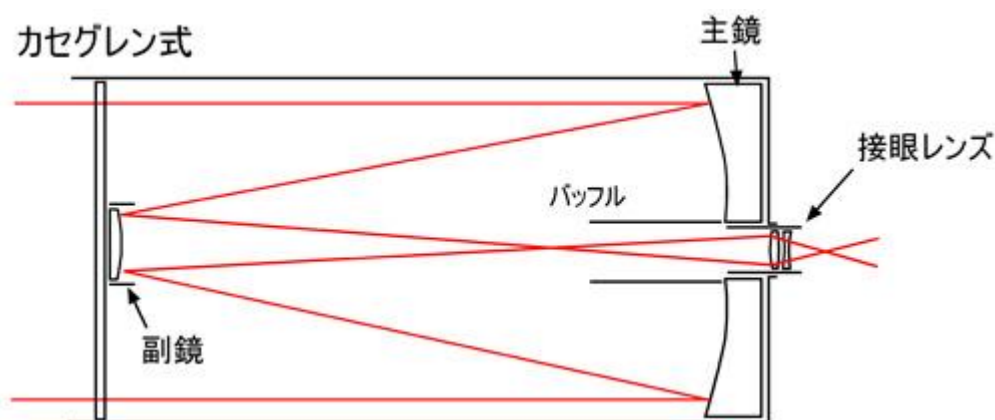


図 2.3：カセグレン焦点[18]

カセグレン式は、主鏡にはニュートン式と同じ放物面鏡を用い、副鏡に凸面鏡を用いた反射式望遠鏡である。

副鏡を平面鏡にすればニュートン式として使え、鏡筒長も短くなるという利点があるカセグレン式だが、副鏡に用いる双曲面凸鏡を高精度で製造するのが難しい。利点として取り返しやす。[14][18]

2.1.6 リッチークレチアン式について

リッチークレチアン式は反射望遠鏡の一種である。まず反射望遠鏡について述べる。[15]

2.1.6.1 反射式天体望遠鏡

反射式天体望遠鏡は、凹面鏡を使って星の光を集めるタイプの天体望遠鏡である。反射望遠鏡の代表格としては、ニュートン式反射望遠鏡がある。

ニュートン反射式は、主鏡と呼ばれる凹面鏡(放物面鏡)で光を集め、それを鏡筒の開口部近くにある斜鏡(平面鏡)で反射させて、筒外へ光を導きます。その光を接眼レンズで拡大する仕組みである。[18]

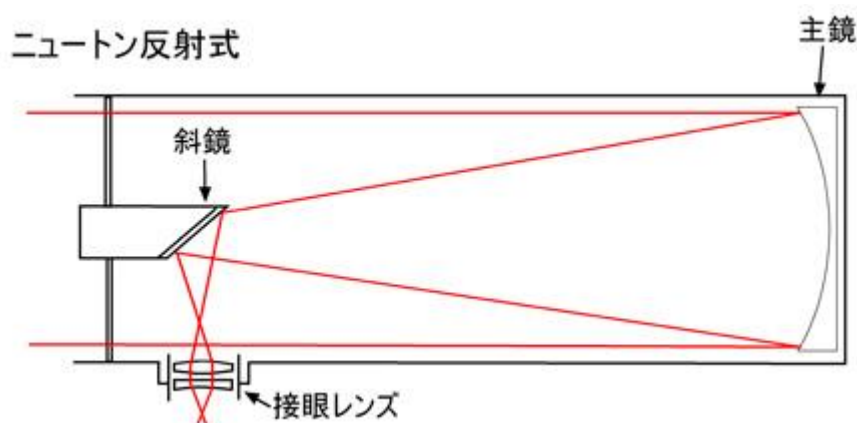


図 2.4：ニュートン式望遠鏡[18]

ニュートン式反射望遠鏡の利点

- 色収差が発生しない
- 大口径を得やすい
- 中心像が極めてシャープ

ニュートン式反射望遠鏡の欠点、

- 筒内気流が発生するので、使用前に外気になじませる必要がある
- 太陽観測ができない
- 光軸がズレやすい
- 鏡筒の強度が弱くなりやすい

2.1.6.2 リッチークレチアン式

リッチー・クレチアン望遠鏡は、よく RC 望遠鏡と呼ばれている反射ミラーを使った望遠鏡である。非常に広い視野を写せるのが特徴。天文台の大型望遠鏡によく使用されている形式で、ハワイのすばる望遠鏡もリッチークレチアン式である。

反射望遠鏡は、ニュートン式でもカセグレン式でもコマ収差があることが最大の欠点である。コマ収差は視野の隅に行くほど大きくなる収差で、星像が扇状に広がって写ってしまう。コマ収差は眼視観測の場合には、気にならないが、直焦点撮影で写真を撮影する時には大きな問題になる。デジタルカメラの撮像素子の面積が大きくなればなるほど、コマ収差は大きく出てくる。

コマ収差の大きさは、口径比の 2 乗に反比例して大きくなる。したがって、天体望遠鏡の F 値が同じであれば、コマ収差の大きさは同じになる。なるべく F 値が大きい反射望遠鏡を使えばコマ収差が目立たないが、撮影時間がかかるようになってしまう。

そのコマ収差を克服したのが RC (リッチークレチアン) 望遠鏡である。RC 望遠鏡にはコマ収差が全くないので、大きなデジタルカメラも使用できる。ただし RC 望遠鏡の結像面は強く湾曲している。そのため、隅までピントを合わせるためには、その湾曲に合わせて撮像素子を曲げてやる必要がある。実際にはこれは現実的でないので、補正レンズが使われている。[18]

2.2 すばる望遠鏡の利点

2.2.1 主鏡

2.2.1.1 鏡面

すばる望遠鏡の主鏡面の平均誤差は、14 nm。主鏡(8.2m)をハワイ島の大きさ(約 100km : 四国の半分の大きさ)にしても、鏡面は紙一枚(0.2mm)程度[7][21]

2.2.1.2 ULE ガラス (Ultra Low Expansion)

主鏡材は、望遠鏡観測中の熱変形と、主鏡研磨時の研磨熱による熱変形を小さくするため、熱膨張率の極めて小さい材料を用いている。すばる望遠鏡の鏡面は超低膨張ガラス (ULE) を使用した。ULE は、高純度の二酸化ケイ素と二酸化チタニウムを高温の炉の中で反応させ、常温で負の熱膨張率を有するケイ素と正の熱膨張率を有するチタンを混合させ、熱膨張率を $10^{-9}/^{\circ}\text{C}$ 程度にする特殊ガラスである。[19]

2.2.2 能動光学

2.2.2.1 アクチュエーター

望遠鏡は、方位角方向の動き(左右)と仰角方向(上下)の動きを組み合わせで動く。直径 8.2m の重い鏡だと、仰角が変わるたびに自己重力で変形する。常に正しい鏡の形に保っていないと焦点で像を結ばず、ピンぼけになる。すばる望遠鏡の主鏡は、自己重力の変形を軽くするために厚みが 20cm しかない。それでも 8.2m 鏡の自己重力は無視できない。そこで、1 本 1 本に力のセンサーがついている 261 本のアクチュエーター(ロボットの指)が裏側から主鏡を支え、鏡の形を制御している。[21]

2.2.2.2 精密駆動

550t ある望遠鏡構造を滑らかに駆動させ、観測天体 0.07 秒角の精度(東京から富士山を見て、山頂から転げ落ちるゴルフボールを望遠鏡が正確に追いかける精度)で追尾させなければならないが、歯車やフリクションドライブでは駆動部の摩擦が原因で、仕様が満足できない。このため、望遠鏡構造自身に磁石とコイルを装着してモーター化するダイレクトドライブ方式を考案した。[16][21]

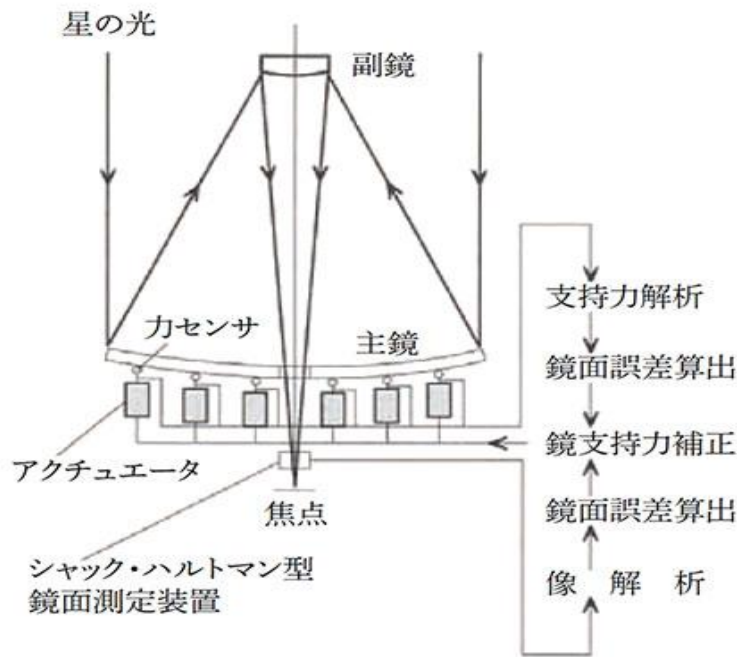


図 2.5：すばる望遠鏡の能動光学機構の概念図 [23]

2.2.2.3 能動光学の説明

望遠鏡の鏡面は設計形状からの誤差が光の波長の 14 分の 1 以下になるように保つ必要がある。前節でのべたように望遠鏡はいろんな姿勢に傾けるため、自重のかかる方向は一定していない。ガラスを薄くすれば軽量化できるが、鏡は変形しやすくなる。だが、この柔らかさを逆手に取って、鏡面をいつも設計どおりの面形状になるように自動制御しようというのが能動光学である。このため、鏡面の形状誤差を測って、鏡の形を直すようにフィードバック回路を構成する。鏡面の測定には光学測定と機械測定の独立な 2 つの方法を用いる。光学的方法としては、シャック・ハルトマン型鏡面測定装置を用いて比較的明るい星を観測し、鏡の変形の様子を直接測る。光学的測定は大気の流れによる誤差を除くために、約 1 分間の平均を取る。機械的方法としては、鏡を支える力の分布をセンサーでモニタし、正しい力分布との差から鏡面変形を計算する。支える力の誤差と鏡面の変形量はフックの法則により関係づけられるため正確な推定ができる。機械的な測定は間接的だが、高速度でサンプリングを行えるという利点がある。天体を追尾中は常に機械的な測定をもとに制御を行い、時々光学的な測定で校正する。すばる望遠鏡の能動光学機構は二重のサーボ系で構成されている。能動光学では、姿勢の変化に伴う鏡の変形だけでなく、温度変化に伴う変形など時間変化の比較的遅い成分や、研磨誤差など変化しない成分をまとめて補正することができる。さらにある程度は、鏡を積極的に変形させることにより焦点距離を変えることもできる。これらは、従来の望遠鏡にはできなかった。又、すばる望遠鏡では 1 時間の露出で 28 等級の天体を観測することが可能であり、これは肉眼で見られる最も暗い星 (6 等星) の 7 億分の 1 というかすかな天体で実際に宇宙の奥深くに存在する銀河である。[23]

2.2.3 補償光学

恒星の見かけの直径は 0.001 秒角以下であり、實際上無限遠にある点光源とみなせる。口径 D の望遠鏡で星を観測すると、理想的な場合には、星像の角直径は波長 λ での回折限 $2.4\lambda/D$ にまで小さくなるはずである。口径 1m、波長 $0.5\mu\text{m}$ なら、回折限界は $1.2\times 10^{-6}\text{rad}=0.25$ 秒角となる。しかし、実際には望遠鏡の口径を大きくしても、星像直径は 1 秒角以下にはなかなかならない。これは、大気中の温度ゆらぎにより屈折率がわずかに乱れるため、光波面が乱されるからである。このような大気の乱れに起因する星像のボケの強さを、天文学ではシーイングと呼ぶ。シーイングは場所と気象状況により、かなり変化するが、国内の観測所では 3 秒角程度、海拔 4200m のハワイ島マウナケア山頂では最頻値 0.7 秒角と言われている。大気外に出ればもちろんシーイングは問題にならなくなるが、8m 級の大型望遠鏡を宇宙空間に建設することは予算と観測効率の面から、まだ現実的ではない。「乱れた大気の底からでも、リアルタイムで乱れの影響を除去できれば、回折限界に迫る空間解像力を達成できる」という補償光学の概念は 1953 年に提案された。このような技術が実用化できることが最近実証され、21 世紀を前に天体観測の世界では大きな技術革命が進行している。補償光学システムは、乱れた媒質を伝播する電磁波が受ける位相乱れを計測し、位相乱れ補償素子を用いてビームの位相を実時間で整えることにより、解像力と輝度を向上させる技術である。補償光学は技術的には能動光学を高速化したものと位置づけることができる。[23]

2.2.4 ドーム型の利点

星の揺らぎを抑えたドームの概念半球型で自色ペイント塗装が常識的だったドームは、夜間に周囲と大きな温度差がつき、渦で乱れた風を取り込みやすい等の理由で、自分自身でシーイングを悪くしていることが判った。

すばる望遠鏡を覆う天文台のドームも風通しの良い新型ドームであり、空気の乱れとそれに伴う星像の乱れを抑えている。通常のアストロノミカルドームは半球形のドーム構造であるが、すばるの天文台は円筒形のドームを採用している。外部の乱流を持ち込まず、ドーム内部の熱を効果的に解放している。夜の空の冷気との熱輻射結合による冷え過ぎ防止のためのアルミ地肌外壁の採用、ドーム内の揺らぎや渦の吹き飛ばしのための自然風積極利用など、さまざまな新概念を導入した。日中は夜に比べて外の気温が高いため、夜と同じ気温までドーム内を冷却して下げている。

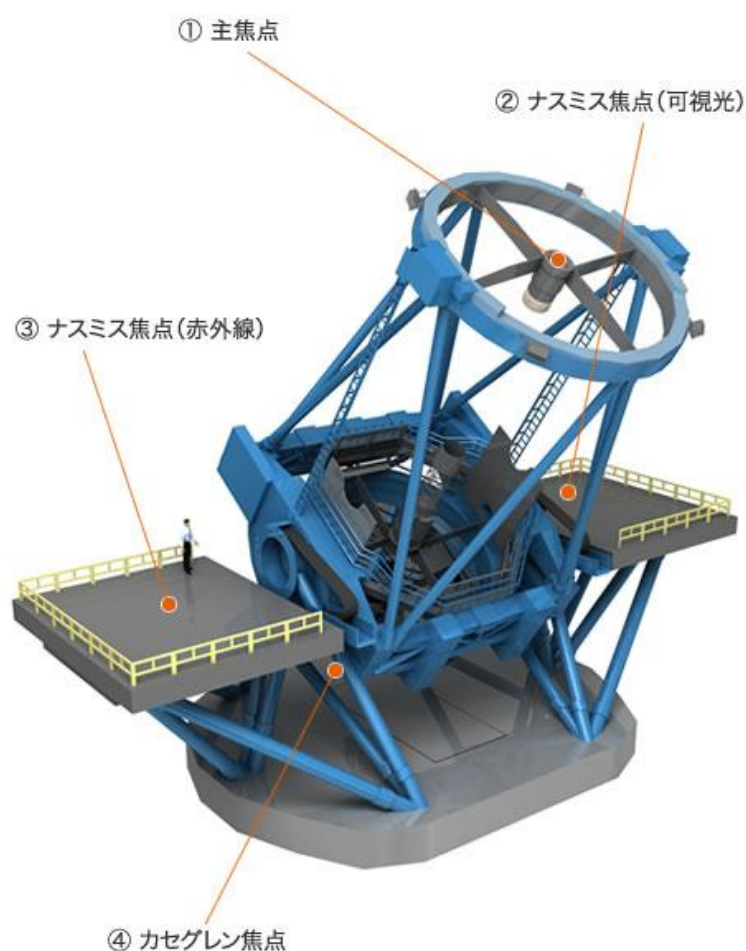
このドーム内では、望遠鏡によって集めて映し出された光や星像がさらに解析されている。現在は 7 つの装置が稼働中であり、鏡によって集められた光は、4 つの焦点それぞれで観測対象に応じた装置にとりこまれる。これらの装置によって可視光から赤外線領域までをカバーする観測が可能となっている。[9][22][23]

3 すばる望遠鏡観測装置

たかむー
りっくん

3.1 すばる望遠鏡の稼働中の観測装置

すばる望遠鏡には、その世界最大級の大きな鏡を最大限活用するために、観測装置を取り付けることができる焦点が4つ用意されている。4つの焦点はそれぞれ観測対象のスケールや特性によって使い分けられ、多様な観測装置が用意されている。



© NAOJ

図 3.1：すばる望遠鏡とその焦点[7]

すばる望遠鏡では可視光から赤外線の幅広い波長の領域を撮像や分光を用いて観測できる。装置はそ

の特徴によって観測対象などに違いがあり、図 3.2 のように観測によって使い分けられる。[24]

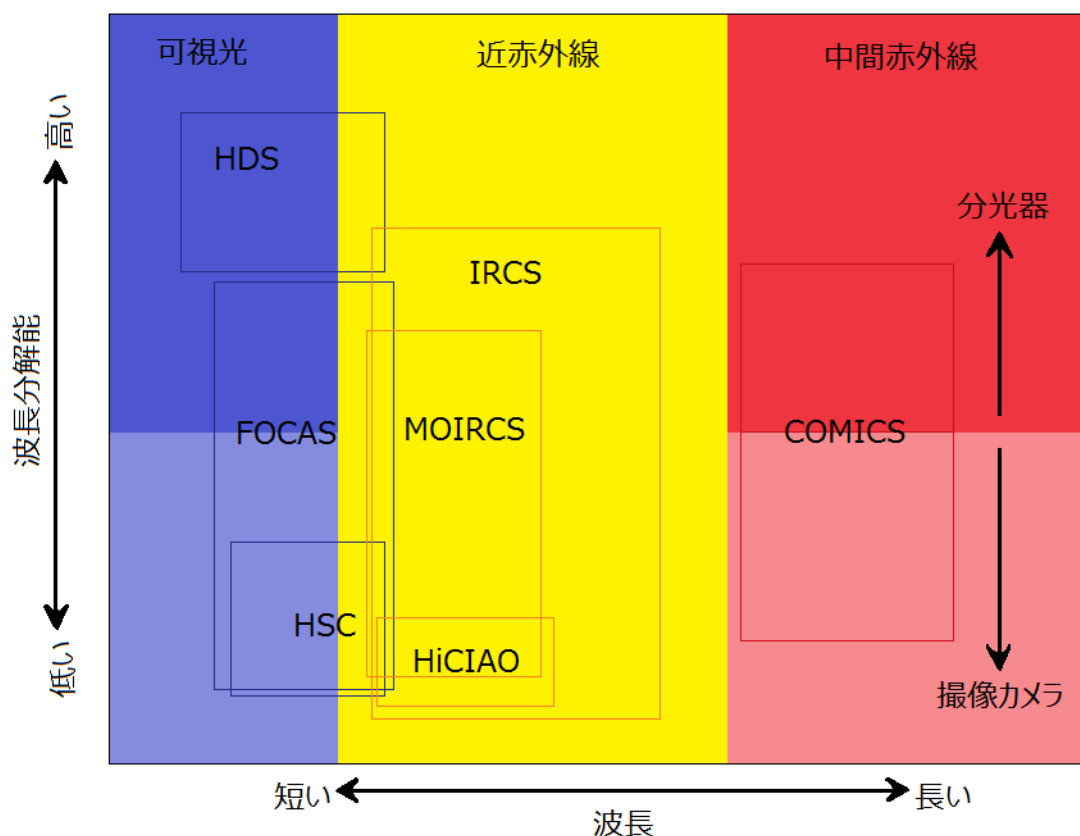


図 3.2：波長と波長分解能

3.2 主焦点

3.2.1 超広視野主焦点カメラ（Hyper Suprime-Cam）

主焦点には、2014 年から共同利用観測を開始した超広視野主焦点カメラ HSC（Hyper Suprime-Cam）と呼ばれる観測装置が取り付けられている。HSC は独自に開発された 116 個の CCD 素子を用いた 8 億 7000 万画素の巨大なデジタルカメラである。[24]

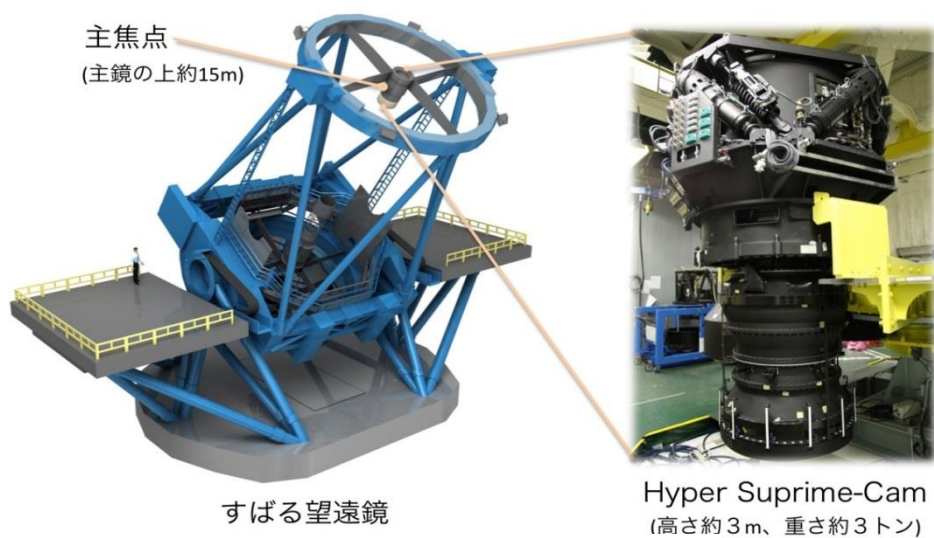


図 3.3：HSC の位置と外観[24]

その視野は、日本やハワイから観測できる見かけの大きさが最大の天体であるアンドロメダ銀河の全体を一度に撮影できるほどである。広い視野を同時に観測することは観測の効率をあげるために大変重要な観点である。

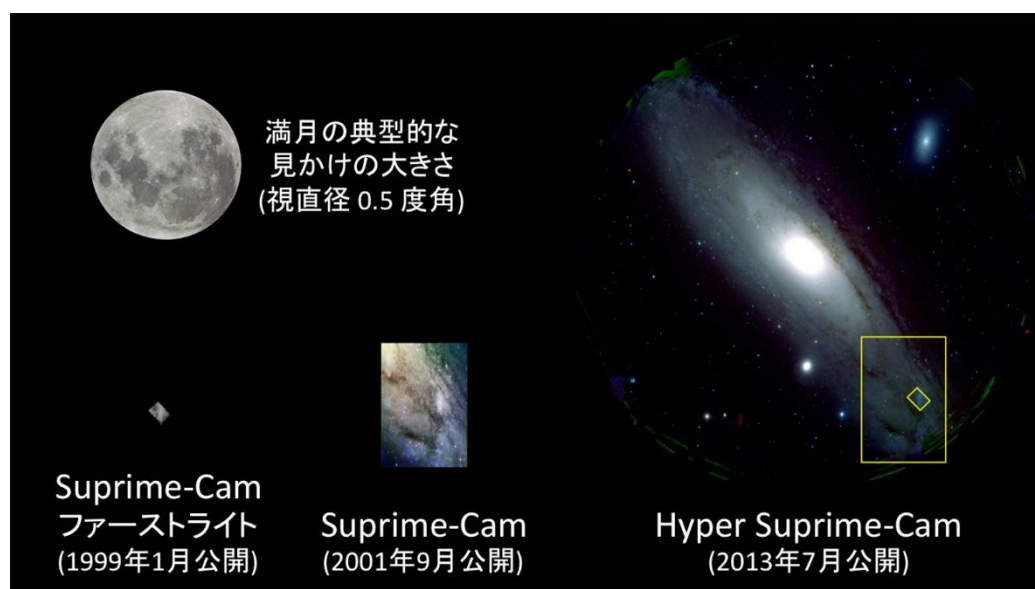


図 3.4: すばる望遠鏡に当初から搭載されている Suprime-Cam (左下、中央) と、HSC (右) が写し出したアンドロメダ銀河 M31 の視野の比較。(クレジット: 国立天文台)[25]

HSC は国立天文台が中心となって国内外の研究機関と複数の日本企業とともに 10 年以上の歳月をかけて開発された。まず、遠くの天体の観測に欠かせない、幅広い波長を高い感度でとらえる半導体素子である CCD 素子は浜松ホトニクスが国立天文台とともに新規開発したものである。大気分散などの補正を行い、結像性能を高める、補正光学系はキャノンによって開発された。さらに、数 t の重さの HSC を $1\sim 2\mu\text{m}$ の精度で制御し、姿勢を安定させる主焦点ユニットは三菱電機が担当した。また、観測で得られる膨大なデータは高エネルギー加速器研究機構が開発した回路によって収集され、画像データはプリンストン大学が開発したソフトウェアによって解析される。

すばる望遠鏡には当初 Suprime-Cam が搭載されていた。そのカメラは当時世界最高の探査能力をもち、重力レンズ効果を用いることでダークマターの分布調査などに活用された。また、そのころ宇宙の加速膨張が観測され、その原因であるダークエネルギーが問題になった。そこで Suprime-Cam を用いてダークマターの分布の速度変化を調べ、ダークエネルギーの謎に迫る計画が検討された。しかし、Suprime-Cam ではその観測に 50 年の時間がかかってしまう。そうして 10 倍の効率、10 倍の視野を持つカメラ HSC の開発が始まった。

HSC はすばる望遠鏡の主焦点と組み合わせることで得られる、鮮明で広視野な星像でダークマター、ダークエネルギーの謎の解明が期待される。[25]

3.3 ナスミス焦点

3.3.1 高分散分光器 (High Dispersion Spectrograph)

HDS (High Dispersion Spectrograph) はナスミス焦点の可視光領域側に常設されている観測装置である。HDS は可視光領域で 10 万分の 1 の波長差を識別できる。この装置は天体からの光を細かく分け観測し、その天体の元素組成を同定することができる。さらに光のドップラー効果を応用すれば、惑星の重力に影響された構成の非常にわずかな前後運動をとらえ天体やガスの動きを知ることができる。[26]

光を 10 万色に分けるこの装置は装置自体も大きく、重量は 6t もある。すばる望遠鏡の装置の中で最も重いこの装置は、やはりナスミス焦点でないと取り付けることができない。



図 3.5 : HDS の外観[26]

3.3.2 近赤外線分光撮像装置 (Infrared Camera and Spectrograph)

IRCS (Infrared Camera and Spectrograph) はナスミス焦点の赤外線領域側に装着されている基本装置である。補償光学装置 (AO) と共に使用することで最大の能力を発揮するように設計されており、その名の通り、波長 $1\sim 5\mu\text{m}$ の近赤外線における画像とスペクトルを得られる。この波長の範囲は従来のものより長く、撮像できる範囲も従来のものより広い。さらに得られるスペクトルの分解能も向上している。IRCS は、幅広い波長を分光できるため太陽系内の天体から、銀河系外の天体まで様々な種類の天体の観測に対して高い性能を発揮できる。



図 3.6 : IRCS の外観[27]

星が形成されている領域や銀河中心のような天体は、ガスやダストに覆われていることが多く、内部まで見通すことは難しい。一方で波長が $2.5\mu\text{m}$ よりも長い光は、ガスやダストに吸収されにくいことが知られている。IRCS は、そのような波長の光を観測できるため星の形成や、銀河の構造を詳しく調べることができる。[27]

3.3.3 近赤外線高コントラスト撮像カメラ (HiCIAO)

太陽系の外の恒星を周回する惑星を系外惑星と呼び、系外惑星とその母体である星周円盤の調査を行う SEEDS プロジェクトが現在、国立天文台で進められている。そのための観測装置が近赤外線高コントラスト撮像カメラ (HiCIAO) である。非常に明るい中心星のすぐ近くにある暗い星を直接観測することは容易ではない。系外惑星や星周円盤の観測には、そのために明るい恒星からの光を遮り、近くの惑星や星周円盤を捉えるための特殊な技術、コナグラフが必要である。HiCIAO は、従来のコロナグラフだけでなく、明るい光に邪魔されず、暗い星を検出する能力 (高コントラスト) も備えた、近赤外線高コントラスト撮像カメラである。すばる望遠鏡で 2009 年から本格的に運用されている。

すばる望遠鏡で集められた光は一度、後述の補償光学装置(AO188)を通り、HiCIAO のコロナグラフなどの入った常温の部分を通り大気のゆらぎを補正したのち、-80℃に冷やしてある検出器の入った赤外線カメラ部分に届く。[28]

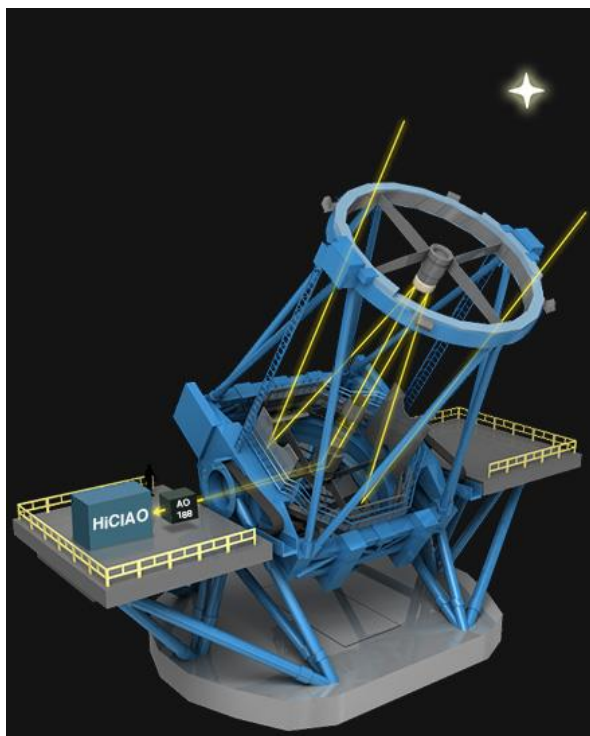


図 3.7：補償光学(AO188)と HiCIAO が置いてある位置と、星の光が入って来る光路図[28]



図 3.8：すばる望遠鏡に搭載された HiCIAO[28]

3.4 カセグレン焦点

3.4.1 冷却中間赤外線分光撮像装置（Cooled Mid Infrared Camera and Spectrometer）

すばる望遠鏡が設置されているマウナケア山頂は空気が薄く非常に乾燥しているため、湿度の高いところではできない星の周りの塵が発する中間赤外線による観測が可能である。COMICS とはそのマウナケアの好条件下での中間赤外線透過率を生かすための分光撮像装置である。この COMICS では惑星系の形成過程や系外銀河の大規模な星形成現象、また星間空間の個体成分であるダストの性質やその形成過程を調べることができる。

また、COMICS は世界で最初に完成した素子数の多い検出器を用いた中間赤外線観測装置である。検出器の素子数が多いことに加え、すばる望遠鏡の大口径をつかうことで、今までにない高い解像度の撮像が可能となった。

宇宙からの中間赤外線は標高の高いところでない地球上にほとんど届かないということからマウナケア山頂にあるすばる望遠鏡と COMICS の相性は非常に良い。[29]



図 3.9：COMICS の外観[29]

3.4.2 多天体近赤外線撮像分光装置 (Multi-Object Infrared Camera and Spectrograph)

MOIRCS は近赤外線用として巨大な 400 万画素の検出器をもち、広い視野（最大視野角 4 分角×7 分角、これは現在利用を終了している近赤外線撮像カメラ CISCO の視野の 8.6 倍）を撮像する能力をもったカメラである。IRCS や OHS をはじめとするこれまでの近赤外線の分光装置は、天体ひとつずつ分光するだけだったが、MOIRCS は一度に複数の天体の光を分光でき、口径が 8~10m 級の望遠鏡では世界で初めて、近赤外線波長域で一度に多数の天体の分光による観測を可能にした装置である。

宇宙の果てを観測する深宇宙探査では、すばる望遠鏡のような大口径の望遠鏡に加え、近赤外線撮像装置の視野の広さが重要である。これらの機能により、観測の効率が劇的に向上し、その深宇宙探査に威力を発揮しているのが多天体赤外線撮像分光装置 MOIRCS である。この MOIRCS には観測装置本体の温度が高いと、それ自身からも赤外線が放出されてしまうため、装置内部を-150℃以下まで冷却しなければいけないというデメリットもあった。しかし、現在では試行錯誤によりそのデメリットも克服された。[30]

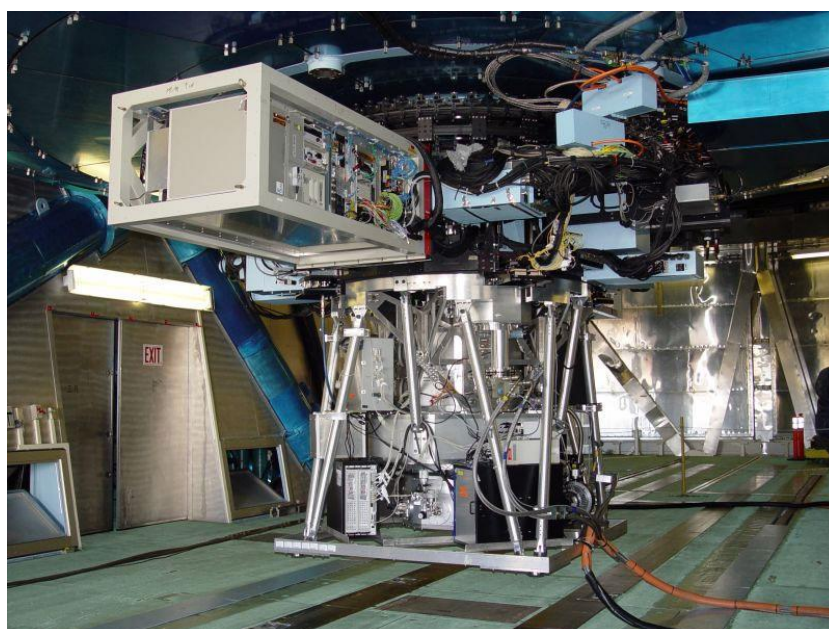


図 3.10 : MOIRCS の外観[30]

3.4.3 微光天体分光撮像装置 (Faint Object Camera And Spectrograph)

微光天体分光撮像装置 (FOCAS) は撮像観測、分光観測、偏光観測など、すばる望遠鏡の可視光の基本的な観測を引き受けるカセグレン焦点に取り付けられた観測装置である。FOCAS は可視光で高い感度の観測を行い、視野内の多くの天体にスリットを当てて、50 天体程度のスペクトルを同時に撮影することができる。この機能を利用することで宇宙の果て近くにある銀河までの距離を可視光で効率よく調べることができる。[31]

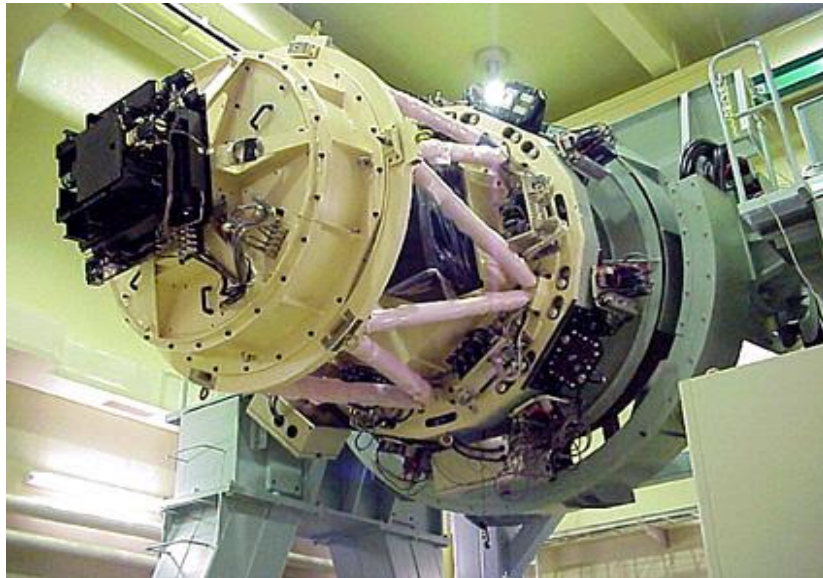


図 3.11 : FOCAS の外観[31]

3.5 観測を支える装置

3.5.1 188 素子波面補償光学装置 (Adaptive Optics)

天体から来る光は、望遠鏡に到達する前に、地球の大気のゆらぎによって乱され、星像がぼやけてしまう。このゆらぎを補正し、乱れを打ち消す装置が補償光学装置 AO である。AO を用いると星像が鮮明になるため、天体の繊細な構造を見分けることができる。また、星像の検出の値のピーク値が高くなるため、暗い天体の検出に効果的である。アクチュエーターを制御し、可変鏡を動かし補正をかけることで解像度の高い画像を得ることができる。

すばる望遠鏡はドーム内の大気のゆらぎを抑えることにより、0.2 秒角という高い解像力を実現させた。しかし、これを用いてもまだ解像力は大気のゆらぎに左右される。そこで大気のゆらぎを実時間で補正することにより、0.06 秒角

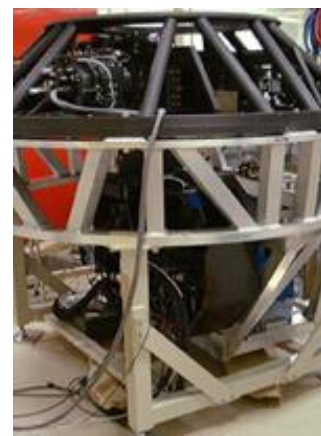


図 3.12 : 36 素子波面補償光学装置[32]

というハッブル宇宙望遠鏡に匹敵する解像力へと変えた装置が 36 素子波面補償光学装置である。これはすばる望遠鏡のカセグレン焦点に取り付けられていたが、現在は利用を終了されている。

36 素子波面補償光学装置に改良を加えたものが 188 素子波面補償光学装置である。188 素子波面補償光学装置 (AO) の改良点は二つある。一つ目は、可変鏡のアクチュエーター数を増やし、大気のゆらぎがひどいときでも、それを補正できるようにした点。二つ目は、レーザーガイド星の導入である。36 素子波面補償光学装置では、観測したい天体の近くに明るい星 (ガイド星) が必要であり、夜空のほんの少しの天体に対してしか、大気のゆらぎをうまく補正することができない。そこで、レーザーを上空 90km にあるナトリウム層に照射して、夜空に人工的にガイド星を作ることによって、それを基準に用いて、大部分の天体に対して、大気のゆらぎの補正をかけることができる。この二つの改良点により、188 素子波面補

償光学装置はすばる望遠鏡の視力を 10 倍ほどにし、これまで明るいガイド星がそばに無いため補償光学を用いた観測ができなかった遠方の銀河や球状星団の観測、キューサーや超新星、ガンマ線バースターの観測などを可能にした。[32][34]

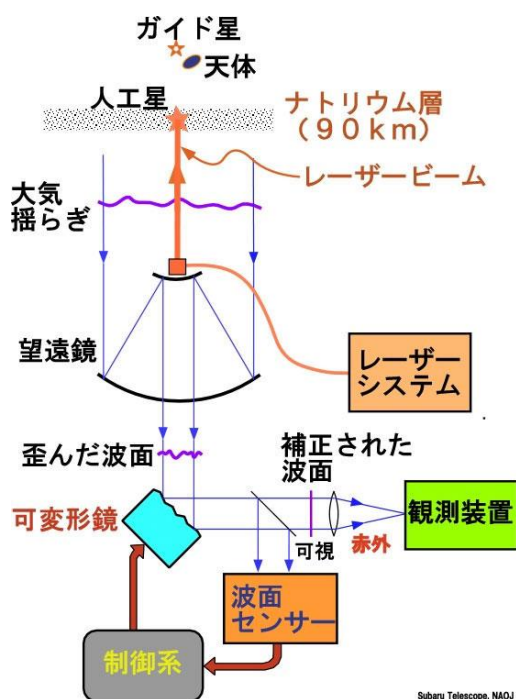


図 3.13 : 188 素子補償光学系とレーザーガイド星生成システムの原理[33]

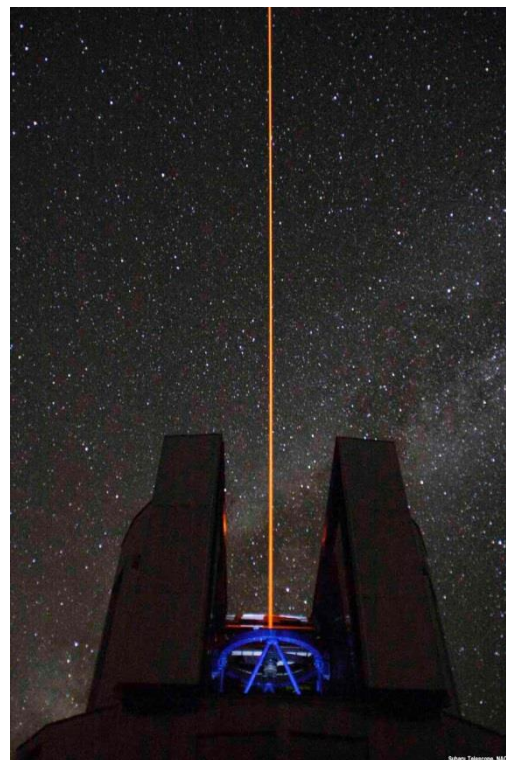


図 3.14 : レーザーガイド星生成用レーザービームの初照射時の画像[33]

3.6 他の望遠鏡との比較

3.6.1 Keck 天文台

Keck はすばる望遠鏡の隣にある、36 枚分割鏡の口径 9.62m の 2 基の光学赤外線望遠鏡である。観測できる波長は可視光から近赤外線までと、すばる望遠鏡よりも中間赤外線の範囲だけ観測できない。Keck ではすばる望遠鏡を超える大きさの単一鏡は実現することが難しいため、正六角形の低膨張ガラスを 36 枚繋いで、それを主鏡としている。

2 基の望遠鏡をナスミス焦点から導かれた光をドーム内の光路を通すことで、光赤外干渉計として観測ができる。[35]



図 3.15 : Keck 天文台の外観[35]

3.6.2 Gemini

Gemini は南半球にその名の通り同じ性能の望遠鏡を 2 台設置したものである。Gemini 望遠鏡は、すばる望遠鏡と同じ単一鏡で、その口径は 8.1m である光学赤外線望遠鏡である。

Gemini North は、すばる望遠鏡と同じ、ハワイ島マウナケア山標高 4213m に設置されている。Gemini South は、チリ中部のパチョン山標高 2722m に設置されている。パチョン山は湿度が低く、空気は乾燥しているため、赤外線が減衰せず赤外線観測に適している。

Gemini がすばる望遠鏡などの大型望遠鏡と違う点は南半球と北半球に望遠鏡をもつことで、全天に存在する天体を同性能の望遠鏡で観測可能な点である。[36]

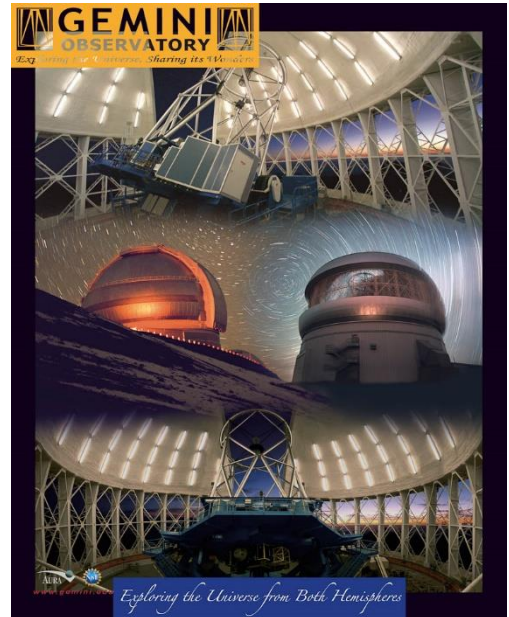


図 3.16 : Gemini のポスター[36]

3.6.3 ハッブル宇宙望遠鏡(Hubble Space Telescope :HST)

ハッブル宇宙望遠鏡 HST は地上約 600km 上空の、地球低軌道を周回する長さ 13.1m、重さ 11t、主鏡の口径 2.4m の宇宙望遠鏡である。観測できる波長は紫外線から近赤外線までで、すばる望遠鏡よりも紫外線の範囲が見え、中間赤外線の範囲が見えないものである。

他の大型望遠鏡と違う点は、HST は地球の大気の薄いところにあるため、地上の望遠鏡よりも大気の乱れによる歪みを受けない点である。このため HST が行う観測のほとんどは可視光によるものである。[37]



図 3.17 : HST の外観[37]

3.6.4 Large Binocular Telescope(LBT)

LBT はアリゾナ州南東部のグラハム山の標高 3260m にある、世界で最も分解能の優れた光学望遠鏡である。近赤外線での撮像はハッブル宇宙望遠鏡よりも 10 倍分解能が高い。

主鏡は、すばる望遠鏡の単一鏡口径 8.2m よりも 20cm ほど大きい、2 枚の口径 8.4m 鏡が並べて取り付けられており、2 枚を合わせた集光面積は直径 11.8m の単



図 3.18 : LBT の外観[38]

一鏡に相当する。[38]

3.6.5 Very Large Telescope (VLT)

VLTはチリアタカマ砂漠セロパラナル山の標高2635mにある、口径8.2mの単一鏡の望遠鏡4台の総称である。観測できる波長は紫外線から中間赤外線までと、すばる望遠鏡よりも紫外線の範囲分だけ、広く観測できる。4台の望遠鏡を光ファイバー繋ぎ、VLT干渉計として使うことができ、これにより実質の口径130mの望遠鏡として動作することも可能である。これはそれぞれの望遠鏡を単独で使うよりも25倍分解能を高さまであげることができる。[39]

望遠鏡を格納するドームはすばる望遠鏡と同様に、大気のゆらぎを抑えるための円筒形をしている。



図 3.19 : VLT の外観[39]

3.6.6 Thirty Meter Telescope (TMT)

TMTは口径30mの光学赤外線・次世代超大型天体望遠鏡である。TMTは当初2022年の運用開始を目指し、すばる望遠鏡と同じマウナケア山で建設工事が2014年に始まった。しかし、マウナケア山を聖地と考える住民らからの強い反発を受け現在工事は中断、建設代替候補地にはスペイン領のカナリヤ諸島が決定された。だが、それでも観測はマウナケア山が圧倒的に好条件なため話し合いは続いている。現在では2028年の稼働開始を目指し二か所で準備が進められている。[40]

	すばる	TMT
口径	8.2メートル	30メートル
集光力	52.8平方メートル	707平方メートル
解像度(補償光学使用時)	0.03秒角	0.008秒角
相対感度	1	179倍
視野	1.5度	0.25度
重量	550トン	～2000トン

図 3.20 : すばると TMT との比較[40]

図 3.20 は TMT がマウナケア山に建設された場合の予想される性能の比較である。視野以外の面では TMT が優勢である。すばる望遠鏡の視野を活かして興味深い天体を見つけ、それを TMT でより詳細に調べるといった”すばる望遠鏡と TMT の連携”が期待されている。



図 3.21 : TMT の外観 (予想図) [40]

3.6.7 European Extremely Large Telescope (E-ELT)

E-ELT はチリのセロ・アルマソネスに建設予定の口径 39.3m の超大型光学望遠鏡である。2021 年完成予定、2022 年稼働予定。Keck のように正六角形のガラスを 798 枚組み合わせることで、口径 39.3m の主鏡と同等の観測を可能にする。その解像度はハッブル宇宙望遠鏡の 16 倍である。E-ELT では HST よりさらに遠くの宇宙を詳しく調べる、系外惑星の大気の調査予定である。[41]

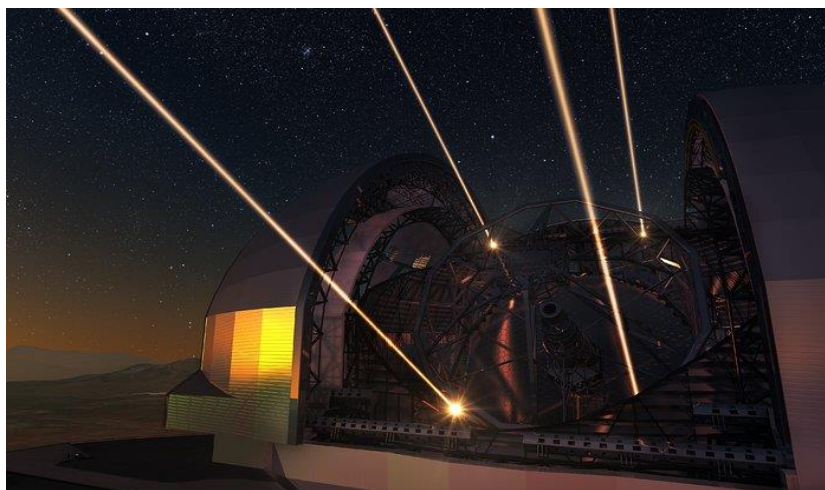


図 3.22 : E-ELT の外観 (予想図) [41]

3.6.8 Giant Magellan Telescope (GMT)

GMT はチリのアタカマ砂漠標高 2400m に建設予定の口径 24.5m の超大型光学望遠鏡である。2019 年完成予定。2021 年稼働予定。すばる望遠鏡クラスの口径 8.4m の大きな鏡を 7 枚並べて口径 24m の主鏡と同等の観測を可能にする。その解像度はハッブル宇宙望遠鏡の 10 倍である。観測できる波長は近赤外線と中間赤外線であり、GMT の大きな特徴はハッブル宇宙望遠鏡の後継機にあたる James Webb Space Telescope(JWST)との連携による観測手法である。[42]

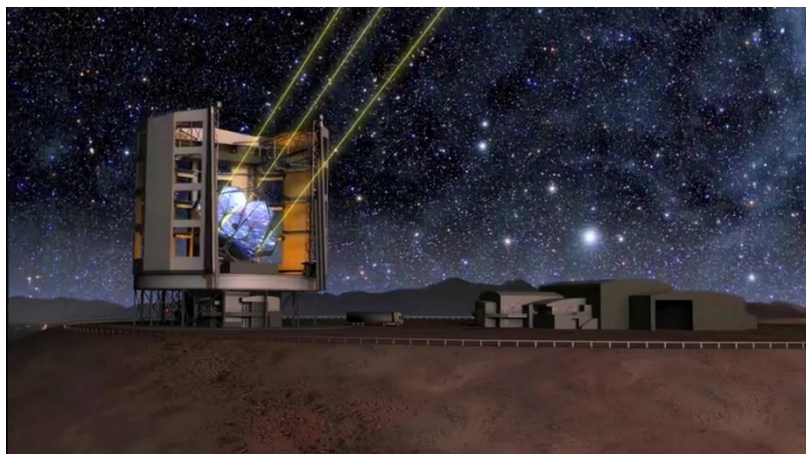


図 3.23 : GMT の外観 (予想図) [42]

4 すばる望遠鏡による観測成果の例（銀河系内）

かとばん
うの

4.1 銀河系とは

銀河とは恒星などが重力によって拘束されている巨大な天体のことである。その中でも私たちが住んでいる地球やその他の惑星などからなる太陽系がある銀河のことを銀河系又は天の川銀河という。銀河系は約 2000 億個の恒星からなり、恒星が分布している範囲は直径約 10 万光年ある。銀河系を上から見ると中心部から腕が伸びていて、このような形の銀河を渦巻銀河といい、ほかには棒渦巻銀河、楕円銀河、不規則銀河などがある。太陽系は銀河系の中心から約 2 万 8000 光年離れた位置にあり、オリオン腕と呼ばれる棒状腕に属している。また、銀河の中心には巨大なブラックホールがあると考えられている。

[43]



図 4.1：銀河系の想像図（クレジット：NASA）[44]

この章では銀河系内天体についての観測成果を 2 例取り上げる。

4.2 小惑星同士の衝突で生じた奇妙な塵雲

4.2.1 小惑星とは

小惑星とは主に火星と木星の軌道の間を公転する小さな天体のことである。その数は、軌道がわかっているものだけでも 2009 年 1 月の時点で 40 万個以上あり、現在も増え続けている。小惑星は太陽系が誕生したころにできた原始惑星になれなかった微惑星、成長したものの衝突により砕けたかけらなどと考えられている。中には再び集まって成長して大きくなった小惑星もある。小惑星は、ほとんどが金属でできているもの、金属と岩石が混ざっているもの、炭素を多く含んでいるものなどさまざまな種類が

ある。いずれも太陽系が誕生したときの残骸がそのまま残っているので、初期の太陽系の様子を残していると考えられている。[45]

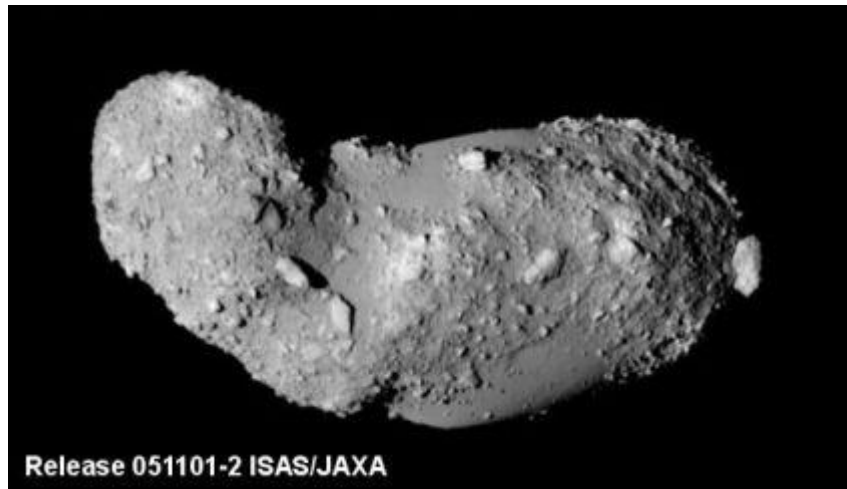


図 4.2：小惑星「イトカワ」の画像。「イトカワ」は小惑星の衝突によってできた破片が集まってできたものであると考えられている。(クレジット：JAXA) [45]

4.2.3 観測内容

小惑星の衝突は太陽系が形成された後も絶えず衝突し続けていて現在も起こっていると考えられているが、衝突頻度が低いために望遠鏡での直接観測は困難だった。しかし、2010 年に小惑星の衝突現象の直後とみられる小惑星 Scheila (シャイラ、シーラ) が発見され 2010 年 12 月 1 日に突然増光をみせた。すぐに世界中の望遠鏡で観測された。その結果、通常一点にしか見えない小惑星のすぐ近くに彗星のような尾が三つ同時に観測された。当初から小惑星同士の衝突であるとみられていたが、決定的な証拠は見つからなかった。また、三つの尾の成り立ちも安易に説明できるものではなかった。[47]

国立天文台、JAXA、ソウル大学、神戸大学などの研究者からなる研究チームは尾の謎を解明するために石垣島天文台のむりかぶし望遠鏡を使って小惑星 Scheila を三か月にわたって観測した。図 4.3 の上段はむりかぶし望遠鏡で観測した小惑星 Scheila の画像である。小惑星は通常点状にしか見えないが小惑星 Scheila は彗星の尾のような振る舞いを見せ、三つの尾が時間とともに広がっている様子が確認できた。[47]

観測を続ける中で、研究チームはわずかながら小惑星から直線状に構造が伸びていることに気が付いた。しかし、口径 105cm のむりかぶし望遠鏡の観測では構造が暗くわずかに見える程度だったので、気づくのがやっとだった。そこでむりかぶし望遠鏡より大きい口径 8.2m のすばる望遠鏡で観測したところ、直線状の構造のはっきりとした姿を初めてとらえることに成功した (図 4.3 の下段)。[47]

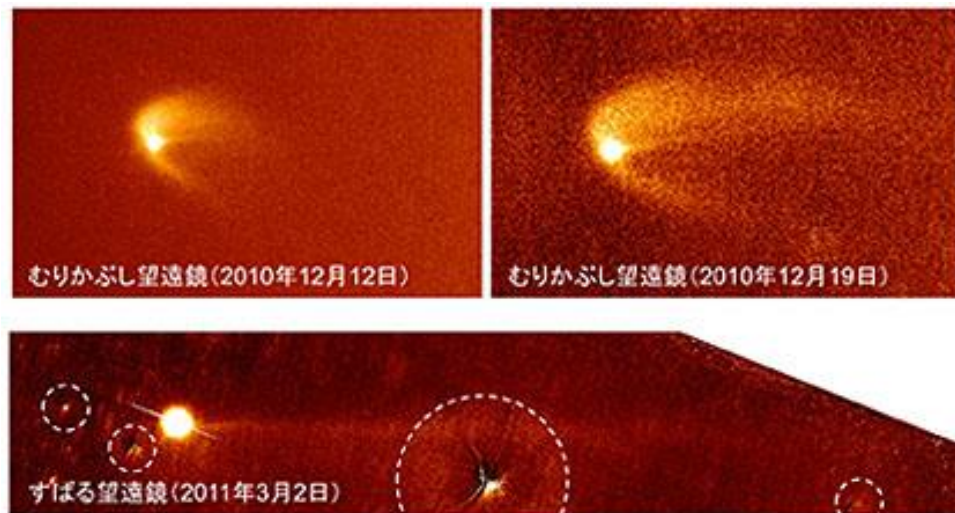


図 4.3：上段：石垣島天文台で観測した尾の変化。下段：すばる望遠鏡が世界で初めてとらえた直線状の構造。（クレジット：に国立天文台）[48]

4.2.4 観測結果

研究チームはまず、粒子の直線状構造に注目し、伸びている方向から衝突日を特定することに成功した。また、観測データの解析から衝突天体の直径は 20 から 50m であること、衝突により小惑星 Scheila の表面に直径 500 から 800m のクレーターが形成され、数十万 t のダスト粒子が放出されたことを明らかにした。[47]

これらの情報から、研究チームは JAXA で行われた室内衝突実験から得られたデータをもとにしてダスト粒子の放出機構をモデル化し、重力と太陽光の圧力を考慮した理論モデル計算を行った。その結果、小天体が小惑星 Scheila の進行方向に対して後方から衝突したときにのみ、観測画像を再現することが出来た。さらに、通常の彗星の活動では小惑星 Scheila に見られた三本の尾の構成を説明できないことも分かった。また、シミュレーションの結果から三つの尾の正体は、衝突天体の粉碎や気化によってできる高速放出流、衝突時に生じる衝撃で破壊された天体内部の物質が放出されることによってできる放出物カーテンが二つできていることがわかった。[47]

このようにして、観測、理論モデルとシミュレーション、衝突実験から三本の尾は小惑星の衝突によって発生したものであること、そしてその衝突の衝突日、直径数十 m の小惑星が後方から小惑星 Scheila に衝突したこと、彗星のような氷の昇華では三つの尾が説明できないことが分かった。小惑星同士の衝突が観測されること自体も珍しいが、衝突日や衝突の方向が明らかになったのは史上初めてのことであった。[47]

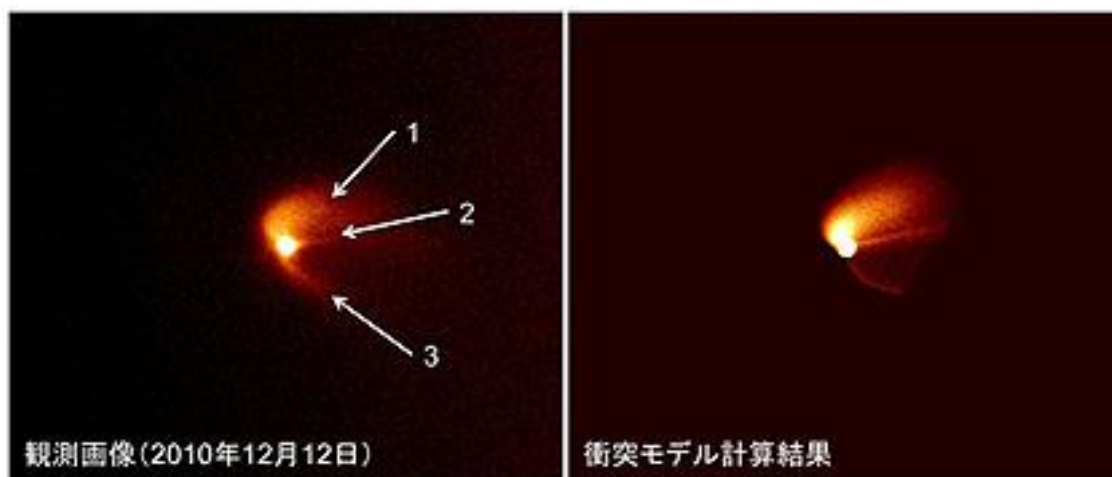


図 4.4：衝突実験をもとにした理論モデルによる再現画像。左が観測した画像で右がモデルの理論計算によるシミュレーション結果。シミュレーションの結果から尾 1 は衝突高速流、尾 2、3 は放出物カーテンであることがわかった（クレジット：国立天文台）[49]

4.3 おうし座 RY 星の周りにある原始惑星系円盤の立体構造につながる円盤上層部の散乱光の観測

4.3.1 原子惑星系円盤

恒星が誕生してから 100 万年くらいはガスや塵が集まった円盤に囲まれ、この円盤を原子惑星系円盤という。1000 万年くらいで円盤の一部は恒星に落下したり、恒星からの光で、はじき飛ばされてなくなると考えられている。そしてはじき飛ばされなかったりした円盤の一部が惑星になると考えられている。[51]

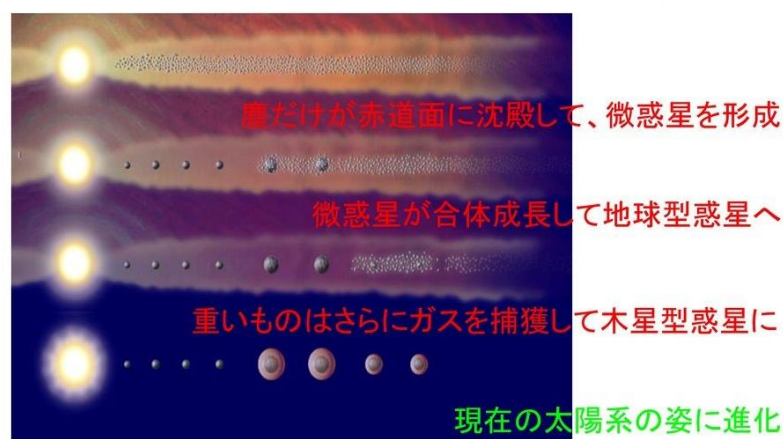


図 4.5：原子惑星系円盤の惑星の大まかな成り立ち。（太陽系をもとにした一般的な惑星系の成り立ちのシナリオ）[52]

4.3.2 観測成果

おうし座 RY 星は地球から約 470 光年のところにあり、惑星系が誕生しつつある若い星である。原子惑星系円盤の構造を観測するためには特殊な観測装置が必要だが、すばる望遠鏡には世界最高性能の惑星・円盤探査赤外線カメラ HiCIAO があり、多数の原子惑星系円盤の観測が行われている。この装置を

使うと、地球型惑星のもととなる塵粒子が中心星からの赤外線を散乱する様子を非常に精度よく観測することができる。[50]

HiCIAO を用いておうし座 R Y 星を観測したところ、検出された赤外線の分布は星を中心にしておらず、上方向にずれて観測された。これは HiCIAO によるほかの天体の観測では見られなかった新しい結果である。上方向にずれている理由は、赤外線では円盤の上側での散乱光が観測されるからだと考えられ、円盤の鉛直方向の構造によるものだといえる。[50]

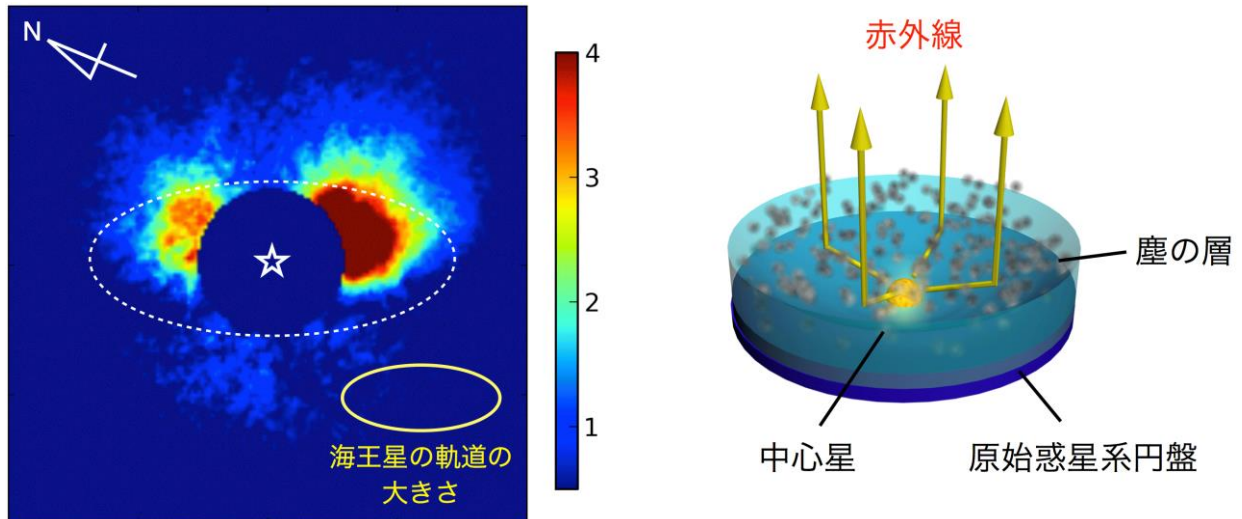


図 4.6 : HiCIAO によるおうし座 R Y 星を取り囲む塵粒子の赤外線観測画像。星印は中心星の位置を表している。白い円盤は原始太陽系円盤の位置で、電波の波長で観測される円盤の位置に対応している。(クレジット：国立天文台)[53]

この鉛直方向の立体構造を理解するために観測結果と数値シミュレーションによる比較が行われた。数値シミュレーションは様々な厚さと形状で円盤についておこなったが、これまで考えられてきた円盤表面の散乱では説明できなかった。研究チームは観測された赤外線は円盤の上に密度の低い塵の層によるものではないかと新たに考え、そのような塵の層を考えると観測結果をきちんと説明できることがシミュレーションの結果と観測成果の比較によりわかった。[50]

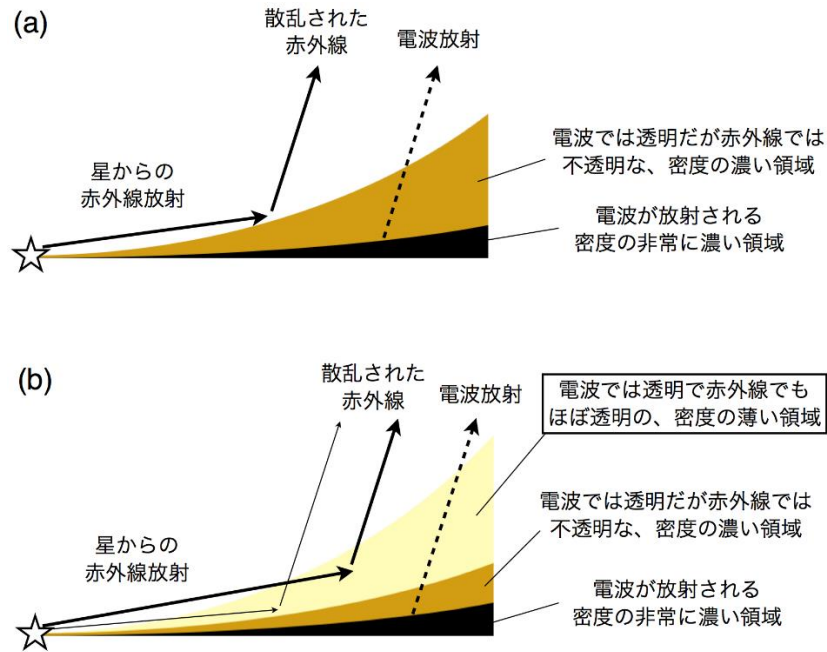


図 4.7：原始惑星系円盤の構造の模式図。電波による観測では原始惑星系円盤は透明で赤道面付近の密度が高い部分の放射が観測される。赤外線は不透明な層が電波観測より厚く、HiCIAO による観測では一般的に (a) のように赤外線では密度の濃い部分で散乱された赤外線が観測される。おうし座 RY 星は (b) のように電波、赤外線共に透明で密度の薄い場所から散乱光が観測されたと考えられる。(クレジット：国立天文台) [54]

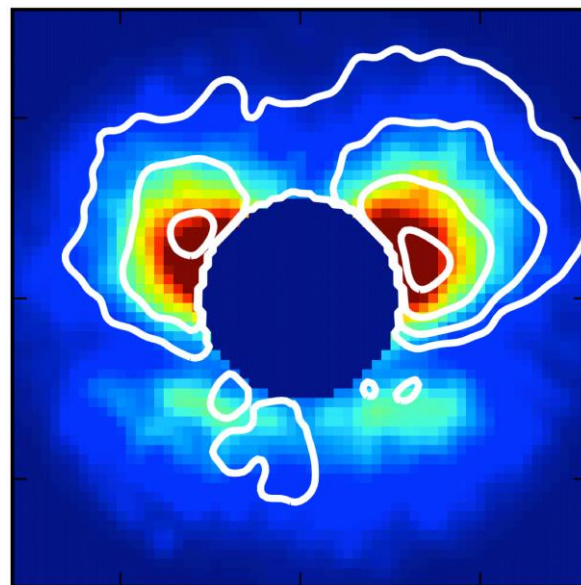


図 4.8：塵粒子による数値シミュレーション。青、黄色、赤となるにつれて赤外線の強度、明るさの強度が高くなっている。白線は HiCIAO による赤外線の観測結果で内側にいくほど強度が高い。(クレジット：国立天文台) [55]

円盤の立体構造がここまで詳細に明らかになったのは世界で初めてのことである。このような分布の理

由は、この天体が他の原子惑星系円盤と比べて若く、星や円盤ができるときに集まってきた塵が上層に残っている為ではないかと研究チームは考えている。

4.3.3 展望

電波望遠鏡では円盤の内部まで観測できるため赤外線観測ではわかっていないことがわかると考えられる。なので、今後の観測方法としてチリにある電波望遠鏡「アルマ」による電波観測とすばる望遠鏡の赤外線観測を組み合わせることにより惑星の成り立ちに関する原始惑星系円盤などの解明できていない謎を研究していくことになる。

5 すばる望遠鏡による観測成果の例(銀河系外)

いずみん
つるちゃん

銀河系（天の川銀河とも呼ばれる）は我々のいる太陽系が属する銀河である。銀河系の直径は約 10^{18}km と日常では現れない非常に大きなスケールであるが、それよりもさらに距離を隔てているような天体の観測をするとなれば装置の高い性能が必須となる。

観測装置についてでも述べられた技術により、すばる望遠鏡を用いた観測成果は多数挙げられている。この章ではその成果の中で銀河系外に存在する天体の観測について 2 例取り上げる。

5.1. 最遠方銀河探査

5.1.1 最遠の宇宙

この宇宙が誕生してから約 138 億年の歴史の中で、どのような過程を経て宇宙は現在の姿になったかということは非常に興味深いものである。宇宙のより過去の姿を見ようとすれば、それはより遠くの天体を見るということを意味する。例えば、1 光年（約 9 兆 5 千万 km）先の天体からやってきた光は 1 年かけて私たちのもとに届くので、実際には 1 年前の姿を見ていることになる。

すばる望遠鏡は口径 8.2m の単一鏡を持ち、微弱な光を集めることが出来るので暗い天体の撮影も可能である。また、1 回の撮影で見ることが出来る領域が広いことも特徴の 1 つだ。これまでに数多くの天体を観測し、100 億光年以上離れた銀河の観測にも成功している。中には 130 億光年ほどの距離にある銀河も含まれ、これは宇宙が誕生してからわずか数億年程度の生まれて間もない銀河だ。[55][56]

5.1.2 LAE 銀河

水素原子において、陽子に電子がどのような状態で結合しているか、量子力学による離散的なエネルギー準位で定められている。電子のエネルギー準位が励起状態から準位を落とすときに輝線スペクトルが発せられる。水素原子の場合、 $n=2$ から $n=1$ になるときに発せられる波長は 121.6nm の紫外線となり、これをライマン α 輝線と呼ぶ。若く星を形成している銀河で多く放出される。この輝線で明るく見える銀河を LAE 銀河（ライマン α 輝線銀河）という。[55][56]

5.1.3 宇宙再電離

宇宙が誕生して間もなくは超高温の状態で、誕生から約 3 分後には陽子やヘリウム原子核が生成され飛び回っていた。電子と原子核が分離したプラズマ状態であったが、宇宙の膨張に伴う温度の低下によって、約 38 万年後には原子が形成され始めた。これによって光がまっすぐ進めるようになり、これを宇宙の晴れ上がりという。しかし、宇宙が 10 億歳になるまでには再び電離状態になったということが分かっている。これを宇宙再電離と言って現在も継続した状態だ。宇宙再電離がいつごろから始まったのかは詳しくわかっていない。

宇宙電離以前に存在した水素原子の雲によって天体からの光（ライマン α 輝線）は吸収されてしまう。中性水素が存在しているのなら、LAE 銀河は観測されない、あるいは個数が少ないなどが予想される。遠方にある LAE 銀河を観測することで、宇宙の初期の様子や宇宙再電離がどの時期に、どのように起こったかを知る手掛かりとなる。[55][56]

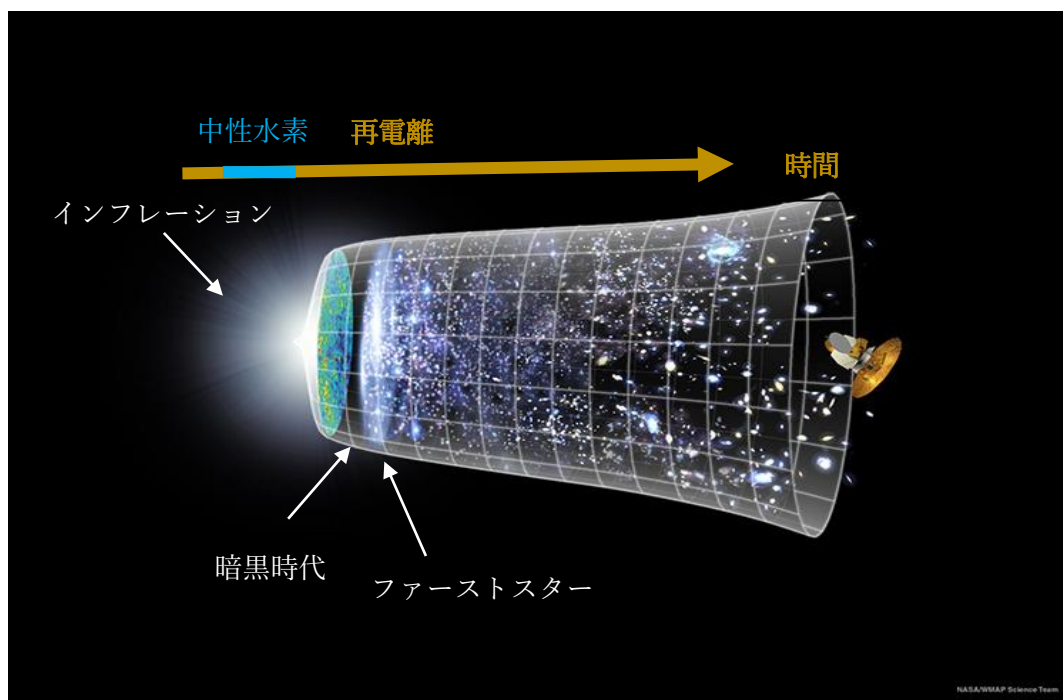


図 5.1 : 宇宙の過去から現在まで[59]

5.1.4 すばる望遠鏡による最遠方銀河調査

2014 年 11 月 18 日、東京大学宇宙線研究所の研究チームは Suprime-Cam に特殊なフィルター NB101 を付け、131 億光年彼方にある LAE 銀河を 7 個見つけることに成功した (図 5.2)。NB101 のフィルター伝送帯は中心を $10095\text{\AA}$ 、狭くとがった半値幅 $\Delta\lambda=90\text{\AA}$ をもつ。これによって効率よく LAE 銀河を探し出すことが出来る。[56]

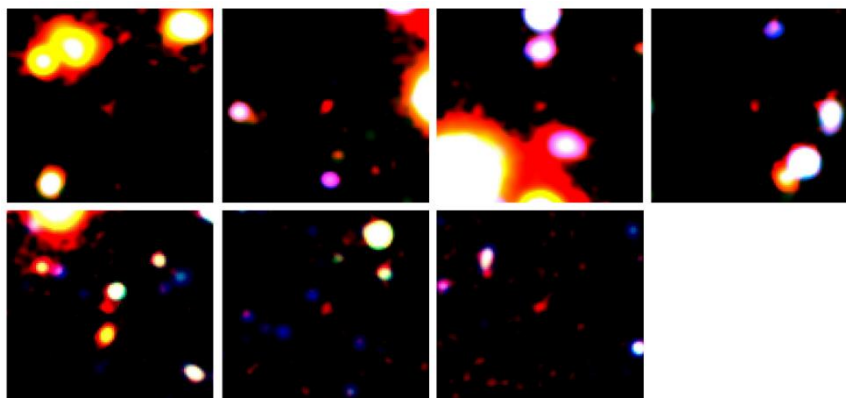


図 5.2 : 131 億光年の距離にある LAE 銀河[57]

図 5.2 の中央の赤い光がこの調査で見つかった LAE 銀河で、これはすばる望遠鏡にとって最遠のものである (2014 年当時) [注 1]。3 色合成によって色付けされていて、NB101($1.01\mu\text{m}$)を赤、i($0.76\mu\text{m}$)を緑、B($0.45\mu\text{m}$)を青としている。宇宙膨張による赤方偏移によってとても赤く (波長が長く) なっていることが窺える。[57]

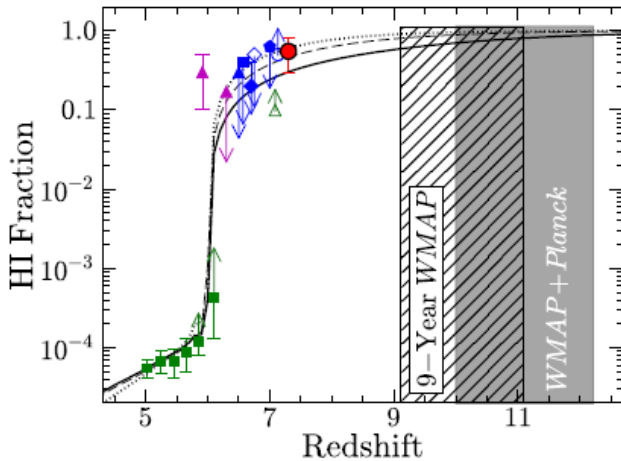


図 5.3 : 中性水素の割合と赤方偏移の関係[55]

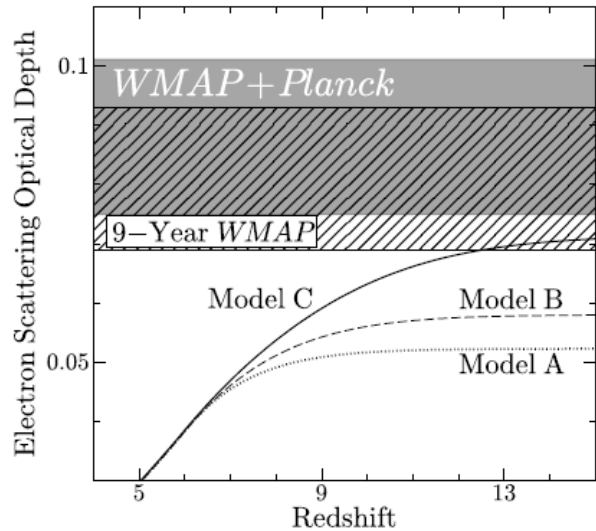


図 5.4 : トムソン散乱の光学的厚さと赤方偏移の関係[55]

図 5.3 は今回のすばるの観測成果から得られたデータ (赤丸) と以前のデータをプロットしたもので、宇宙全体の水素に対する中性水素の割合 χ_{HI} と宇宙での距離の指標となる赤方偏移 z の関係を表したものである。モデル A、B、C は光源の質量で分けられていて、 $\sim 10^9$ 、 $\sim 10^8$ 、 $\sim 5 \times 10^5 M_{\odot}$ となる。 $z \sim 7$ で中性水素の割合が急増していることが分かる。

図 5.4 は WMAP と WMAP+Planck から得られた τ_{el} (トムソン散乱の光学的厚さ) と赤方偏移 z との関係を表したものである。 τ_{el} は 0.07~0.1 程度の値になることが示唆されている。図 5.3 でのモデル A、B、C と比較すると、A、B は 0.07~0.1 を下回る。

この 2 つの図を比べると、中性水素の割合に相違が生じている。どのようにライマン α 線光度関数 ($\text{Ly}\alpha$ LF) の進化が加速されたか、いくつか考えられることがある。1 つは、再電離期の最中に中性水素雲のかたまりが存在したというものだ。中性水素は $\text{Ly}\alpha$ 線を吸収してしまうため、我々に届く前に観測できないレベルまで暗くなってしまう可能性がある。つまり、中性水素の割合が急激に減少することは $\text{Ly}\alpha$ LF の急激な増加に繋がる。

もう 1 つの可能性は、 χ_{HI} の見積もりの不確定性が大きいので、 χ_{HI} と τ_{el} の関係に相違が生まれたというものだ。この相違について考えられることは、 χ_{HI} 不確定性の支配的な要因の 1 つは $\text{Ly}\alpha$ LF での誤差によるものである。その大部分は少ない LAE サンプルによる統計的誤差によって引き起こされる。

5.1.5 今後の展望

より多くの LAE サンプルを得るために、今回の研究より広い領域を狭帯域観測する必要がある。

Suprime-Cam を改良した Hyper Suprime-Cam(HSC)はこれを可能にする。HSC でより多くの LAE サンプルを調査することによって、 χ_{H1} の統計的誤差を減らすことが期待される。

[注 1] 2016 年にはハッブル宇宙望遠鏡によって 134 億光年先に銀河が見つかった。[58]

5.2 DOG と超巨大ブラックホール

5.2.1 DOG(Dust Obscured Galaxy)

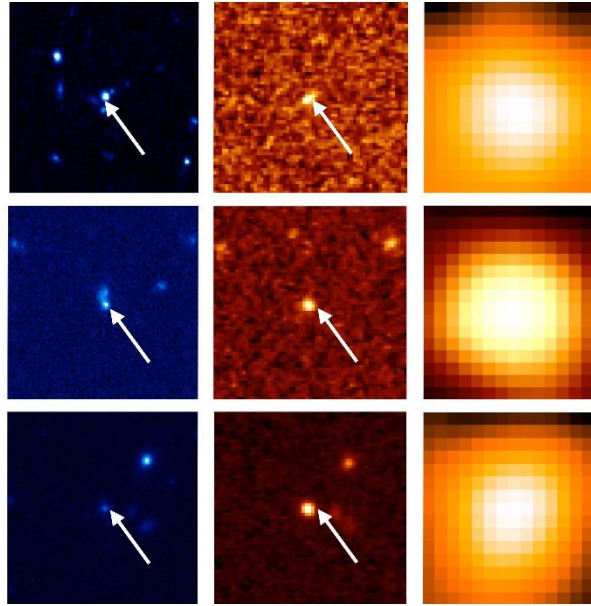


図 5.5: 塵に覆われた銀河 DOG の一部の可視光線 (左: HSC)、近赤外線 (中央: バイキング)、中間赤外線 (右: ワイズ) 画像[63]

DOG とは、銀河中での星形成が盛んな時期である約 80~100 億年前に多く存在したとされている銀河である。特徴としては周囲に多量の塵が存在し、また赤外線で良く光ることが挙げられる(図 5.5)。中間赤外線のフラックス密度は可視光より 3 桁も大きく、これは星形成や活動銀河核により塵が温められたことに起因すると考えられる。赤外線で明るい一方で可視光では暗いため、可視光での探査は困難な天体である。DOG には 2 つの分類がされている。まず PL(Power-law)タイプは長波長に向かってフラックス密度が上昇していく特徴を持つ。2 つ目は bump タイプで、静止座標系において 1.6 μm の波長のところでフラックス密度に隆起が現れる。実際にはこの隆起の位置は赤方偏移に依ってしまうので、この二つのタイプの選別は困難とされている。ほとんどの銀河にはブラックホールが存在するとされている。これまでの研究からブラックホールと銀河のバルジの質量、光度には相関があることがわかり、これはブラックホールと銀河の共進化を示唆するものである。[60][61][62]

5.2.2 星の進化とブラックホール

星はその質量や連星といった要因に基づいて長い時間をかけて進化していく。ブラックホールはその進化の最終段階に生まれるものと考えられる。ここでは星の進化とブラックホールについて説明す

る。[66]

(i) 恒星の進化

自ら光を発する恒星の進化は HR 図により追うことができる(図 5.6)。まず宇宙を漂う物質が重力によって集まり、さらに収縮することで内部が高温状態となり、水素の核融合反応によってエネルギーを生成する主系列星の段階に入る。その後赤色巨星の段階へと移り、外層のガスが失われると中心には核融合で生成されたヘリウムのコアが残される。このコアの質量によって進化が分かれ、その境目の質量をチャンドラセカール限界という。チャンドラセカール限界は約 1.46 太陽質量という計算が成されており、これより小さければ白色矮星、大きければ中性子星やブラックホールとなる。

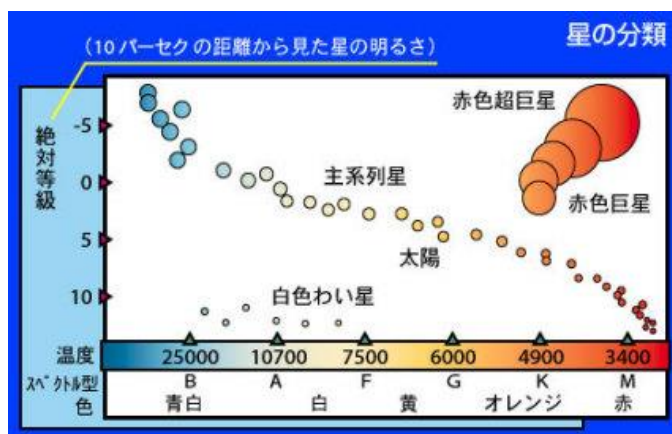


図 5.6: HR 図.光度と温度に関係が見られる [63]

(ii) ブラックホール

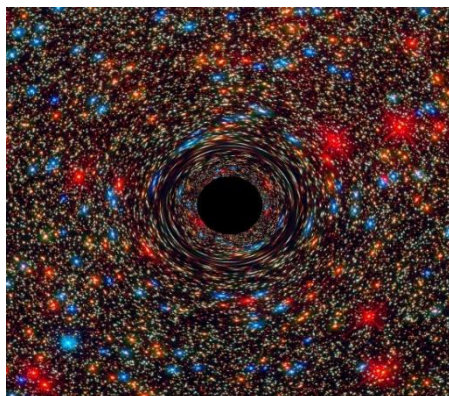


図 5.7: ブラックホールのイメージ [64]

ブラックホールは物質が凝縮され生まれた極めて高密度の天体である。銀河中心に存在するとされる $10^6 \sim 10^{10}$ 太陽質量という質量を持つ。故に強い重力を生じ、一般相対論の元で強い重力源の周りの時空が歪められ事象の地平線という領域より内側からは光すら抜け出すことができず内側の情報は得られない。

光すら飲み込むブラックホールの観測は直接の観測ができない。そこで周囲を回転する物質が

ブラックホールへ落ち込む際に X 線や γ 線を発するため、これにより間接的に観測される。他にもブラックホール周りの天体のケプラー運動からや、光の進みが曲がる重力レンズ効果等による存在の示唆もされる。

5.2.3 すばるの観測成果

すばるに搭載された HSC により、広範囲での撮影が可能となっている。これを用いて 300 夜分の観測で前例に無いレベルでの広視野、高い検出感度での観測をするプログラムが進行中となっており、本来可視光では暗く観測の難しい DOG の探査への期待ができる。そしてプログラムで得られるデータの初期の時点のものを用いて DOG の探査が行われた。NASA の赤外線天文衛星ワイズ、ESO で行われる探査計画バイキングと合わせることで、観測された天体の内赤外線のエネルギーが可視光線のものより 1000 倍以上高いものを DOG として選出した。その結果新たに PL DOG が 31 個、bump DOG を 17 個の計 48 個の DOG が発見された。DOG は太陽の 10 兆倍もの赤外線光度を持つと推定されている。この発見された DOG について、300 個/Gpc³ という個数密度が世界で初めて求められた(図 5.8)。DOG の明るさの波長依存性、そして上記した個数密度の光度依存性を考慮すると、DOG の中心に急成長をする巨大ブラックホールの存在が示唆された。ほとんどの銀河に存在するとされるブラックホールであるが、今回の成果は理論的ではなく観測的にそれらの共進化の謎を解き明かすきっかけとなり得るものとなった。[60][67][68]

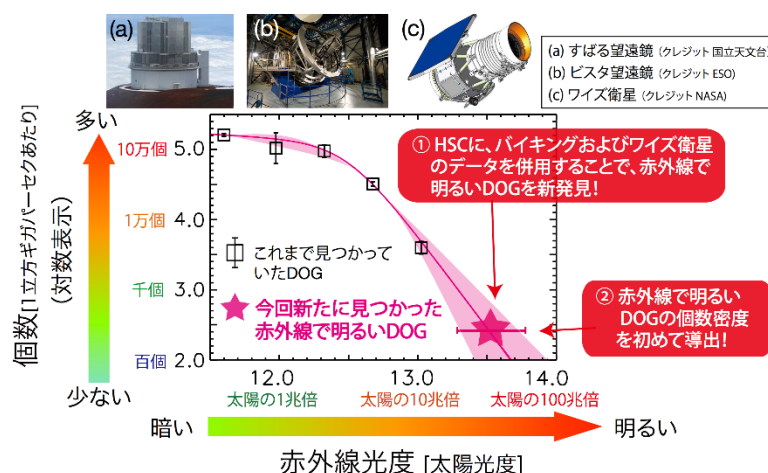


図 5.8:DOG の個数密度と赤外線光度の関係[63]

5.2.4 今後の展望

今回は初期データとして得られたものの結果である。さらに観測を重ねていくことで、最終的に 100 倍の、3000 個を超える DOG の観測が期待される。またこの研究では極めて広範囲の観測であったが、より狭い領域に絞った DOG の観測も行われると期待される。

参考文献

引用

表紙画像

<http://www.choicehotels.com/hawaii/honolulu/hotels>

[1]島の概観

<http://wadaphoto.jp/kikou/hawaii01.htm>

[2]マウナケア山について

<http://www.skymerica.com/Bigisland/highlight/Maunakea14.html>

[3]マウナケア山がなぜ天体観測に適しているか

https://www.subarutelescope.org/Information/j_faq.html

[4]マウナケア天文台群について

<http://www.ifa.hawaii.edu/mko/>

[5]ハワイ神話について

<http://www.legendaryhawaii.com>

[6]<https://blogs.yahoo.co.jp/yurico0706/2181941.html>

[7]https://www.subarutelescope.org/Introduction/j_telescope.html

[8]https://www.subarutelescope.org/Introduction/j_instrument.html

[9]https://www.subarutelescope.org/Introduction/j_outline.html

[10]https://www.subarutelescope.org/Introduction/j_tech.html

[11]<https://www.naoj.org/Observing/Telescope/index.html>

[12] 国立天文台ハワイ観測所すばる望遠鏡

<https://ja.wikipedia.org/wiki/>

[13] ナスミス式望遠鏡

<https://ja.wikipedia.org/wiki/>

[14] カセグレン式望遠鏡

<https://ja.wikipedia.org/wiki/>

[15] リッチー・クレチアン式望遠鏡

<https://ja.wikipedia.org/wiki/>

[16]<https://www.mitsubishielectric.co.jp/society/space/telescope/subaru.html>

[17]<http://www.newglass.jp/mag/TITL/maghtml/55-pdf/+55-p003.pdf>

[18]http://ryutao.main.jp/telescope_type.html

[19]http://ci.nii.ac.jp/els/contentscinii_20170812172832.pdf?id=ART0002538363

[20]<http://www.astroarts.co.jp/news/2011/07/26subaru/index-j.shtml>

[21]http://tenkyo.net/kaiho/pdf/2008_05/2008-05-01.pdf

[22]<http://www.kusastro.kyoto-u.ac.jp/~iwamuro/LECTURE/OBS/telescope.html>

[23] <http://www.phys.chuo-u.ac.jp/public/tag/kougi/2003/buttoku2/parity.pdf>

[24]すばる望遠鏡の観測装置 - すばる望遠鏡

https://www.subarutelescope.org/Introduction/j_instrument.html

[25]新型の超広視野カメラが開眼、ファーストライト画像を初公開

https://subarutelescope.org/Topics/2013/07/30/j_index.html

[26]高分散分光器 HDS

https://subarutelescope.org/Introduction/instrument/j_HDS.html

[27]近赤外線分光撮像装置 IRCS

https://subarutelescope.org/Introduction/instrument/j_IRCS.html

[28]HiCIAO | 国立天文台 太陽系外惑星探査プロジェクト室

<http://exoplanet.mtk.nao.ac.jp/instrument/hiciao>

[29]冷却中間赤外線分光撮像装置 COMICS

https://subarutelescope.org/Introduction/instrument/j_COMICS.html

[30]MOIRCS - すばるの新しい「赤外線の時」 ついに始動

https://subarutelescope.org/Topics/2006/02/22/j_index.html

[31]微光天体分光撮像装置 FOCAS

https://subarutelescope.org/Topics/2006/02/22/j_index.html

[32]波面補償光学装置 AO System - すばる望遠鏡

https://www.subarutelescope.org/Introduction/instrument/j_AO.html

[33]観測成果 - レーザーガイド補償光学のファーストライト成功 ～すばる望遠鏡の視力を10倍にする
レーザーガイド補償光学！～ - すばる望遠鏡

https://www.subarutelescope.org/Pressrelease/2006/11/20/j_index.html

[34]キャノン：テクノロジー | すばる望遠鏡主焦点補正光学系

<http://web.canon.jp/technology/future/subaru.html>

[35]ケック望遠鏡 HP

<http://www.keckobservatory.org/>

[36]ジェミニ天文台 HP

<http://www.gemini.edu/>

[37]宇宙情報センター ハッブル宇宙望遠鏡

http://spaceinfo.jaxa.jp/ja/hubble_space_telescope.html

[38]LBT HP

<http://www.lbto.org/>

[39]ESO VLT HP

<http://www.eso.org/public/teles-instr/paranal-observatory/vlt/>

[40]TMT HP

<http://tmt.mtk.nao.ac.jp/intro-j.html>

[41]ESO E-ELT HP

<https://www.eso.org/sci/facilities/eelt/>

[42]GMT HP

<https://www.gmto.org/>

- [43]http://spaceinfo.jaxa.jp/ja/milky_way.html
- [44]https://www.nasa.gov/mission_pages/GLAST/science/milky_way_galaxy.html
- [45]<http://spaceinfo.jaxa.jp/ja/asteroids.html>
- [46]<http://spaceinfo.jaxa.jp/ja/protoplanetarydisk.html>
- [47]Ishiguro et al. 2011、Astrophysical Journal Letters 740,L11 ページ、"Observational Evidences for Impact on the Main-Belt Asteroid (596) Scheila"
- [48]<https://subarutelescope.org/Pressrelease/2011/10/19/fig1j.jpg>
- [49]<https://subarutelescope.org/Pressrelease/2011/10/19/fig3j.jpg>
- [50]Takami, M. et al. 2013, Astrophysical Journal 772:145, "High-Contrast Near-Infrared Imaging Polarimetry of the Protoplanetary Disk around RY Tau"
- [51]<http://slidesplayer.net/slide/11232250/>
- [52]<http://www.subarutelescope.org/Pressrelease/2013/08/22/fig2j.png>
- [53]<http://www.subarutelescope.org/Pressrelease/2013/08/22/fig3j.png>
- [54]<http://www.subarutelescope.org/Pressrelease/2013/08/22/fig4j.png>
- [55]Konno et al., 2014,ApJ, 797:16
- [56] 提供：©東京大学宇宙線研究所/国立天文台
https://www.subarutelescope.org/Pressrelease/2014/11/18/j_index.html#4
- [57]国立天文台
<https://www.nao.ac.jp/gallery/weekly/2016/20160621-subaru.html>
- [58] HUBBLESITE news
http://hubblesite.org/news_release/news/2016-07
- [59] NASA ©NASA/WMAP Science Team
<https://map.gsfc.nasa.gov/media/060915/index.html>
- [60] Toba et al,2015,PASJ,67,86
- [61] Magorrian, J., et al. 1998, ApJ, 115, 2285
- [62] Marconi, A., & Hunt, L. K. 2003, ApJL, 589, L21
- [63]https://subarutelescope.org/Pressrelease/2015/08/26/j_index.html 2015
- [64] http://spaceinfo.jaxa.jp/ja/magnitude_scale.html
- [65] <https://www.nasa.gov/image-feature/computer-simulated-image-of-a-supermassive-black-hole>
- [66]Hale Bradt, Astrophysics Processes:The physics of Astronomical Phenomena,New York,2008
- [67] Wright, E. L., et al. 2010, ApJ, 140, 1868
- [68] Arnaboldi, M., Neeser, M. J., Parker, L. C., Rosati, P.,Lombardi, M., Dietrich, J. P., & Hummel, W. 2007, The Messenger, 127, 28