

目次

第1章	すばる望遠鏡について	4
1.1	すばる望遠鏡とその立地環境について	5
1.1.1	立地環境	5
1.1.2	望遠鏡本体	6
1.2	すばるを高性能にしている2つの技術	7
1.2.1	高性能な望遠鏡とは	7
1.2.2	大きな鏡の問題点	7
1.2.3	能動光学とは	8
1.2.4	問題点の解決	9
1.2.5	地上にあることの難点	9
1.2.6	補償光学とは	9
1.2.7	補償光学の進化	9
1.3	ドーム	11
1.4	すばる望遠鏡の4つの焦点	12
1.4.1	主焦点(直焦点)	12
1.4.2	カセグレン焦点	13
1.4.3	ナスミス焦点(可視光, 赤外線)	13
1.5	その他	15
第2章	すばる望遠鏡の観測装置について	18
2.1	すばる望遠鏡による観測	19
2.1.1	観測の種類と方法	19
2.1.2	すばるの観測装置	19
2.1.3	補償光学	25
2.1.4	すばるが世界をリードしている研究	29
2.1.5	まとめ	30
2.1.6	次世代の装置	30
第3章	すばる望遠鏡の観測成果(銀河系内)について	32
3.1	すばる望遠鏡による系外惑星の発見について	33
3.2	系外惑星とは?	33
3.2.1	系外惑星の種類	33

3.2.2	N2K プロジェクト	34
3.3	系外惑星の観測方法	34
3.4	ドップラーシフト法	35
3.5	トランジット法	36
3.6	観測結果	38
3.7	超新星残骸カシオペヤ A の可視光の「こだま」を解読	39
3.7.1	カシオペヤ A とは …	39
3.7.2	こだまとは …	39
3.7.3	観測内容	39
3.7.4	観測結果	40
3.8	月のクレーターの起源	42
3.8.1	観測内容	42
3.8.2	観測結果	42
第 4 章	すばる望遠鏡の観測成果 (銀河系外) について	44
4.1	すばる望遠鏡による遠方宇宙の観測	45
4.2	すばる望遠鏡による最遠宇宙の観測	50
4.2.1	最遠の銀河団	50
4.2.2	最遠の銀河	53
4.3	まとめ	55
第 5 章	ハワイの歴史・自然・文化	56
5.1	ハワイ諸島の誕生	57
5.2	ハワイ島	57
5.2.1	マウナ・ケア山	57
5.2.2	すばる天文台	58
5.2.3	マウナ・ロア山	59
5.2.4	キラウエア火山	59
5.3	オアフ島	60
5.3.1	ホノルル国際空港	60
5.3.2	ダイヤモンド・ヘッド	61
5.4	マウイ島	61
5.4.1	ハレアカラ火山	62
5.5	ハワイ諸島への移住	62
5.6	生活	63
5.7	文化	63
5.8	フラダンス	64
5.9	ハワイ王朝	64
5.10	現代のハワイ	65

5.10.1	州のシンボル	65
5.10.2	近年のハワイ	66

第1章 すばる望遠鏡について

担当

東邦大学理学部物理学科4年
アルデバラン



東邦大学理学部物理学科3年
ベテルギウス



1.1 すばる望遠鏡とその立地環境について

1.1.1 立地環境

すばる望遠鏡は、太平洋の中心、ハワイ島マウナ・ケア山の山頂に設置されている。この場所は天体観測において世界でも最適な場所の一つとして知られている。標高 4200 m の山頂は、気圧が平地の 2/3 程度しかなく、地上の天候にほとんど影響されない高さにあるため、1 年のうち 300 日以上も快晴となる日がある。貿易風（マウナケアは北半球にあるため北東から吹く）がハワイ上空を滑らかに吹き、雲が山頂まで上がってくることは稀である。また、太平洋上に孤立するように島が存在し、近くに大きな都市もないため天体観測を妨げる人工的な光もほとんど無い。

国立天文台が建設準備を進めていた当初のプロジェクト名は「日本国設大型望遠鏡」（英語名：Japan National Large Telescope, JNLT）だったが、建設が始まった 1991 年に望遠鏡の愛称の公募が行われ、全国から集まった約 3,350 通の中から「すばる」という名前が選ばれた。元々「すばる」は、おうし座の辺りにあるプレアデス星団という星の集まりの和名であり、遠く奈良・平安時代から親しまれてきた星のやまと言葉である。その由来は「すまる」（集まる、統べるの意）から転じたとされている。

天体観測に非常に適したこれらの土地環境を求めて、世界 11ヶ国、合計 13 基もの望遠鏡がマウナケア山頂には設置されている。これらの天文台をまとめて『マウナケア観測所（マウナケア天文台群とも）』という名で国際研究施設を形成しており、すばる望遠鏡もその一員となっている。（ハワイ原住民との取り決めから、天文台の最大数は 13 基までとされており、次に新たな天文台を建設するためには古いものから取り壊していかなければならない。）

さらに、マウナケアは、天体観測に適しているのと同時に、自然としても、また文化的にも貴重な資源であり、自然保護地区としてもその開発は注意深くコントロールされている。

○ マウナケア山頂のデータ

- 座標...北緯 19 度 50 分 西経 155 度 28 分
- 標高...4,205 m (13,800 ft)
- 平均気圧...約 600 hPa
- 平均夜間気温...約 0 度
- 平均日中気温...約 10 度
- 平均湿度...約 40 %

- 平均風速...約 7 m/秒
- 夜間晴天率...約 65 %

1.1.2 望遠鏡本体

望遠鏡の役割は、まず何よりも出来るだけたくさんの光を集めるという点であり。また、集めた光からシャープな天体のイメージを得ることも望遠鏡としての大事な能力である。すばる望遠鏡は、単一鏡としては世界最大の口径 8.2 m をもち天体からの微弱な光をも集めることができ、さらに、高い解像度を実現するためのさまざまな工夫が施されている。その高い性能は、望遠鏡を設置する場所を慎重に選び、最新の技術を駆使することによって可能となった。

すばる望遠鏡の口径 8.2 m もの大きな主鏡は、7 年の歳月と細心の注意をかけて製作された世界で一番大きい一枚鏡であり、その滑らかに磨かれた鏡は $0.014\mu\text{m}$ という誤差の鏡面精度でコンピュータ制御されている (これは主鏡をハワイ島の大きさにしても、紙一枚分の厚さ程度に相当)。また、望遠鏡を支える頑丈な構造とリニアモーター駆動によって超高精度の天体追尾が可能 (0.1 秒角以下) となっている。

1. 主反射鏡 (一枚鏡)

- 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 $0.014\mu\text{m}$
- 焦点距離...15 m

2. 望遠鏡本体

- 架台...経緯台式架台¹ 反射望遠鏡
- 基礎光学系...リッチー・クレチアン光学式²
- 焦点...4 ヶ所
 - － 主焦点 (F 比³ : 2.0 補正光学も含む) , 焦点距離...16.4 m

¹天体望遠鏡には 地球の自転軸と平行な極軸と、それに直交した赤緯軸で構成される赤道儀式架台と、鏡筒の水平回転を受け持つ軸と、それと直交した俯仰角を受け持つ軸で構成される経緯台式架台とがある。

²カセグレン焦点の説明参照

³F 比... (焦点距離) ÷ (レンズ口径) のことで、F/2.0 とも表す。F 比が小さい時「明るい」(fast), 大きい時「暗い」(slow) という。

- カセグレン焦点 (F 比 : 12.2) , 焦点距離...100.04 m
- ナスミス焦点 (可視光 F 比 : 12.6) , 焦点距離...103.32 m
- ナスミス焦点 (赤外線 F 比 : 13.6) , 焦点距離...111.52 m
- 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 秒角/秒
- 天体の追尾誤差...0.1 秒角以下
- 観測可能仰角範囲...10 度 ~ 89.5 度
- 総合星像分解能...0.2 秒角 (補償光学なし, $2.15\mu\text{m}$)

1.2 すばるを高性能にしている 2 つの技術

1.2.1 高性能な望遠鏡とは

初めに、高性能な望遠鏡とはどのようなものだろうか。望遠鏡の目的は遠くにあるものを鮮明に見ることである。ゆえにこの条件を満たす望遠鏡が良い望遠鏡である。では、遠くにあるものを鮮明に見るためにはどのような装置が要求されるだろうか。天体望遠鏡の観測対象である星は遠くにあるほど暗く見えるので、多くの光を望遠鏡の焦点に集めることができれば、より遠くのものが、より鮮明に観測できるようになる。つまり、望遠鏡に入射する光の量を増やせばよい。これより主鏡の有効口径が大きい望遠鏡ほどよい望遠鏡であることがわかる。

1.2.2 大きな鏡の問題点

前節では望遠鏡を高性能にするには主鏡を大きくすることがまず必要であることがわかった。しかし、主鏡の大型化を行うには解決しなければいけない問題がいくつか存在する。この節ではその問題について考えてみよう。

自重によるたわみ

鏡が大型化することは鏡の重量が増加することに直結する。重い鏡は自重によって変形してしまう。これでは、せっかく表面を高精度に放物面として研磨したとしても、焦点が歪んで分解能が低下してしまう。

厚みと総重量

前述のたわみ問題を解決するには鏡の厚さを増してたわみにくくすれば解決するように思われる。しかし、鏡の厚みを増すことは、総重量の増加につながりこの結果駆動系の負荷が増大する。そうすると装置全体を精密に動かすのが難しくなり、細かい動作を要求される観測に大きなハンディキャップを負ってしまう。また、厚みが増すことで鏡の重量が増加してしまうので再び鏡がたわむ問題が生じる。

1.2.3 能動光学とは

能動光学とは主鏡を裏から 261 本のアクチュエーターで支え、また、鏡が放物面からずれたときそのずれを計算してアクチュエーターで修正する技術である。このように、裏から力を掛けて一定の形に保つ機構をもった鏡のことをメニスカス鏡と呼ぶ。アクチュエーターを高度に制御する技術と理想放物面からのずれを計算によって求め、それをフィードバックする技術の双方が組み合わさってはじめて実現可能な方法である。

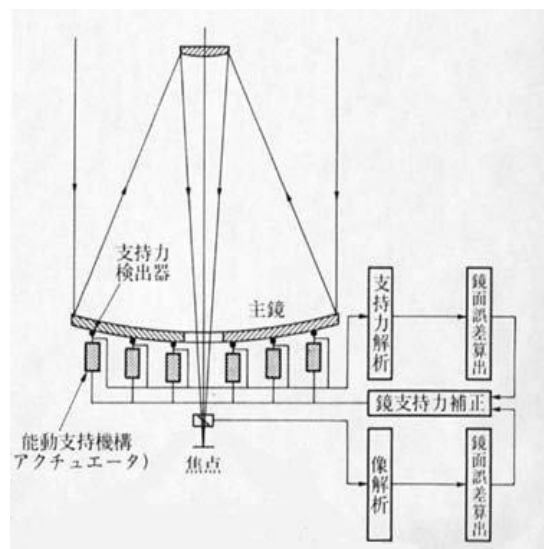


図 1.1: 能動光学の原理

1.2.4 問題点の解決

能動光学を導入することで先ほどの問題点がどのように解決したのか見てみよう。問題点は主に3点あった。自重によるたわみ、鏡の厚みの増加、総重量の増加の3点である。1点目については、これが能動光学の効果であるわけだが、アクチュエーターで支えることにより鏡のゆがみを最小限に抑えることができるようになった。2点目については、たわみを機械的に修正するので非常に薄くなった。望遠鏡の鏡については一般的に主鏡直径の $1/8$ 程度の厚みが必要と言われており8.2 mの主鏡では1 m程の厚さが必要だった。しかし、メニスカス鏡の採用で厚さがなんと20 cmまで薄くなった。3点目については主鏡の大幅な軽量化と光学系支持機構の軽量化により555 tになった。これは、1948年製のHale望遠鏡（有効直径5 m、望遠鏡重量530 t）とほぼ同程度である。

1.2.5 地上にあることの難点

通常、望遠鏡は地上に建造するものである。しかし、地上にあるが故に発生する問題がある。それは、星から飛んでくる光が大気を通過するときに大気のゆらぎによりその波面が乱されてしまうことだ。これをシーイングと呼ぶ。このため、観測装置の精度を上げてシーイングのために分解能が低下してしまう。地球上に望遠鏡を建設する以上これを完全に除くことは理論上不可能である。しかし、シーイングを低減させることは可能である。次の節ではシーイングを低減させる技術についてみてみよう。

1.2.6 補償光学とは

すばる望遠鏡にはシーイングを低減させるための装置として波面補償光学装置、略称AOが搭載されている。これは、基準になる星から入射する光を参考にして空気のゆらぎを秒間1000回計算し、入射する光の波面を可変形鏡により修正する装置である。これによりシーイングが低減され、地上にしながら非常に高い分解能を得ることが可能になった。

1.2.7 補償光学の進化

前節では補償光学の利点を概観した。しかし、すばる望遠鏡完成当初のAO装置には改善すべき点も存在していた。それは、可変形鏡を動かす素子が分解能に対して足りない点と基準にする星が観測対象のそばに存在する確率が約1%程度だったためAO装置を使用できる場面が非常に限られていた点である。これらの難点を克服するために第二世代のAO装置が2006年に導入された。これにより、素子の数は36個から188個に増加してより高い分解能を得た。また、レーザーガ

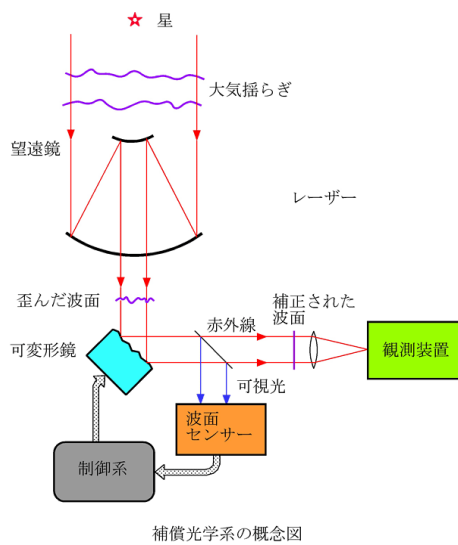


図 1.2: 補償光学の原理

イド星生成装置が新たに搭載された。レーザーガイド星生成装置は上空に向かってレーザーを照射し、波面修正用の人工星を作る装置である。レーザーの反射光を波面を修正する基準として用いることで、いままで AO 装置を使うことができなかった領域にも AO を使った観測ができるようになった。第二世代型 AO 装置の導入により分解能は 0.6 秒角から 0.06 秒角に向上した。

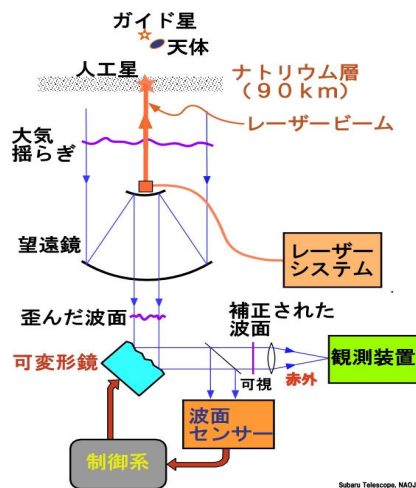


図 1.3: 第二世代型の補償光学装置

1.3 ドーム

すばる望遠鏡本体を囲むドームは、水流実験などで最良のドームの形を追求した末に円筒型のドームが採用されている。風通しの良い円筒型のドームは、外部の乱流を含んだ空気を持ち込まずに、内部の熱を効果的に排出することができるようになっている。

- ドーム部

- － 標高...4,139 m
 - * 注：望遠鏡高度軸は標高 4,163 m
- － 緯度...北緯 19 度 49 分 32 秒 (NAD83 系に準ずる)
- － 経度...西経 155 度 28 分 34 秒 (NAD83 系に準ずる)
- － 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 2000 t (ドーム上部)
- － 外壁...アルミニウム板張り

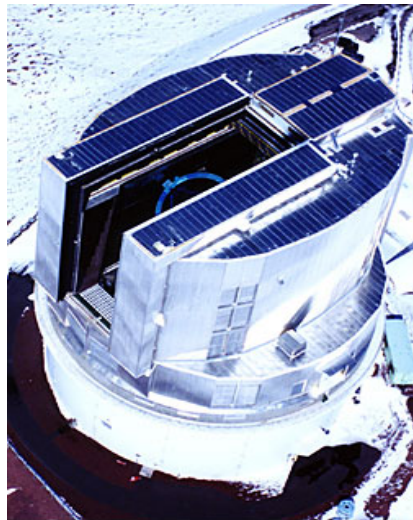


図 1.4: 上から見たドーム (国立天文台 提供)

1.4 すばる望遠鏡の4つの焦点

すばる望遠鏡の望遠鏡本体には全部で4つの焦点があり、観測の用途に応じて焦点を変え、可視光から赤外線の波長域にわたり観測が可能である。

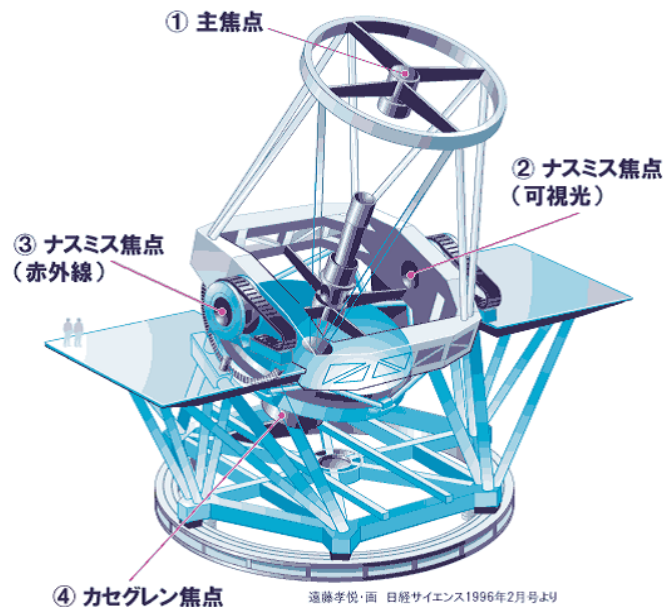


図 1.5: 各焦点の位置 (主焦点/ナスミス焦点/カセグレン焦点)

1.4.1 主焦点 (直焦点)

単一の鏡の焦点面を直接用いるもので、主鏡（回転放物面、凹面）に垂直に入射した平行光線が像を結ぶところにある（図 1.6）。可視光・近赤外の焦点。最大視野直径は 30 分角。

- 主焦点の装置

- 主焦点カメラ (Suprime-Cam)

- 長所：焦点距離を短くできるため広い視野の観測に適している。
- 短所：観測装置で光束が乱される。大型装置を付けるには望遠鏡全体の強度を増す必要がある。収差が大きいのでレンズなどの補正光学系が必要。



図 1.6: 主焦点で観測する場合

1.4.2 カセグレン焦点

主焦点の直前に副鏡（回転双曲面, 凸面）を置いて、光が主鏡の中心部に開いた穴を通り像を結ぶところにある（図 1.7）。可視光・近赤外の焦点。カセグレン焦点の装置には、観測目的に合わせていくつもの装置がある。最大視野直径は6分角。

- カセグレン焦点の装置
 - － 多天体近赤外撮像分光装置（MOIRCS）
 - － 微光天体分光撮像装置（FOCAS）
 - － 冷却中間赤外線分光撮像装置（COMICS）
 - － 36 素子波面補正光学装置（AO System）
 - － コロナグラフ撮像装置（CIAO）
- 長所：望遠鏡の全長を短くできるため、中～大口径望遠鏡に適している。比較的複雑な装置でも取り付けることが可能。
- 短所：（周りの空から光を遮るバッフルが必要）

カセグレン式から派生した光学系として、広い視野に渡って良い星像を確保するために、主鏡に双曲面、副鏡に高次非球面を用いて収差を高度に除去したリッチー・クレチアン式光学系や、主鏡に楕円面、副鏡に球面を用いて鏡面研磨を容易にしたドール・カーカム式光学系などがある。これに対して、古典的な放物面主鏡＋双曲面副鏡の組み合わせによるものをクラシカル・カセグレン光学系と呼ぶことも多い。

1.4.3 ナスミス焦点（可視光, 赤外線）

カセグレン焦点の直前に斜鏡（平面鏡）を置き、光軸を高度軸や赤緯軸と一致させて像を結ばせたところにある（図 1.8）。装置の姿勢が変化しないので重さやサイズの大い装置も据え付けることができる。

- ナスミス焦点の装置（可視光）[重量の重い装置が置ける]

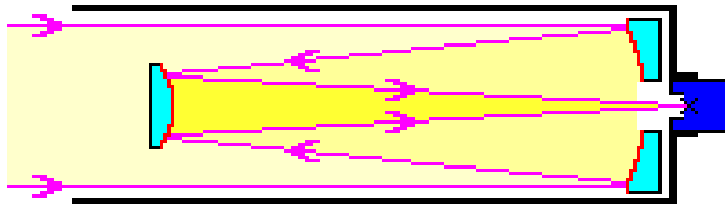


図 1.7: カセグレン焦点で観測する場合

- 高分散分光器 (HDS)
- ナスミス焦点の装置 (赤外線)
 - 近赤外線分光撮像装置 (IRCS)
 - 188 素子波面補正光学装置 (AO System) とレーザーガイド星生成システム
- 長所：焦点部の高さが変わらないので、大型の観測装置を取り付けることが可能。
- 短所：カセグレン焦点より副鏡から焦点までの距離が長くなる。斜鏡を用いるため偏光が起こる。

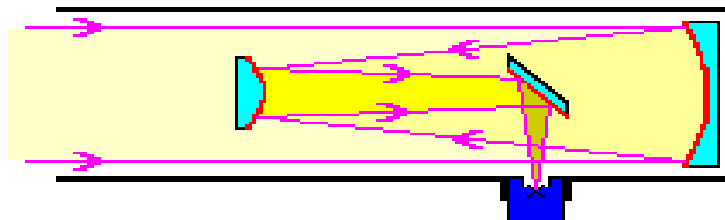


図 1.8: ナスミス焦点で観測する場合

1.5 その他

1. カセグレン焦点部

- 観測装置の交換には注意を必要とする作業で、マウナ・ケアのような高山では特にそれが困難になってくる。すばるでは素早く・安全に・正確に観測装置を交換するために、自動交換装置を多く取り入れている。
- カセグレン焦点観測装置自動交換システム (CIAX3) は、2 時間で装置を交換することができる (図 1.9)。

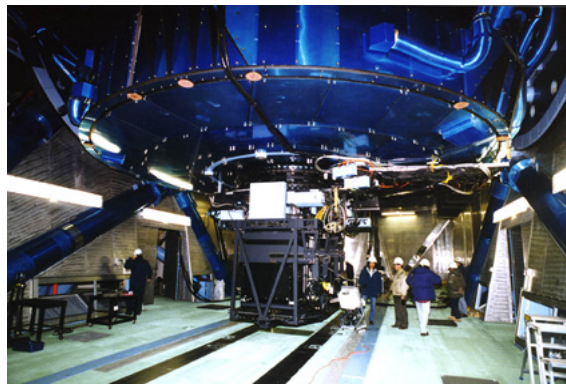


図 1.9: カセグレン焦点部

2. 鏡筒トップリング

- 鏡筒トップリングの中央が主焦点。トップユニット交換装置が副鏡や主焦点カメラを取り替える (図 1.10)。

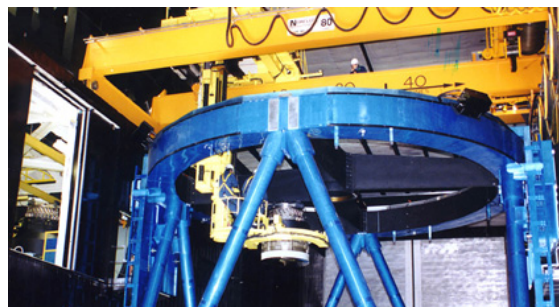


図 1.10: 鏡筒トップリング

3. CO_2 クリーニング中のすばる望遠鏡の主鏡

- すばる望遠鏡があるマウナ・ケアは、すでに火山活動が停止した山で、山頂は赤茶色の火山礫や火山灰で覆われており、また、強い風が常に吹いている場所でもある。この風のために細かな火山灰が舞い上がり、夜ドームを開けて観測するすばる望遠鏡の主鏡は火山灰で汚れてしまう。制度の高い観測を目指しているすばる望遠鏡にとって、この主鏡の汚れは大敵である。ところが、望遠鏡から口径 8.2 m もの大きな鏡を取り出して掃除するのは大変な作業であるため、主鏡を望遠鏡に取り付けたまま埃などを取り除く方法がいくつか考え出された。作業量や効率の点から採用されたのは、二酸化炭素により払い落す方法となった (図 1.11)。

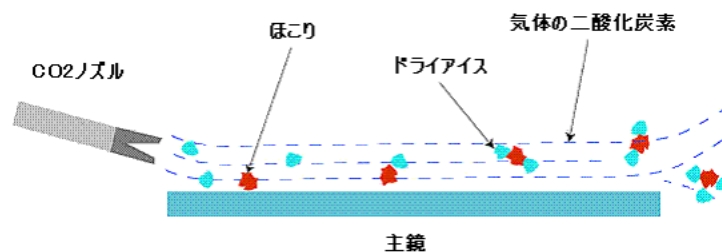


図 1.11: クリーニングの仕組み

先の細いノズルから液体の二酸化炭素（ -56.6°C ）を勢いよく出すと、熱の出入りがない急激な断熱膨張を起こす。そして、その結果、気体の二酸化炭素と固体のドライアイスができ、それらが混じった状態で主鏡全体に吹き付けると、ドライアイスが埃をはたき、気体の二酸化炭素によって埃とドライアイスが主鏡から払い落されるという仕組みである。この方法を CO_2 クリーニングと呼んでいる。

鏡面の性能を維持するために、ドライアイスによる洗浄は2週間おきに、アルミニウムの再蒸着（コーティング）は2～3年おきに行われる。ドライアイスを吹き付けて鏡面のほこりを掃除するこのシステムは、望遠鏡本体に組み込まれている。

4. メッキされた主鏡

- 主鏡の再蒸着に必要な各種設備はドーム下部に備わっている。画像は、1998年に始めて蒸着が施された口径 8.2 m の鏡。



図 1.12: CO2 クリーニング中のすばる望遠鏡の主鏡

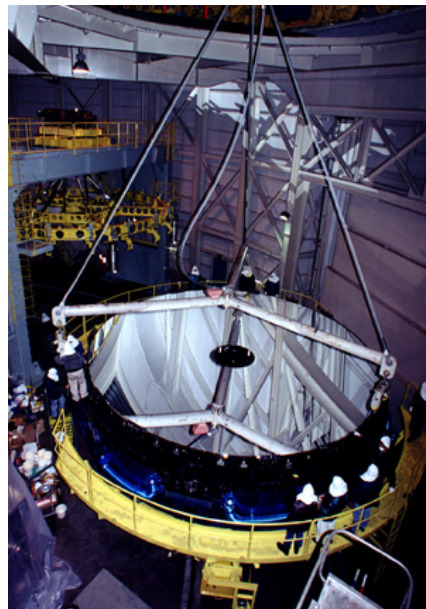


図 1.13: メッキされた主鏡

第2章 すばる望遠鏡の観測装置について

担当

東邦大学理学部物理学科 4 年
リゲル



東邦大学理学部物理学科 3 年
カペラ



2.1 すばる望遠鏡による観測

光学望遠鏡には、撮像観測装置・高分散の分光観測装置・高感度の低分散分光観測装置の基本3装置がそろっていることが必要です。すばる望遠鏡では、これらはどんな装置が担っているのでしょうか。また、この他にもどんな装置があるのでしょうか。

2.1.1 観測の種類と方法

天体観測には大きく分けて、「撮像観測」と「分光観測」があります。まず撮像観測とは、天体からの光をフィルターなどを通して上で直接画像として得るもので、天体の形や色、天球上での分布などを調べたいときに行われます。

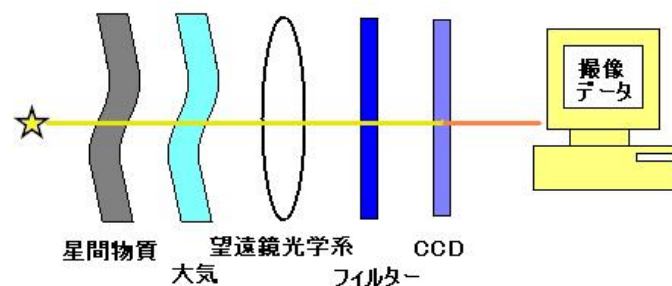


図 2.1: 撮像観測の概要図

分光観測とは、グリズムや回折格子、プリズムなどの分散素子によって波長ごとに分解された天体の光を観測するもので、天体を形成する星やガスなどの元素組成や励起状態を知るために行います。また、天体の運動や天体までの距離を推定するために用いられる赤方偏移なども分光観測で求められます。

グリズムとは回折格子プリズムとも言います。透過型回折格子の一種で、目的波長を直進させるためにプリズム上に回折格子溝を刻線したものです。グリズムを用いると分光器光学系の直線的配置が可能となります。

2.1.2 すばるの観測装置

図 2.2 は観測装置の波長と波長分解能の関係を表したものです。左から順に

1. HDS(高分散分光器)
2. FOCAS(微光天体分光撮像装置)
3. Suprime - Cam(主焦点カメラ)

4. IRCS(近赤外線分光撮像装置)
5. MOIRCS(多天体近赤外線撮像分光装置)
6. CIAO(コロナグラフ撮像装置)
7. COMICS(冷却中間赤外線分光撮像装置)

となっています。このように、すばる望遠鏡には可視光～赤外線領域で撮像、分光、または両方の観測が出来る装置があります。この中でも、HDS・FOCAS・Suprime-Cam・IRCS・MOIRCS・CIAO について詳しく調べてみました。

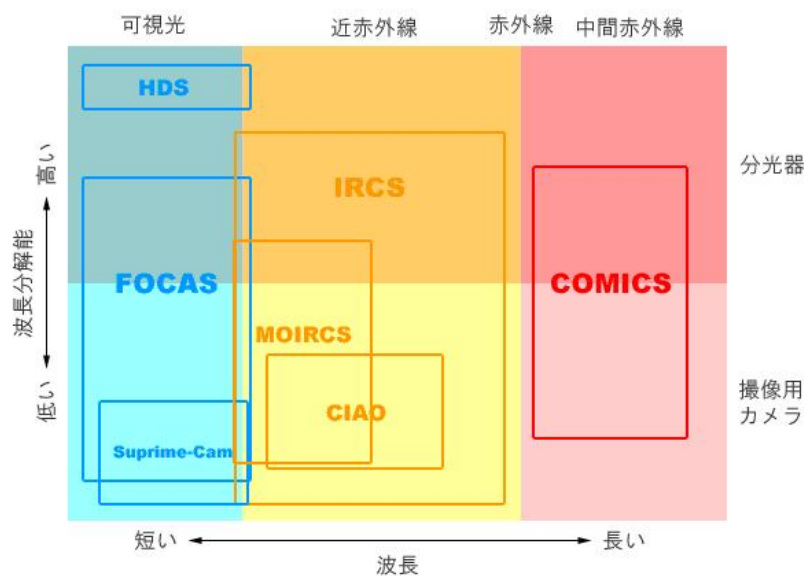


図 2.2: 観測装置の波長と波長分解能の関係

Suprime-Cam

この装置は東京大学（大学院理学系研究科、宇宙線研究所）と国立天文台のグループが共同で開発した宇宙初期の銀河を見つけるのに最適な装置です。この装置は 100 億光年遠方の銀河の大規模構造を発見し、一番遠い天体の記録を次々塗り替えるなど、新しい成果を続々と生み出しています。

Suprime - Cam は、月の見かけと同じ 34 分角 × 27 分角の視野を一度に撮影することで、銀河の誕生・進化や宇宙構造の研究、太陽系外縁部の小天体「エッジワース・カイパーベルト天体」の搜索をする装置で、夜空の広い領域を、非常に暗い天体まで一度に撮影することができる超巨大カメラです。4096 × 2048 画素と

いう大きな CCD を 10 個もすき間なく並べることで、全体で 8000 万画素のデジタルカメラとして働きます。

すばる望遠鏡には 4 つの焦点があって、この装置は主焦点に装着されています。



図 2.3: Suprime - Cam

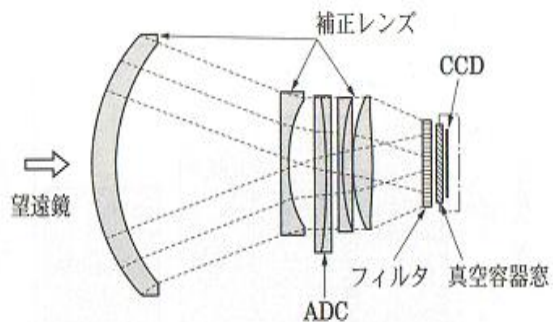


図 2.4: Suprime - Cam の光学系

図 2.5 には、肉眼で見えるよりも 1 億倍暗い天体まで写っています。この画像の中で明るく見えるのは、私たちの銀河系の中にある星たちです（スパイク状に見える線は、星の強い光が他の CCD 画素にあふれ出したことによる人工的なもの）。しかし、それ以外のほとんどの天体は、他の銀河たちで、その数は 3 万個にも達します。この画像には、新しい銀河団が発見されました（図 2.5 の右側は拡大図）。この銀河団の距離は、約 50 億年後と推定されています。

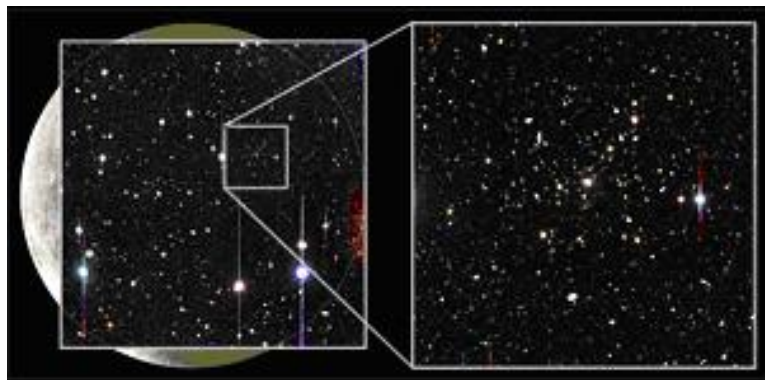


図 2.5: 3 万個の銀河

CIAO

これは明るい天体の光を遮ることによって、すぐ近くにある暗い天体の画像を撮像する装置で、太陽系外の惑星の発見をします(図 2.7)。¹ すでにいくつかの恒星をとりまく原始惑星系円盤の構造の観測に成功しています。使用方法は中央の円柱状の真空容器のなかで光学系や検出器を冷却します。そうすることで赤外線を観測し、若い星の周りで惑星が誕生する現象や、年老いた星から物質が放出される様子を捉えることができます。地上からの観測では、大気のゆらぎのために星の像は広がってしまい、明るい中心星の光を遮ることは容易ではないので優れた気象条件が必要となります。

この装置はカセグレン焦点に装着されています。



図 2.6: CIAO

図 2.7: コロナグラフの仕組み

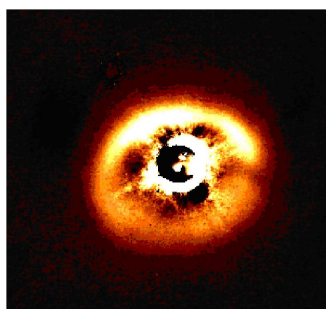


図 2.8: 生まれたての星

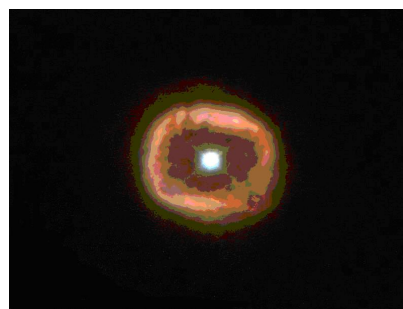


図 2.9: 星の最期

¹ もともとコロナグラフは太陽のコロナ（光冠）を観るために、太陽の光球からの光を抑えるように作られた装置である。

HDS

HDS は、エシェル回折格子を用いた波長分解能 $R = 160000$ まで得られます。可視光で 10 万分の 1 の波長差を識別できる分光観測専用の装置で、普通の分光器より 100 倍くらい細かく分光できる機能を持っています。古い星の元素組成を調べて宇宙における元素の進化を研究したり、クエーサーの吸収線を調べて銀河間ガスの組成や物理状態を調べる研究に用いられます。光を細かく分けるため、重さが 6 トンもあります (すばる望遠鏡観測装置の中では最大)。装置に少しでもズレが生じると、それぞれの細かい色の違いが不明瞭になるので、望遠鏡の横に備え付けられたナスミス台の上に常設されていて、付け替えられたり望遠鏡と一緒に傾いたりすることはありません。他の装置よりは明るめの天体が対象となっていて、多くの色、つまり広い波長を一度に観測できます。主に星の科学組成を詳細に研究したり、ドップラー効果を測って星やガスの動き (近づいているか遠ざかっているか) を研究したりするのに使われます。太陽系外惑星の研究にも使用されています。この装置はナスミス焦点の片方 (可視光) に常設されています。



図 2.10: HDS

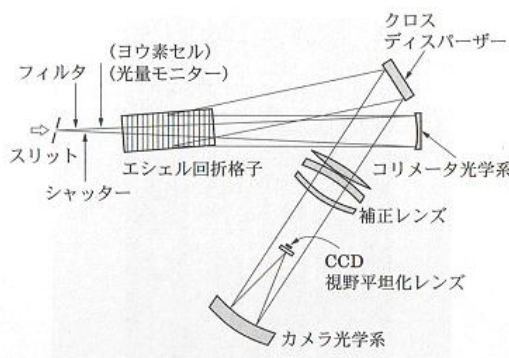


図 2.11: HDS 光学系配置図

IRCS

ハワイ大学との共同研究によって開発・製作された、波面補償光学装置を生かした高い解像力と感度による撮像観測や 20000 分の 1 の波長差を識別できる分光観測を行う装置で、近赤外線で天体像を撮影するカメラと、高い波長分解能を実現しながらも、広い波長域に渡った分光器を内蔵されています。カイパーベルト天体などの太陽系内天体から褐色矮星、星形成や銀河、高赤方偏移天体まで様々な天体の分光的研究に用いられます。この装置はナスミス焦点の片方 (赤外線) に常設されています。

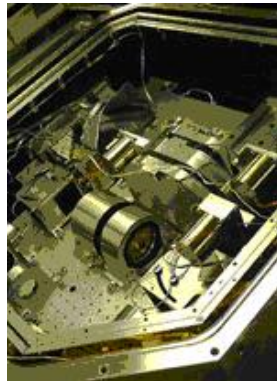


図 2.12: IRCS

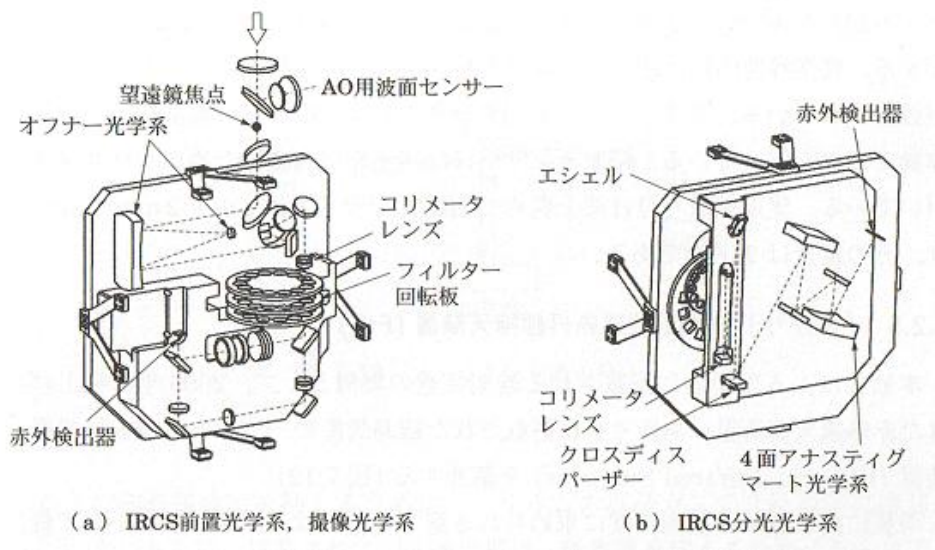


図 2.13: IRCS 光学系配置図

FOCAS

FOCAS は非常に暗い天体に対して、撮像と分光観測もしくは偏光観測を行う可視光線の装置で、可視光で高い感度の観測を行います。視野内の 100 個の天体のスペクトルを同時に撮像できる機能を使用することにより、宇宙の果て近くにある銀河までの距離を効率よく調べることができます。また、多くの天体を同時に分光するマルチ分光という機能があります。カセグレン焦点に装着されています。



図 2.14: FOCAS

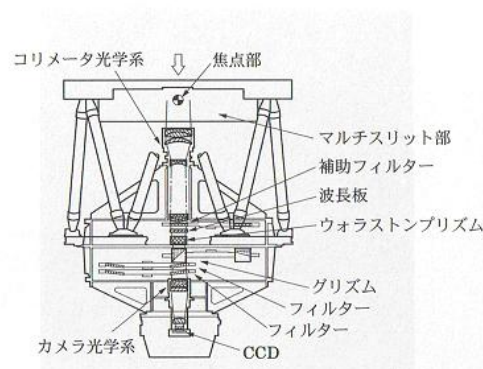


図 2.15: FOCAS の構造図

MOIRCS

MOIRCS は東北大学と国立天文台とが共同で開発した、世界最大視野を誇る近赤外線撮像装置で、天体から届く近赤外線の撮像及び分光観測を行います。近赤外線は可視光よりも暗黒星雲などに吸収されにくいいため、銀河系の中心方向にある星々をはっきりと捉えることができ、近赤外線波長域で一度に複数の天体の分光観測を行う多天体分光機能を備えています。

近赤外線用としては巨大な 400 万画素の検出器 2 つを備え、世界の口径 8 - 10 m 級望遠鏡の中では最大の視野 4 分角 × 7 分角を誇ります。

2.1.3 補償光学

補償光学とレーザーガイド星

次に、近赤外線用の「波面補償光学装置 (AO System)」について説明します。これは大気の流れを実時間で補正することにより、波面補償光学装置は主鏡の直径によって決まる解像力（回折限界）を実現する装置です。IRCS・CIAO といった赤外線観測装置と組み合わせて使います。AO を使うことで、今まで密接していて個別に観測できなかった天体を、分解して個別に観測できるようになったり、光



図 2.16: MOIRCS

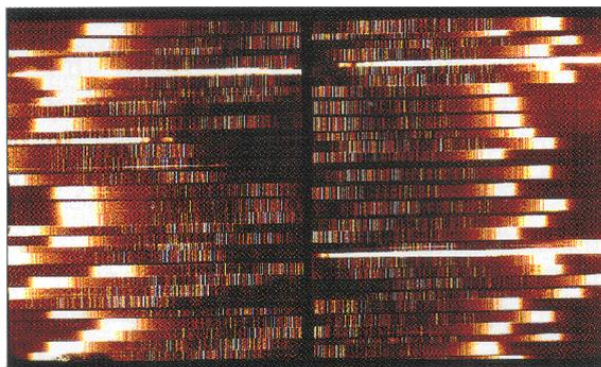
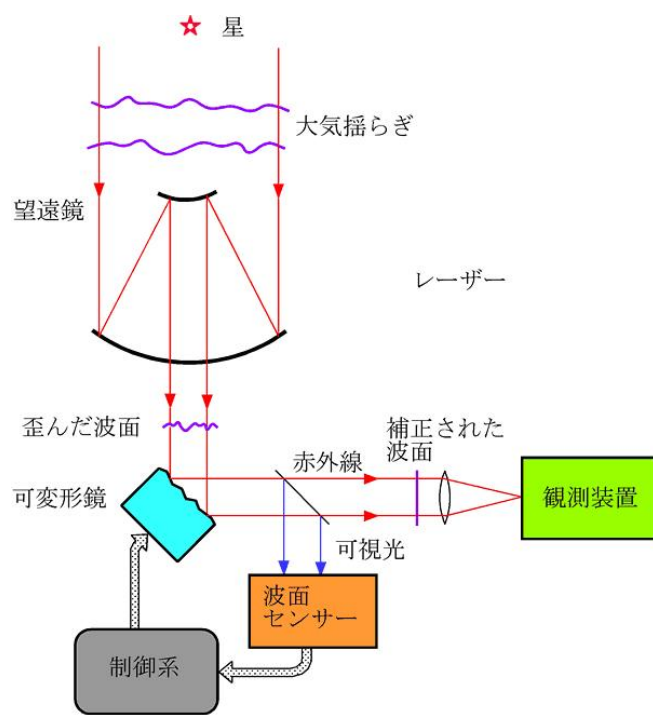


図 2.17: 分光データ (57 天体)

を一点に集中させることによって今までは暗くて画像を撮ることしかできなかった天体を、分光まですることができるようになりました。AO は、大気のゆらぎをモニターする波面センサーと、そのゆらぎを打ち消す可変形鏡からなり、非常にシャープな星の像を得ることができます。

この装置はカセグレン焦点に装着されています。

図 2.18 のように、観測した波面の曲率を「波面センサー」を使って測定します。そして制御システムを通して「可変鏡」に補正をかけます。可変鏡は 36 個のアクチュエーターで制御されます。このシステムを用いると、波長 2.2 ミクロンの赤外線観測した場合、解像度の面では大気のゆらぎがほぼ完全に克服された画像を得ることができます。



補償光学系の概念図

図 2.18: 補償光学系の概念図

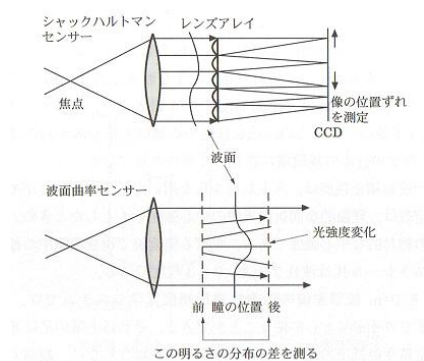


図 2.19: 波面センサーの原理

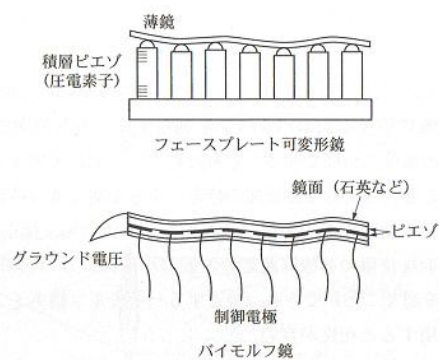
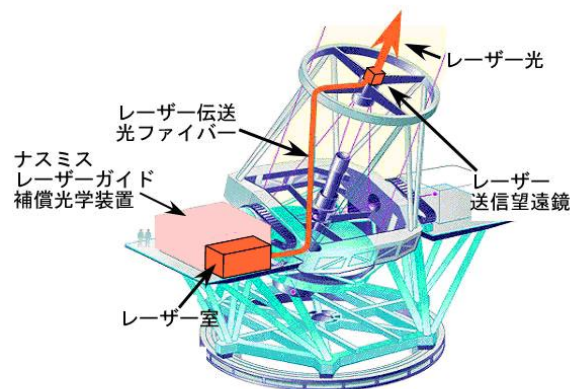


図 2.20: 可変形鏡

補償光学を使用するためには観測天体周辺にガイド星がなくてはなりません。図 2.21 はすばる望遠鏡に搭載するレーザーガイド星を生成するシステムです。任意の方向にレーザーガイド星を作ることによって、観測可能視野割合を大幅に拡大することができます。レーザー本体は環境の安定したレーザー室に格納され、レーザー伝送用光ファイバーもしくはレーザー伝送用光学系を用いて、望遠鏡副鏡の裏側に設置したレーザー送信望遠鏡まで伝送され、空へレーザーを照射する構成になっています。このシステムは、望遠鏡先端からレーザーを照射してガイド星を人工的につくることを可能にします。



(c) 遠藤孝悦

図 2.21: レーザーガイド星生成システム

原理としては、望遠鏡の先端からレーザー光 (589nm) を上空 90km、厚さ 10km にあるナトリウム層に照射します。レーザーによりナトリウム層が励起発光して、ほぼ 10 等星相当の人工星を作ることができます。これによりほぼ全天の天体に補償光学を利用できるようになりました。

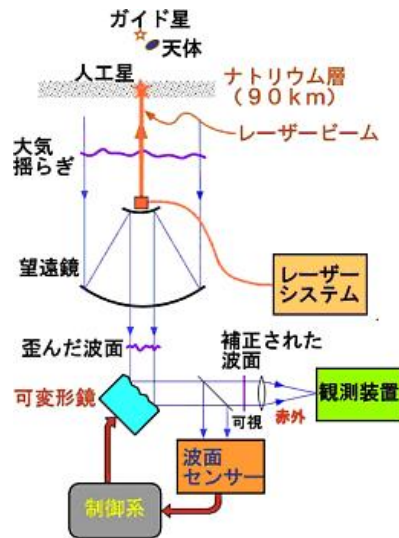


図 2.22: レーザーガイド補償光学の原理図

2.1.4 すばるが世界をリードしている研究

前章までのように、すばる望遠鏡の観測装置にはそれぞれがオリジナルの特徴を持っていることが分かりました。これらの観測装置の特徴を活かして、すばるが世界をリードしている研究について観測装置の使用例をあげてみます。

- 遠方宇宙の観測

1. Suprime-Cam の広視野観測で多数の天体を観測
2. 多数の天体を短時間で分光できる FOCAS
 - － これらにより遠方銀河の発見！
 - － 遠方銀河のベスト 10 のうち 9 個がすばるでの観測である

- 系外惑星の観測

1. CIAO から HiCIAO へ→他の望遠鏡に負けないための性能アップ
2. 補償光学を用いる
 - － 系外惑星直接観測と原始惑星系円盤の観測目指す。
 - － 2008-2012 年で 100 夜を提案中 (SEEDS プロジェクト)

2.1.5 まとめ

光学望遠鏡を用いた研究では、「撮像観測装置」、「高分散の分光観測装置」、「高感度の低分散分光観測装置」の基本3装置がそろっている必要がありました。すばる望遠鏡では、基本3装置の代表的な装置として

1. 撮像装置 → 「Suprime-Cam」
2. 高分散分光装置 → 「HDS」
3. 低分散分光装置 → 「FOCAS」

があげられます。この他にも、すばるには第一線で活躍する装置があり、それぞれがオリジナルの特徴を持っていることを知ることが出来ました。

2.1.6 次世代の装置

最後に、次世代の観測装置として現在開発中の装置を紹介します。

- FMOS (Fiber Multi Object Spectrograph)
 - － ファイバー多天体分光器 (FMOS) は主焦点の広視野 (30 分角) 中で 400 個の天体を近赤外で同時分光することができる国立天文台・京大・英・豪で共同開発中の装置です。これは、星団中の褐色矮星や遠方銀河・クエーサーなどを統計的に研究するときに威力を発揮します。
- Hyper Suprime-Cam
 - － 2048 × 4096 画素の CCD を 116 個使用した 9 億 7300 万画素の CCD カメラで、アンドロメダ銀河の全貌を一回の撮像で得ることができます。Suprime-Cam の 10 倍の視野を持つため、現在まで存在する観測装置としては最大の視野になるでしょう。

これらの装置には今後の活躍に大いに期待したいです。

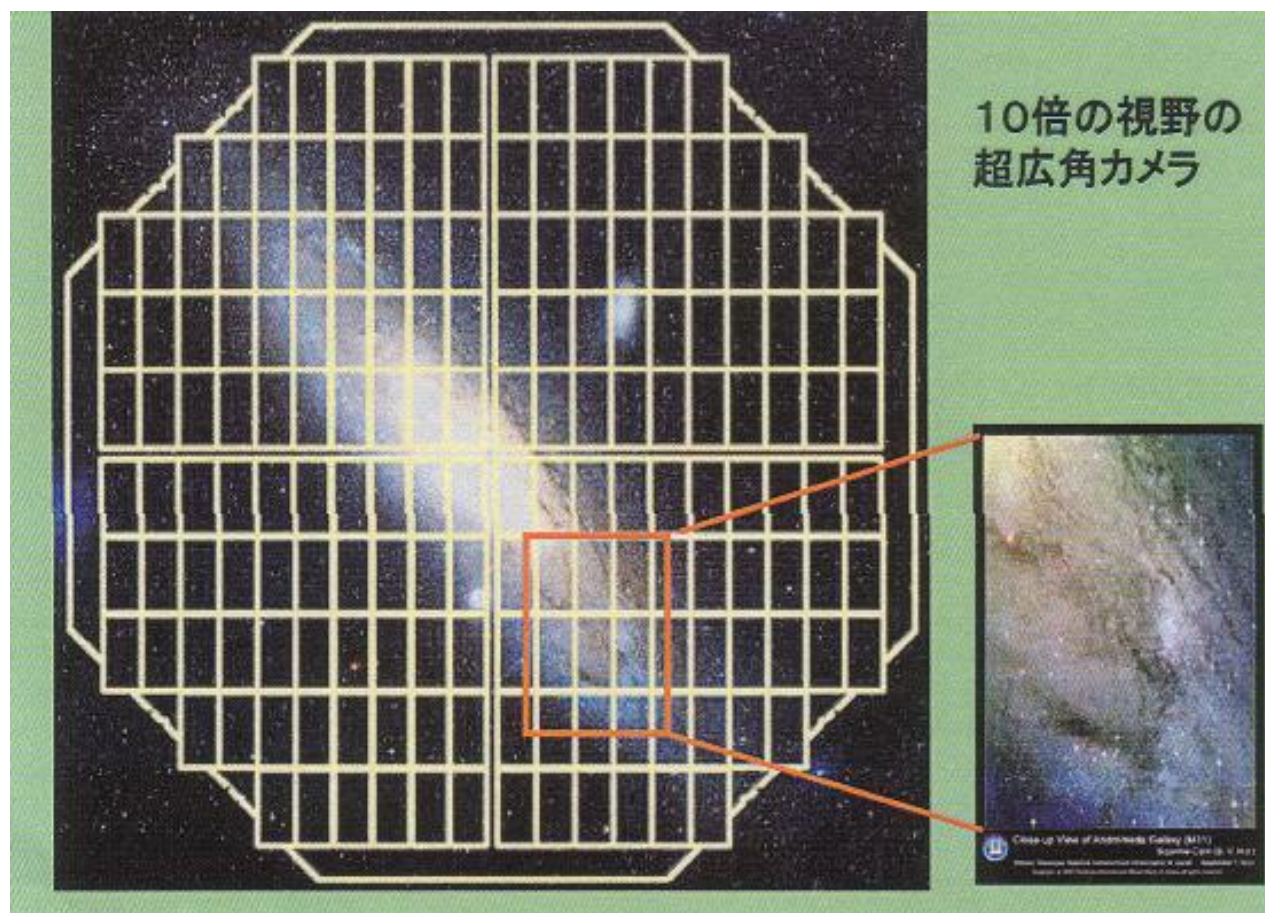


図 2.23: 10 倍の視野の超広角カメラ

Photo & Figure : all credits for NAOJ

第3章 すばる望遠鏡の観測成果(銀河系内)について

担当

東邦大学理学部物理学科4年
アルビレオ



東邦大学理学部物理学科4年
ボルックス



3.1 すばる望遠鏡による系外惑星の発見について

すばる望遠鏡による銀河系内の観測だけでもこれまで非常にたくさんの成果を上げてきた。その中で今回私が注目したのは、すばる望遠鏡による系外惑星発見についての観測成果である。今回紹介するのは、すばるにとって初の系外惑星の発見となった HD149026b の観測についてである。観測によって、この惑星は今までの惑星形成の理論からは想像できないほどの巨大なコアを持つことがわかり、この発見によって惑星の形成理論は見直されることとなった。

3.2 系外惑星とは？

系外惑星とは正確には太陽系外惑星といい、太陽以外の恒星を回る惑星のことである。しかし、厳密な定義は存在されていない。1995 年に Mayor と Queloz によって最初の発見がなされて以来、太陽に似たスペクトル型をもつ他の恒星の周りに、惑星が次々と発見され始めた。現在までに 300 個以上の系外惑星が発見されていて、一年あたりの発見数も年々増加している。

今回注目する系外惑星 HD149026b はヘラクレス座の太陽型恒星 HD149026 の周りを回っているものである。

3.2.1 系外惑星の種類

これまでに発見された系外惑星は大きく分けて 3 タイプに分けられる。どれも太陽系には当てはまらないものである。

- ホットジュピター
- スーパーアース
- エキセントリック・プラネット

ホットジュピターは恒星の極めて至近距離を公転する木星型の惑星（巨大ガス惑星）のことである。恒星に近いことから、この惑星は高温にさらされていると予測される。そのため、ホットジュピターと呼ばれるようになった。系外惑星の第一号となったペガスス座 51 番星を公転するベレロフォンもこのホットジュピタータイプである。

スーパーアースとは惑星の大きさが地球の数倍～10 倍程度の岩石惑星のことを指す。巨地球型惑星とも。系外惑星の探査では後で詳しく述べるがドップラーシフト法の観測が主流である。そのため、その方法で見つかりやすいホットジュピタータイプの惑星が数多く発見されてきた。しかし、観測精度の向上にともないホットジュピターより小型の惑星も発見されるようになってきた。地球の数

倍程度の質量の惑星は水素・ヘリウムのガスを拘束するだけの重力がない。そのため岩石や氷の表面を持つ地球型惑星に類似していると考えられている。

エキセントリック・プラネットとは極端な楕円軌道を公転する惑星のことをいう。現在発見されている系外惑星の内、半数以上はこのエキセントリック・プラネットであるとされている。

3.2.2 N2K プロジェクト

N2K プロジェクトは、日本、アメリカ、チリの日文学者による系外惑星観測計画で、すばる、ケック、マゼランなどの8メートル以上の大口径地上望遠鏡を使い、2000個の恒星 (Next 2000(2K)) を観測し、数十個以上のホット・ジュピター (軌道半径が小さい系外惑星) を発見しようという国際的観測計画のことである。今回の観測もこのプロジェクトの一環として行なわれた。

3.3 系外惑星の観測方法

惑星は恒星のように自身で光ることが出来ないため、望遠鏡で直接とらえることは極めて困難である。今のところ直接観測によって存在が確認された系外惑星は一つもない。よって、現在発見されている系外惑星はすべてその惑星が回っている恒星の観測によって間接的に存在が確認されたものである。系外惑星発見の主な観測方法は

- ドップラ - シフト法 (惑星による恒星のふらつきの速度を測定する方法)
- トランジット法 (惑星が恒星の前を通過する際の光量変化を観測する方法)
- アストロメトリ法 (惑星による恒星の位置の変化を測定する方法)
- MACHO (惑星による重力レンズ効果を使う方法)

などである。

アストロメトリ法は古くから伴星発見などにも用いられている方法で、恒星からの距離が遠いほど探しやすいという特徴があるが、探査の主流がこの方法であったときには、系外惑星は見つからなかった。

これまでに見つかった系外惑星のほとんどはドップラー・シフト法によって発見されている。トランジット法はドップラーシフト法と共に用いられることによってよりたくさんの惑星の物理量見積もることが出来る。

3.4 ドップラーシフト法

ドップラーシフト法とは、主星の視線方向の速度変化による、スペクトル線のドップラーシフトを検出する方法である。図 3.1 にその原理図を示す。恒星と惑星の関係は、恒星の周りに惑星がまわっているのではなく正確には両者は質量中心の周りを回っている。よって、恒星もわずかではあるが惑星により周期運動をしている。この運動により恒星からのスペクトルもわずかに変化するので、このスペクトルの時間変化を観測する。

このスペクトルの観測をすばる望遠鏡のHDSによって観測し、系外惑星 HD149026b の存在を発見した!! (HDS による観測精度は 1m/s オーダーの速度変化を捉えられる程度) またこの観測には KECK 望遠鏡も協力している。図 3.2 に実際の観測データを示す。具体的には、変動の周期 T からケプラーの第 3 法則より惑星の軌道長半径 a が

$$T = \frac{2\pi a^{3/2}}{(GM_{star})^{1/2}} \quad (3.1)$$

$$a = \left[\frac{GMT^2}{(2\pi)^2} \right]^{1/3} \quad (3.2)$$

により求まる。ここで M_{star} は恒星の質量を表わす。ここでは惑星質量 M が恒星質量 M_{star} に対して十分に小さなものであると仮定している。またこの視線方向速度の変化曲線の形から、軌道の離心率 e を推測できる。曲線が $\sin$ カーブに近ければ軌道は円軌道に近いということになる。さらに、軌道半径 a と変動の振幅 K から惑星の質量 M が $M \sin i$ の形で求まる。この i は図 3.3 に示すような地球から見た視線方向に対する惑星の公転面傾斜角である。この角度はドップラーシフト法では分からないため惑星質量の下限までしか求められない。これがドップラーシフト法の最大の欠点である。

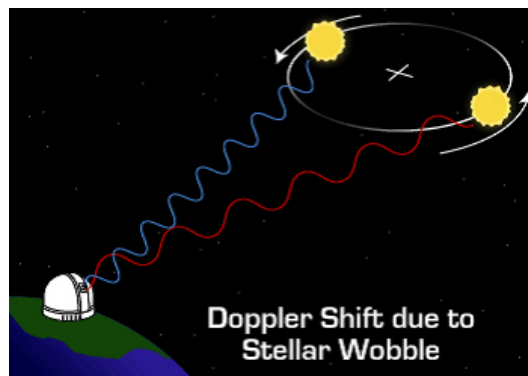


図 3.1: ドップラーシフト法の原理図 (JPL PlanetQuest)

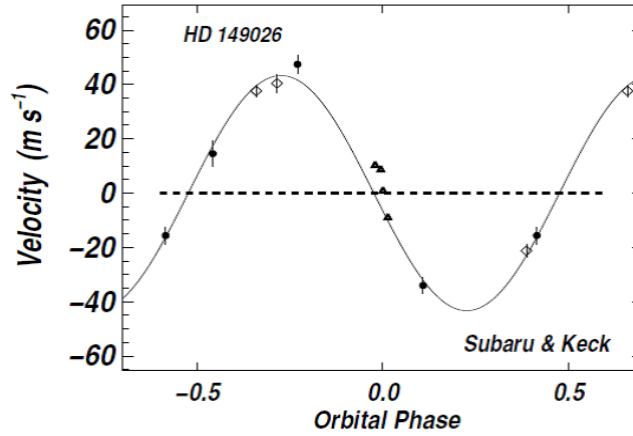


図 3.2: 実際の観測データ (Bun 'ei Sato et al.2005)

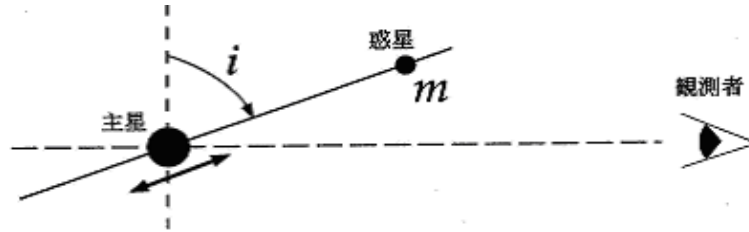


図 3.3: 惑星の軌道面と視線方向の法線の成す角度の模式図 (惑星地質ニュース vol.13)

3.5 トランジット法

トランジット法とは、惑星が恒星面を通過すると、見かけ上恒星の光度が減少する(減光)。この減光を観測することによって惑星を検出する方法である。図 3.4 にその原理図を示す。

減光率を μ 、恒星の光度を L 、恒星と惑星の半径を R_{star} 、 R とし、恒星の表面温度を T とするとシュテファンボルツマンの法則より

$$\mu = \frac{L - \Delta L}{L} = \frac{\pi R_{star}^2 \sigma T^4 - (\pi R_{star}^2 - \pi R^2) \sigma T^4}{\pi R_{star}^2 \sigma T^4} = \left(\frac{R_{star}}{R} \right)^2 \quad (3.3)$$

となり、恒星と惑星の半径の比となっている。これから惑星の半径がもとまる。さらに、トランジット現象が起こっていない時の恒星のスペクトルと、トランジット現象が起こっている最中の恒星のスペクトルとの差分を取ることで惑星大気の吸収線を検出でき、そこから大気成分を推測することも出来る。

トランジット法は 惑星新発見の 方法としてだけでなく、すでに ドップラーシフト法で 見つかっている 系外惑星に対しても大変有効な情報を得る。なぜなら、トランジット法による観測が出来るということは、ドップラーシフト法によって

不確定とされていた視線方向に対する惑星の公転面傾斜角 i が決まり、これにより惑星の密度が求まる。図 3.5 に実際の観測データを示す。

ちなみに、このトランジット現象の観測はフェアボーン天文台によって行なわれた。

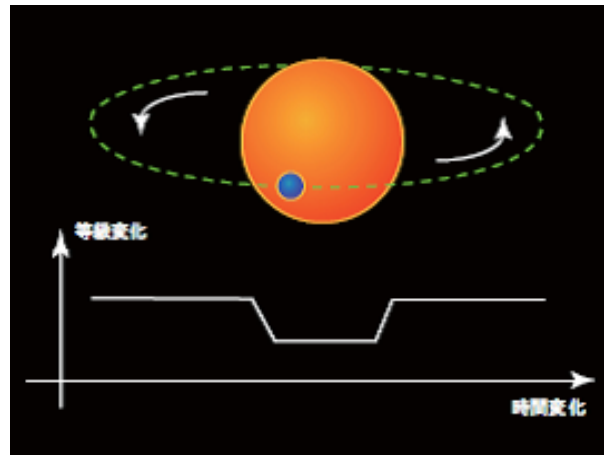


図 3.4: トランジット法の原理図 (星ナビ.com より)

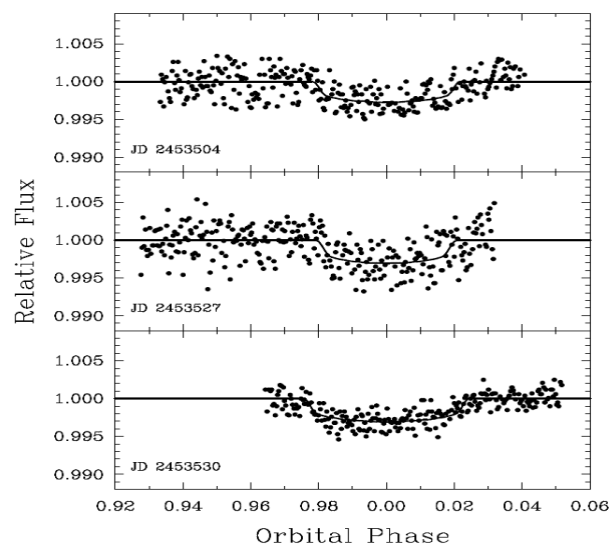


図 3.5: トランジット法による実際の観測データ (Bun 'ei Sato et al.2005)

3.6 観測結果

これら 2 つの観測方法によって、この惑星 HD149026b は今までの惑星形成の理論を覆すような型破りな天体だということがわかった。表 3.1 に今回の観測によって得られた系外惑星 HD149026b の情報を示す。

この観測結果から、この惑星の大きさは土星と同じくらいか少し小さいくらいで、密度は木星とたいして変わらないが土星より 2 倍近くも大きい。さらに観測からこの惑星には重元素が多く含まれていることが示唆されている。このことから、惑星のモデルを岩石のコアに水素とヘリウムの外層部をもつというものにしてしまうと、この惑星のコアの大きさが地球の 70 倍近くも必要であるという計算結果が導かれた。

今までの惑星形成の理論では、円盤ガスの流入が始まってから惑星に落ち込んだ微惑星は、水素・ヘリウムの外層部に融けこむため、コア質量があまり増大しないとされてきたので、コアの質量は地球の 30 倍が限度とされてきた。これによって、今まで支持されてきた惑星形成の理論が見なおされる動きが出てきた。

なぜこのような惑星が出来たのか、惑星形成の理論が間違いなのか、惑星形成後に何かあったのか、この惑星だけが特別なのか、地球のような惑星は他にもあるのか。これらの疑問を解決するためには、もっとたくさんのより精度のよい観測データが必要になってくる。

すばる望遠鏡が初めて発見した系外惑星は幸運にも巨大なコアを持つ新しいタイプの惑星であった。すばるはその後、新たな系外惑星の発見だけでなく、原始惑星系円盤の観測など、数ある疑問を解決するために働いている。

Parameter	HD149026b	木星	土星
質量 (M_{Jup})	0.36	1.0	0.29
半径 (R_{Jup})	0.72	1.0	0.84
軌道半径 (AU)	0.046	5.2	9.55
公転周期 (day)	2.87	4335	10756
コアの質量 (地球比)	70 倍	10 倍以下	8 ~ 15 倍

表 3.1: 観測によって得られた HD149026b の値

3.7 超新星残骸カシオペヤ A の可視光の「こだま」を解説

3.7.1 カシオペヤ A とは …

超新星残骸の一つで、カシオペヤ座にある。地球からカシオペヤ A までの距離は、約 11,000 光年ある。

私たちの銀河系の中で最も若い超新星残骸である。太陽系外の電波源としては最も電波強度が強い (1GHz の波長域がある) 天体である。

3.7.2 こだまとは …

超新星爆発を起こした星は、中性子星となり、強い可視光を放射する。この星からの可視光が周囲にある塵を次々に暖めながら徐々に周縁部は伝搬していく現象である。簡単に述べると、音のこだまと同様に、光の「こだま」は光源から離れた場所にある物質によって反射・再放射された光の波が遅れて観測者に届く現象である。

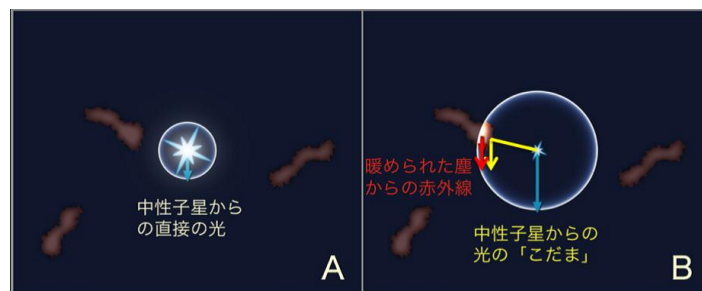


図 3.6: カシオペヤ A からの光の模式図。(A) 超新星爆発をした星は中性子星となり、光を放射する。(B) 中性子星からの光が周りにある塵に吸収されると、暖められた塵から赤外線が放射される (赤い矢印)。塵によって反射された光 (黄色の矢印) がこだまとして地球に到着する。

3.7.3 観測内容

銀河系の中で起きた最も新しい超新星爆発の一つである超新星残骸カシオペヤ A についての文献がほとんどない。そのため、超新星がどのくらいの期間、どのくらいの明るさで輝いていたのか、どのような種類の超新星爆発だったのか、謎のままである。カシオペヤ A のもとになった超新星爆発は現在の膨張速度から逆

算すると 1680 年ごろに起きたとされているが、地球から近傍での大爆発だったにもかかわらず観測記録がないことが不思議だった。

そこで …

2006 年に、マックスプランク天文学研究所、国立天文台、アリゾナ大学シュワード観測所の研究者からなるグループは、すばる望遠鏡の微光天体分光撮像装置 (FOCAS) を使って、カシオペヤ A が爆発時に放射した可視光の「こだま」を分光観測した。

「こだま」を観測する理由は、カシオペヤ A からの「こだま」は 300 年遅れて現在の地球に届いている。この光は爆発当時の光である。よって、この光を観測することでカシオペヤ A の誕生の謎を解く手がかりがあると思われる。

3.7.4 観測結果

いつどこで発生するか分からない「こだま」を待ち続けること 1 年余り、NASA により打ち上げられたスピッツァー宇宙望遠鏡による赤外線での定期観測 (図 3.7)、スペイン CalarAlto2.2m 望遠鏡を使った可視光での広視野モニタリング (図 3.8) の結果、分光可能かもしれない「こだま」を確認した。

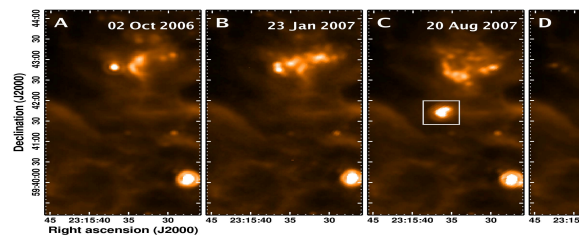


図 3.7: スピッツァー望遠鏡による赤外線画像。(C の四角中に「こだま」を探す道しるべを発見)

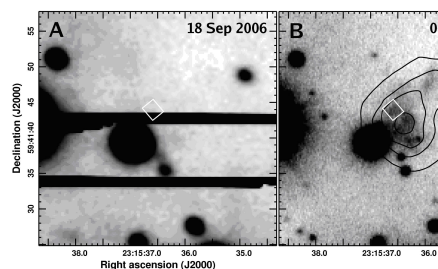


図 3.8: 観測された可視光 R バンドの画像。(A & C) スペイン CalarAlto2.2m 望遠鏡による観測 (B) すばる望遠鏡による観測。等高線は、赤外線の強さを表し、内部に見える淡い光が「こだま」と推測された。

2007 年 10 月すばる望遠鏡の FOCAS は、「こだま」の候補を確認 (図 3.9) し、分光観測に移った。

得られたスペクトルには、超新星特有のスペクトル線がはっきりと現われていた。過去に起こった超新星の観測結果と比較したところ、この光の「こだま」は SN1993J¹ という超新星のスペクトルとかなり良く似ていることが分かった。これは、カシオペヤ A のもととなった星が、太陽質量の 10 倍を超える赤色超巨星であったことを意味し、その生涯の最後に b 型の超新星爆発を起こしてカシオペヤ A を形成したという証拠となった (図 3.10)。

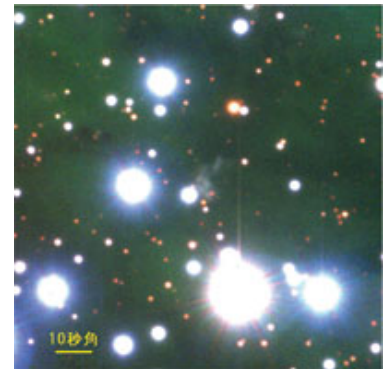


図 3.9: カシオペヤ A のカラー合成図。中心の白い光が「こだま」である。

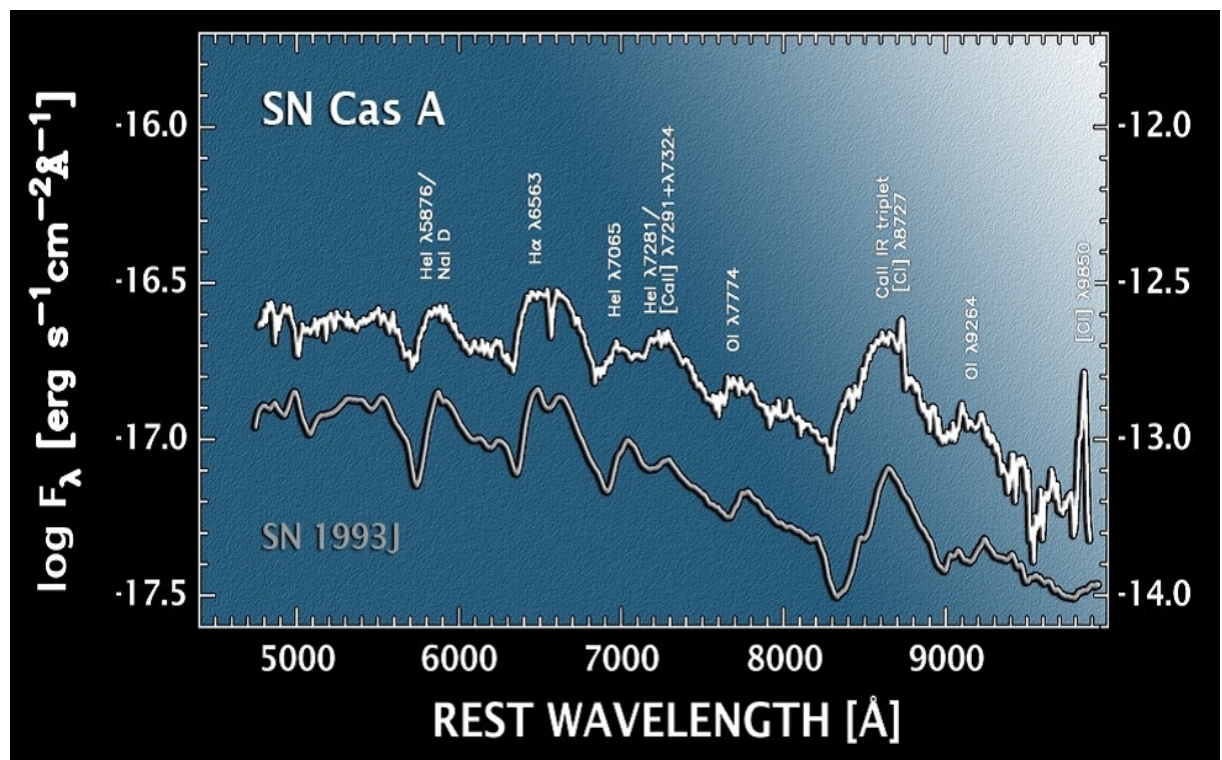


図 3.10: 可視光の「こだま」のスペクトル。

¹SN1993J とは … 大熊座にある銀河で 1993 年に発見された超新星 b 型超新星爆発とは … 進化の進んだ大質量星の表面 (外層) が伴星によって剥ぎ取られた状態で重力崩壊型の超新星爆発をおこしたものと考えられている

3.8 月のクレーターの起源

3.8.1 観測内容

今から約 40 億年前の時期には地球型惑星上に集中的な天体の落下が数千万年から数億年にわたり継続していたとされ、「後期重爆撃期」と呼ばれている。後期重爆撃期を発生させた原因、及びその時期に落下してきた天体が小惑星だったのか彗星だったのかあるいわ他の天体だったのか、等については明確な結論は得られていない。

そこで …

月や惑星上にあるクレーターのサイズ頻度分布に着目し、クレーターのサイズ分布を現在の小惑星のサイズ分布と比較した。クレーターのサイズ頻度分布はクレーターを作った衝突体のサイズ分布を反映していて、それは衝突体の起源に関する情報になる。クレーターのサイズ分布を詳しく調べることによって、その衝突体がどのような機構によりやってきたかに関する重要な情報を得ることができる可能性がある。

基礎データであるメインベルト小惑星のサイズ分布に関しては、すばる望遠鏡を用いたサーベイ観測によるデータを用いた。

3.8.2 観測結果

クレーター衝突体のサイズ分布を現在の小惑星のサイズ分布と比較したところ、後期重爆撃期に形成されたとされる古いクレーターを作った衝突天体は広いサイズ領域にわたって現在の小惑星とほぼ等しいサイズ分布を持っていることが分かった。これは、後期重爆撃期に形成された古いクレーター衝突体は、火星と木星の間にあるメインベルト領域から来た小惑星であろうと予想できることを示している。さらに、火星に多くみられる後期重爆撃期よりもかなり若い(新しい)クレーターを作った衝突天体のサイズ分布は小惑星ではなく現在の近地球小惑星のサイズと良い一致を示していた。(図 3.11)。この結果より、若いクレーターを作った衝突体をメインベルトから月や惑星の表面に輸送した過程が後期重爆撃期にメインベルトから運んできた輸送過程とは異なるものだと示すと思われる。

最後に、40 億年前のクレーター衝突体と現在のメインベルト小惑星のサイズ分布を比較していることから、これらがほぼ一致しているという結果が事実ならばメインベルト小惑星帯では過去 40 億年間小惑星同士の衝突進化によるサイズ分布の変化が全く生じていないことになる。

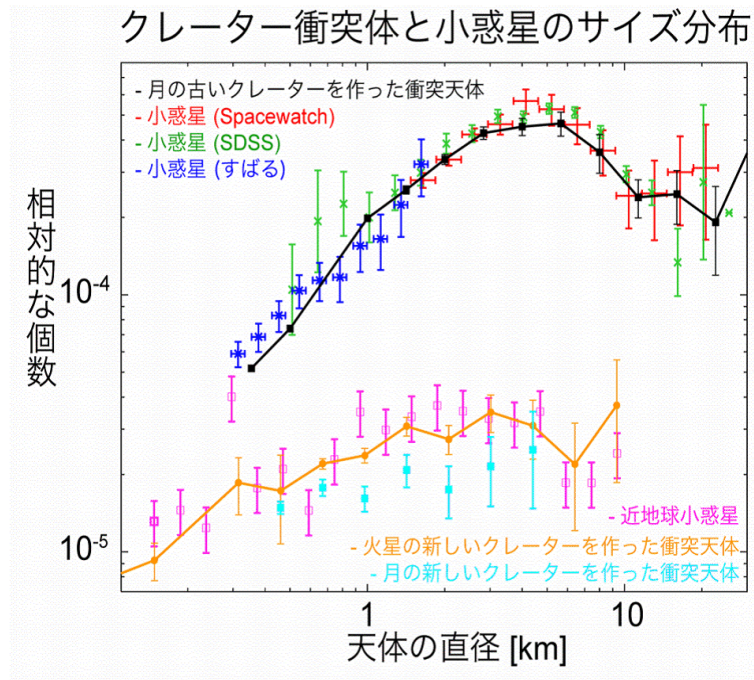


図 3.11: クレーター衝突体と小惑星のサイズ分布

参考文献

- [1] すばる望遠鏡の宇宙ハワイからの挑戦 海部宣男 岩波新書
- [2] すばる望遠鏡 web ページ http://subarutelescope.org/j_index.html

第4章 すばる望遠鏡の観測成果(銀河系外)について

担当

東邦大学理学部物理学科4年
シリウス



東邦大学理学部物理学科3年
プロキオン



4.1 すばる望遠鏡による遠方宇宙の観測

すばる望遠鏡は、我々から遠く離れた宇宙の姿も多くとらえてきた。その一部を見てみよう。

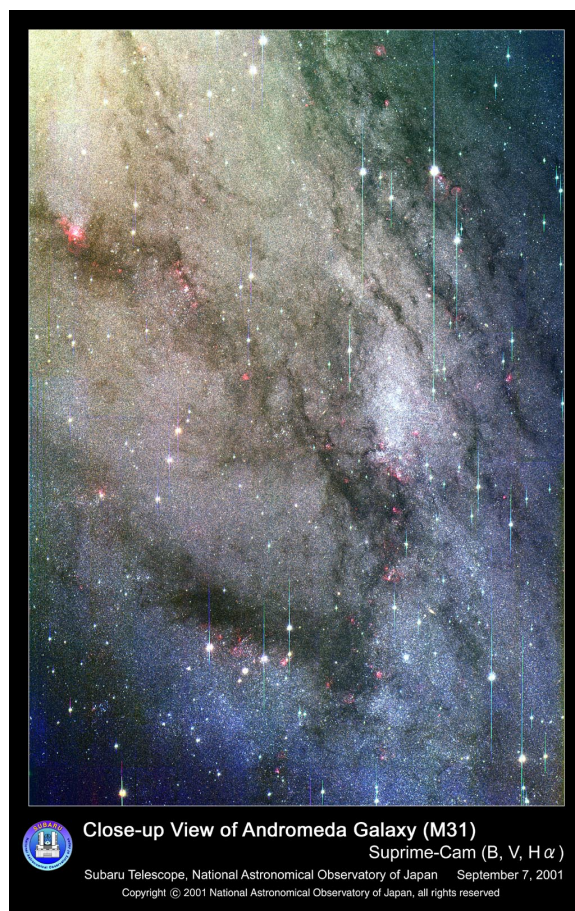


図 4.1: M31(国立天文台提供)

図 4.1 は、すばる望遠鏡の主焦点カメラ (Suprime-Cam) が捉えた、アンドロメダ銀河 (M31) の一部分の画像である (2001 年 9 月 7 日公表)。M31 は、我々から約 250 万光年の距離にある渦巻銀河で、我々の銀河系もこれと似た構造をしていると考えられており、すばる望遠鏡を用いると、広い領域にわたって非常に鮮明な画像を得ることができる。また、これまで分解することができなかった暗い星や星団、星雲を写し出すことができる。このような観測データを詳しく調べることで、銀河内における星の形成や進化の謎を解明する手がかりが得られる。

M31 の星の色が中心部から外側に向うにつれて黄色から青色に変化していく様子から、M31 の中心部は老いた星の割合が多く、外側に向うほど若い星の割合が多くなっていくことが分かる。



図 4.2: NGC2403(国立天文台提供)

図 4.2 は、すばる望遠鏡の主焦点カメラ (Suprime-Cam) が捉えた、NGC2403 の画像である (2005 年 10 月 13 日公表)。NGC2403 は、我々から約 1000 万光年の距離にある、渦巻銀河 (Sc 型) である。渦巻き腕には、活発に星生成を行う赤色の領域 (H α 領域) や青色の若い星の群 (OB Association)、ダストによる暗黒帯が見える。銀河全体の画像として、これほど鮮明な画像を得たのは初めてのことだったという。この画像に写っている星の色と等級を調べることで、銀河の衝突合体の痕跡を検出する試みがなされている。

NGC2403 は、Hubble の法則¹や Tully-Fisher 関係²の根拠となるなど、天文学の歴史上で重要な役割を果たしてきた銀河である。

¹天体が我々から遠ざかる速さとその距離が正比例するという法則。Edwin Hubble らによって定式化された。

²円盤銀河の絶対光度とその回転速度の 4.5 乗に比例するという関係。Tully と Fisher によって発見された。

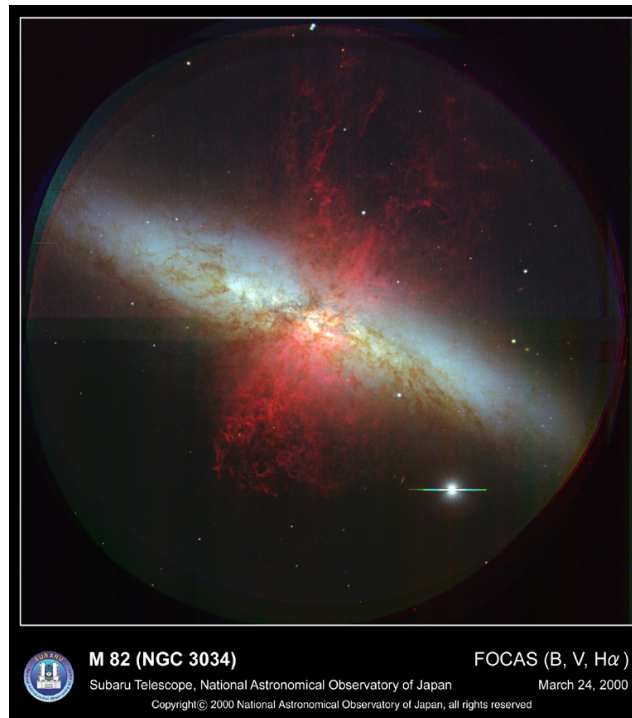


図 4.3: M82(国立天文台提供)

図 4.3 は、すばる望遠鏡の微光天体分光撮像装置 (FOCAS) を用いて撮像した M82 の画像である (2000 年 3 月 24 日公表)。M82 は、我々から約 1200 万光年の距離にある不規則銀河である。銀河に垂直な方向に広がる赤いフィラメント状の構造は、電離した高温の水素ガスが放つ $H\alpha$ 線 (中心波長 6563 nm) によるものである。これは、M82 の中心部における活発な星生成や超新星爆発により、電離した高温の水素ガスが銀河の外まで噴出したものと考えられており、「スーパーウィンド」と呼ばれている。この現象の研究は、銀河の進化や銀河間空間のガス組成などを理解する手がかりになると考えられている。

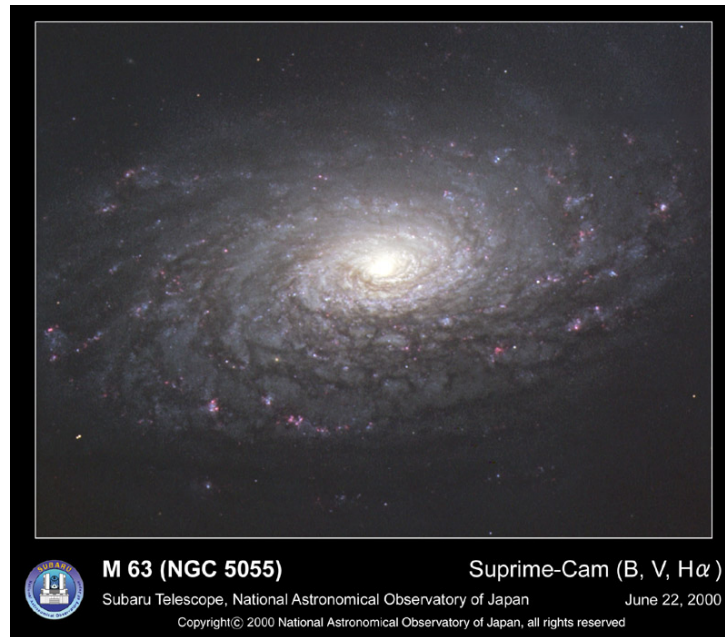


図 4.4: M63(国立天文台提供)

図 4.4 は、すばる望遠鏡の主焦点カメラ (Suprime-Cam) が捉えた、M63 の画像である (2000 年 6 月 22 日公表)。M63 は、我々から約 2400 万光年の距離にある「ひまわり銀河」という愛称の渦巻銀河である。Suprime-Cam の画像では、きつく巻いている渦の構造や、高温の星に照らされて電離した水素が赤く輝く領域 (H α 領域) が写し出されている。

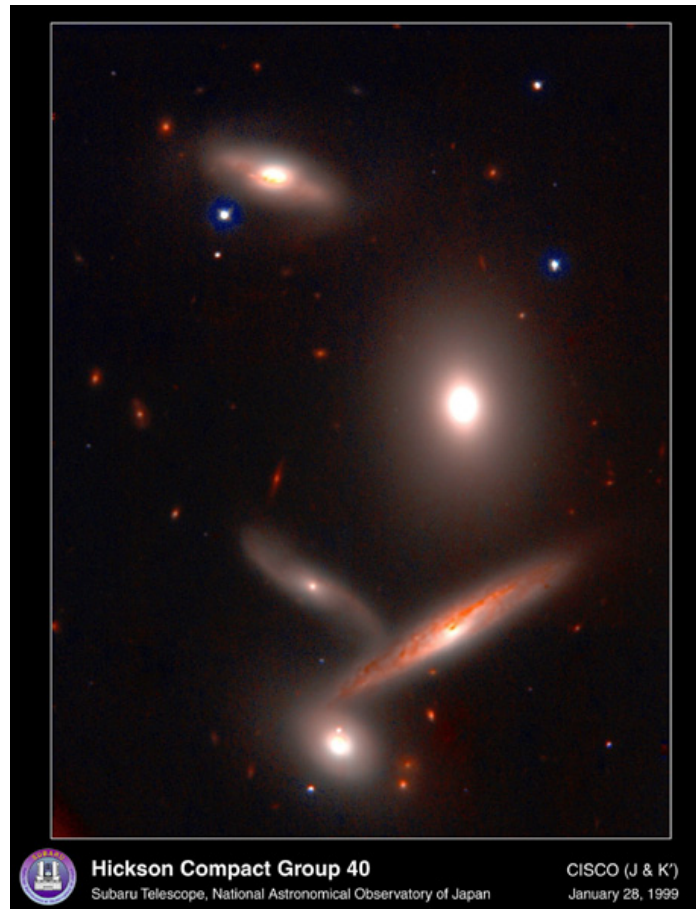


図 4.5: HCG40

図 4.5 は、すばる望遠鏡の近赤外線カメラ (CISCO) によって捉えられた、ヒクソン・コンパクト群 40(HCG40) の画像である (1999 年 1 月 28 日公表)。HCG40 は、我々から約 3 億光年の距離にあるコンパクト銀河群である。画像では、上から順に渦巻銀河、楕円銀河、2 つの渦巻銀河、レンズ状銀河の 5 個の主要メンバーが、接近し合っている。コンパクト銀河群は、宇宙年齢と比べてはるかに短時間で、重力相互作用によりメンバー銀河どうしが衝突合体し、1~2 個の大きな銀河を形成する。

HCG40 の背景には、さらに数十億光年彼方にある銀河が、赤方偏移のために赤い斑点のようになって見えている。

宇宙で遠く of 天体を観測することは、過去の宇宙の姿を見ることになる。

4.2 すばる望遠鏡による最遠宇宙の観測

すばる望遠鏡は約 130 億光年彼方の銀河や銀河団を続々と発見している。つまり、約 130 億年前の宇宙の姿をとらえているのである。当時は宇宙の初期であり、宇宙で最初の銀河や銀河団が形成されていく時期にあたる。この時期に銀河や銀河団はどのように形成されてきたのか。そして、この後どのような進化をとげて、現在の構造が出来上がっていくのか。このような多くの謎にすばる望遠鏡は挑んでいる。

4.2.1 最遠の銀河団

すばる望遠鏡は、主焦点カメラ (Suprime-Cam) によって 34 分角 $\times$ 27 分角という広い視野を一度に撮像できる。さらに、高い分解能を持つ。2005 年、すばる望遠鏡はこの特長を活かし、これまで観測されてきた中で最も遠いところにある銀河団を発見した。赤方偏移は 5.7。この値は、この銀河団が我々から 127 億光年離れたところにあることを示している。

この発見は、くじら座の方角に Suprime-Cam を向け、127 億光年彼方の宇宙を幅広く見渡す (赤方偏移 5.7 で 1216 から 9210 程度にシフトしたライマン α 輝線を見つける) ことでなされた (図 4.6, 図 4.7)。この領域は、すばる/XMM-Newton Deep Survey 領域、略して SXDS 領域と呼ばれる。この領域で、差し渡し 180Mpc、奥行き約 40Mpc に及ぶ範囲に 515 個の銀河を見つけた。この範囲の銀河密度分布図を図 4.8 に示す。この分布図は、最遠の宇宙地図、つまり最古の宇宙地図と言える。

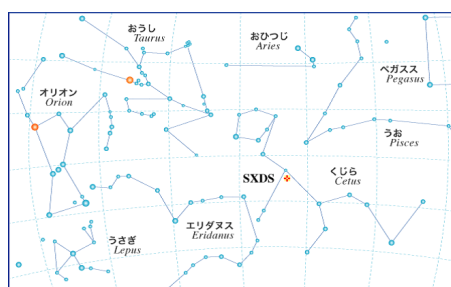


図 4.6: SXDS 領域 (国立天文台提供)



図 4.7: SXDS 領域 (Suprime-Cam)(国立天文台提供)

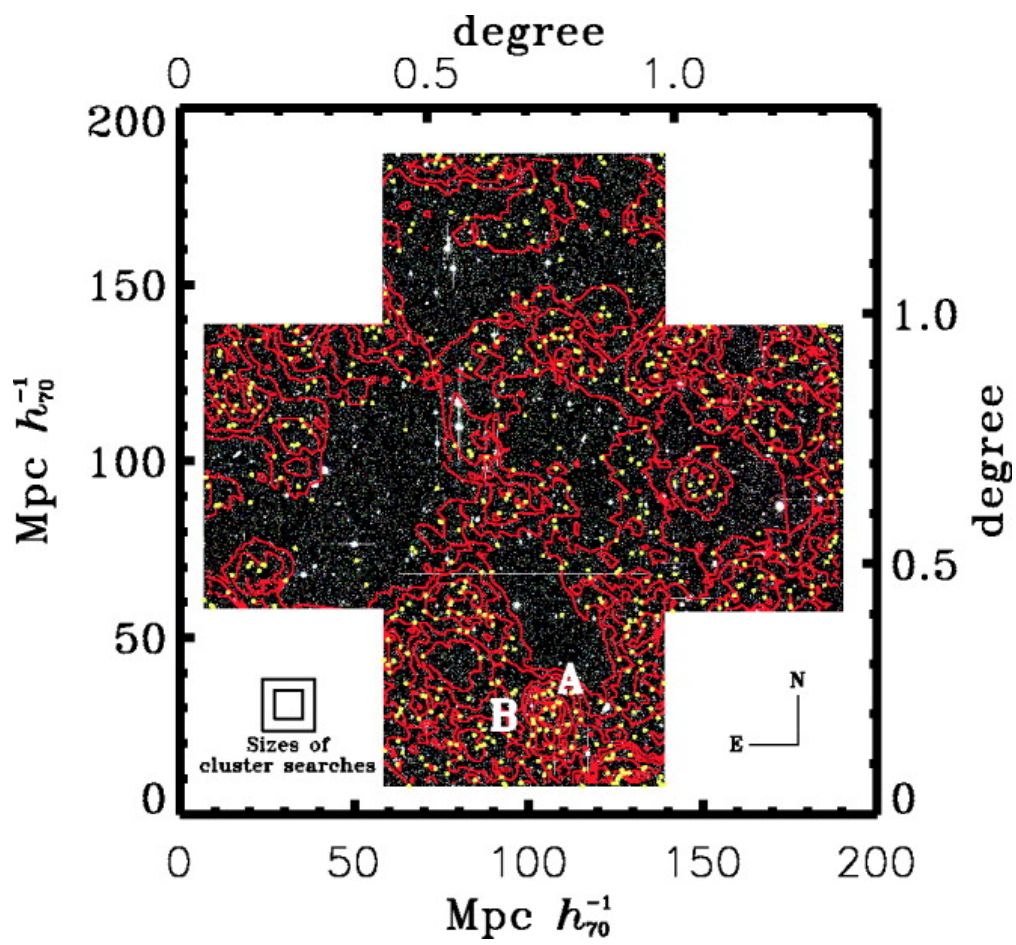


図 4.8: 最遠の宇宙地図 (Ouchi et al.(2005))

この宇宙地図の南側の領域は、とくに銀河密度が高い。この領域を微光天体分光装置 (FOCAS) で詳細に観測した結果、直径 1 Mpc の領域に、赤方偏移が 5.683 から 5.694 の間の 6 つの銀河が密集していた (図 4.9, 図 4.10)。まさにこれは、生まれたばかりの銀河団であり、現在見られるような巨大な銀河の集団へと成長していく最初の段階の姿であると考えられる。すばる望遠鏡は、銀河団の起源を明かす重要な手がかりを世界に先駆けてとらえた。

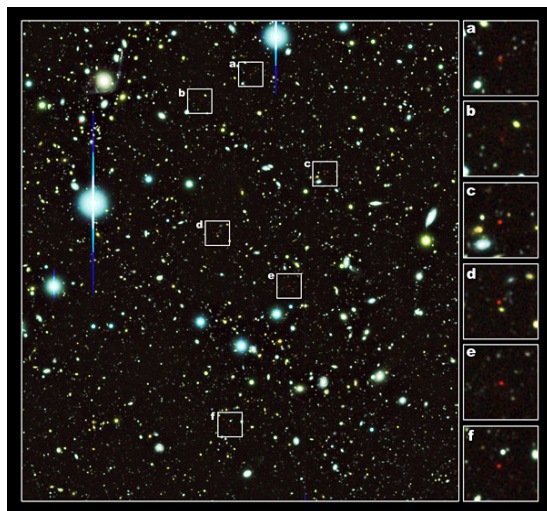


図 4.9: 最遠銀河団 (国立天文台提供)

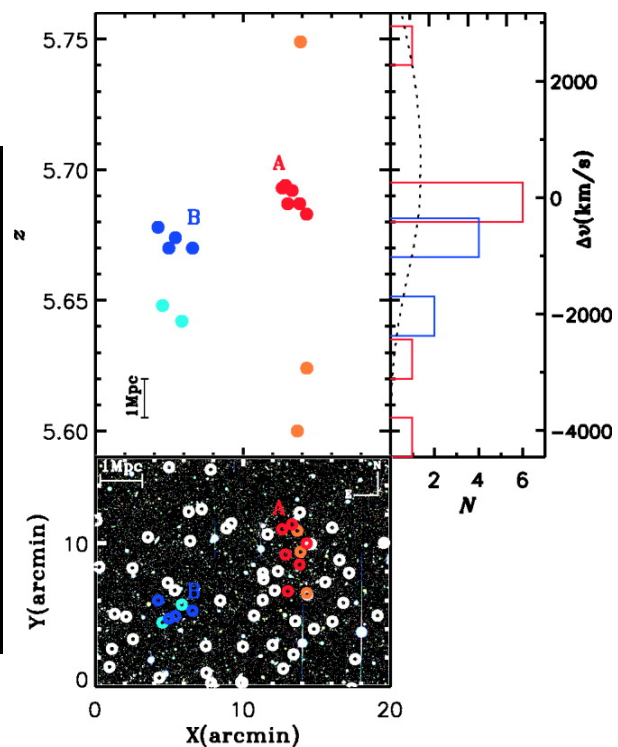


図 4.10: 最遠銀河団の赤方偏移 (Ouchi et al.(2005))

4.2.2 最遠の銀河

2006 年、すばる望遠鏡の主焦点カメラ (Suprime-Cam) と微光天体分光撮像装置 (FOCAS) により、今までの記録を塗り替える最遠の銀河候補が 2 つ発見された。

FOCAS による分光観測により、うち明るい方が赤方偏移 6.964 であり、距離約 128 億 8 千万光年の彼方にある銀河であることが確認された。これは、ビッグバンから約 7 億 8 千万年後の銀河の姿を観測したことになる (図 4.11, 図 4.12)。



図 4.11: 最遠の銀河 (国立天文台提供)

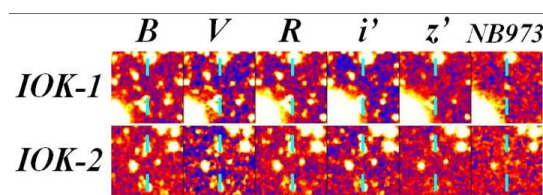


図 4.12: 2 つの最遠銀河候補 (国立天文台提供)

初期の宇宙の出来事

ビッグバン後約数億年間に宇宙で起きた出来事を簡単に説明する。約 137 億年前、宇宙は高温・高密度の火の玉として誕生した。これがビッグバンである。誕生直後の宇宙では、原子は原子として存在できなかった。 $T = 10^{13}(K)$ 以上で、原子は最も基本的な構成要素であるクォークに分裂している。時間が経過し、宇宙の温度が下がると、クォークはまとまって核子となり、 $T = 10^9(K)$ で原子核を形成する。これはまだイオン状態の原子であり、完全な原子ではない。 $T = 3000(K)$ 程度になってようやく原子核に電子が結合し、中性化する。このときまで光は束縛されていない電子などによって散乱され、直進することはできなかったが、このときを境に光が直進できるようになった。この中性化は、ビッグバンから約 38

万年後に起こったと言われ、これを「宇宙の晴れ上がり」という。これ以降の宇宙は光による直接観測で見ることができる。しかし、これ以前の宇宙の姿は、光による直接観測では見ることはできない。

晴れ上がり後、星や銀河が形成され始めたわけだが、これまでビッグバン後9億年以前の天体が観測されてこなかった。そのため、ビッグバン後約38万年から約9億年までの期間は「宇宙史の暗黒時代」と呼ばれてきた。理論によると、この期間には明るい星々が輝きだして、紫外線を出すことで宇宙が再び暖められ、「宇宙の再電離」が起こったとされている。しかし、正確にいつ起きたのかは分かっていない。宇宙の再電離の時期を観測的に確かめることは、宇宙の進化を解明する上での大きな課題であった。

ライマン α 輝線

最遠の銀河は、生まれたばかりの銀河である。こういった銀河の中では、一斉に星が輝きだすが、中でも質量の大きな星が輝き始めると紫外線を放出して周辺の(水素)ガスを電離する。そして、電離された水素ガスは、冷えていく過程の最後にライマン α 輝線を放出する。すばる望遠鏡では、最遠の宇宙でこのライマン α 輝線を放つ銀河を、一度に広視野を観測できるすばる望遠鏡の Suprime-Cam と FOCAS を用いて観測した。

ライマン系列：水素原子において励起状態 ($n \geq 2$) の電子が基底状態 ($n = 1$) へ遷移するとき放出する光の系列。波長の長い方からライマン α 、 β 、 γ 、と名前がつけられていく。

ライマン α 輝線：ライマン系列のうち、第1励起状態 ($n = 2$) からの基底状態 ($n = 1$) への遷移で放出される波長 $\lambda_{Ly\alpha} = 1216$ の光のこと。

赤方偏移 (ドップラーシフト)

光の速さは有限である。よって、遠くにある天体を観測するほど過去の宇宙を観測することとなる。さらに、宇宙は膨張しているので、初期に形成された銀河からのライマン α 輝線は地球へたどりつくまでに大きく赤方偏移を受けている。例えば、赤方偏移 7.0 の銀河が放つライマン α 輝線の波長は、9730 にドップラーシフトする。

最遠の銀河の観測

かみのけ座の一角をすばる深探査領域 (図 4.13) とし、この観測のために開発された 9730 に赤方偏移したライマン α 輝線のみ写る NB973 フィルターを用いて観測を行ったところ、冒頭でも述べたように、赤方偏移 7.0 の銀河候補が2つ発見され、うち1つが赤方偏移 6.964 の最遠銀河であることが確認された。今回の観測

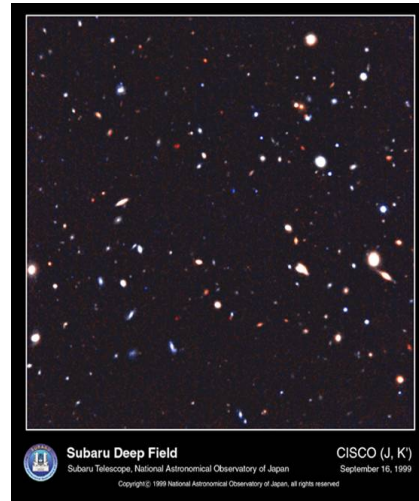


図 4.13: すばる深探査領域 (国立天文台提供)

では 41,533 個の天体を観測対象としたが、赤方偏移 7.0 の銀河は 1 つしか観測されなかった。同領域で赤方偏移 6.6 の銀河 (α 輝線の波長は、9210 にドップラーシフト) も NB921 フィルターを用いて観測されているが、その銀河数から推定される赤方偏移 7.0 の銀河数はもっと多いはずである。

赤方偏移 6.6 の時代と赤方偏移 7.0 の時代の間には約 6 千万年の差があるが、この間に、宇宙の様子が変化したことが示唆される。赤方偏移 7.0 の時代では多くの銀河がまだ成長途中であり、再電離が完了しておらず、赤方偏移 6.6 の時代には再電離が完了していた可能性がある。

また、水素が電離する温度は約 $10^4(K)$ である。すなわち再電離期の宇宙空間は高温状態であり、小さい領域に物質が集まりにくい状態、即ち小銀河が形成されにくい状態となる。当時の銀河は小銀河ではなかった。これは当時、小さい銀河が形成されにくい状況、つまり再電離中だった可能性を示唆する。最遠の宇宙での銀河の発見個数はまだ少ないため他領域での更なる観測が望まれる。

4.3 まとめ

約 127 億年前の銀河団、約 128 億年前の銀河という宇宙で最初の世代の銀河団、銀河の観測が成功したことにより、宇宙の天体形成過程の解明に一步近づけたのではないと思われる。

第5章 ハワイの歴史・自然・文化

担当

東邦大学理学部物理学科4年
カノープス



東邦大学理学部物理学科3年
デネブ



5.1 ハワイ諸島の誕生

ハワイ諸島は10万年以上前からの火山活動によって生まれた島で地球の奥深くにあるホットスポット(マグマ溜まり)から噴出する溶岩によって形作られました。現在は大きな8つの島と、130近くの小島や岩礁からなるハワイ州ですが、すべての島々が一度に誕生したわけではありません。ホットスポットと呼ばれるマグマの噴出口は動かず、地表のプレートだけがゆっくりと北西方向に動いているため島は西から東の順に生まれたと考えられます。

このようにして8島のなかでは約400万年前に最初に「カウアイ島」が誕生しました。さらに噴火は徐々に東へと移り、約10万年前、最後に東端に位置するビッグ・アイランド(ハワイ島)が生まれました。現在もビッグ・アイランドのキラウエア火山では地殻活動が続いていて、噴火と小休止を絶えず繰り返しています。活火山としての規模は世界最大であり、このエリアを含むハワイ火山国立公園は1987年に世界自然遺産に登録されました。さらに、ビッグ・アイランドの東にある海底火山「ロイヒ」の活動も活発で、将来、噴出した溶岩が陸地として海面に現れ、新しい島を形成するとも考えられています。

灼熱の溶岩台地に生命が誕生し、動植物が定着し、やがて人間が住めるようになるまでには、何百万年もの歳月を要します。ハワイとは、豊かに暮らす人々がいるその地下で、今もなお何年、何千年と火山が生き続けているという、希有な場所ということができます。

5.2 ハワイ島

ハワイ島はビッグ・アイランドとも呼ばれ、四国の半分ほどの大きさを持つハワイ諸島で最大の島です。人口は15万人ほどで、オアフ島に次ぐ2番目の多さです。

この島の都市ヒロは日系移民によって開発された都市です。ヒロは歴史的に津波による壊滅的な被害を何度か受けたことがあり、その経緯から太平洋津波博物館が設置されていて、津波に関する研究も行われています。

また、ハワイ島はホットスポット上にあることから活発な火山活動が起きます。島には4マウナ・ケア山とマウナ・ロア山の2つの4000m級の山と、フアラライ山、コハラ山、さらには現在も溶岩を噴出し続けるキラウエア山の5つの火山があります。

5.2.1 マウナ・ケア山

マウナ・ケア山の標高は4200mでハワイ諸島での最高峰です。「マウナ・ケア」という名前はハワイ語で「白い山」という意味があり、その名の通り冬になると山頂が雪に覆われることもあります。また、マウナ・ケア山は海底からの高さが10203mもあり、エベレスト山を抜いて世界最高峰となります。しかし、山全体の

体積が非常に大きく、その重さによって海底部分が押しつぶされて、高さが徐々に減少しています。

マウナ・ケア山は天候が安定していて、空気が澄んでいる、という地理的条件としても大きな特徴を持っています。山頂における大気の密度は海面付近の4割程度で、1年で快晴の日が300日以上もあります。このため、大気観測や天体観測にとって非常に重要な位置を占めていて、世界中から注目されています。さらに、北緯20度という低緯度に位置していて、北半球・南半球の両方の天体を観測できるということや、比較的なだらかな山のため、山頂への資材運搬が容易だということも、天文台建設にとっては好条件の1つです。

5.2.2 すばる天文台

まず頂上は通常発生する雲の上にあるので気候が安定しています。その上1年中北東の風が吹いているので乾燥しています。また高所のため空気が薄く、1年のうち300日以上が晴れの日なのです。さらにハワイ島は赤道付近にあるため北半球の天体全部と南半球の天体のほとんどを観測できるのです。こんな事もあり地球上で最も宇宙に近い場所とも言われています。

しかし天体観測には非常に条件は良いのですが、観測する人間にとっては空気が薄く（酸素は平地の60%）非常に過酷な場所です。吐き気や頭痛を起こす人もいますし、少々の作業でも息切れを起こし、記憶力も低下します。よって高山病の危険があるので山頂には1日8時間しか滞在できないという制限があります。また山頂はとても寒いので山頂に通じる一本道が凍る可能性があります。そんな時は観測中であっても退去命令が出されることもあります。標高2800m地点にはハレポハク（石の家）という観測者達のための施設があり（山頂まで20分の位置）、山頂へ行く観測者達は途中必ず立ち寄り低い気圧に身体を慣らさなければなりません。ここにはレストランもあり数名のシェフが交代で勤務しています。世界中の天文学者が集まるので料理もバラエティに富んでいるのです。ここより山頂に向かうには安全に関する様々な規則があります。16歳未満の子供、妊娠中の女性、呼吸器や心臓に病気がある人は上れません。また4輪駆動車でなければ上れません。しかし頂上に近づくと道は舗装されています。望遠鏡の大敵ほこりを立てないためです。また夜間はヘッドライトの点灯も許されません。やはり望遠鏡に余分な光が入らないための配慮です。この様な事をハワイ大学によって管理されているのです。またハワイ大学天文台学研究所では各国の天文台に場所を提供する代わりに観測時間の一部（10～20%程度）を借りています。その時間を世界中の天文学者に割り当て、最新の設備で観測できるようにしています。

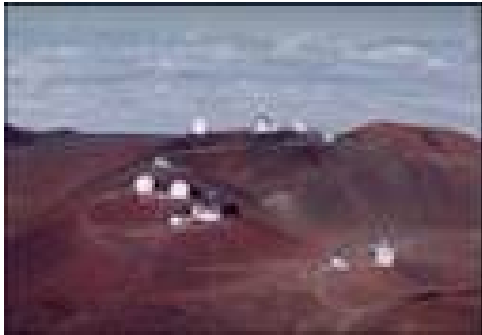


図 5.1: マウナケア山山頂の天文台群

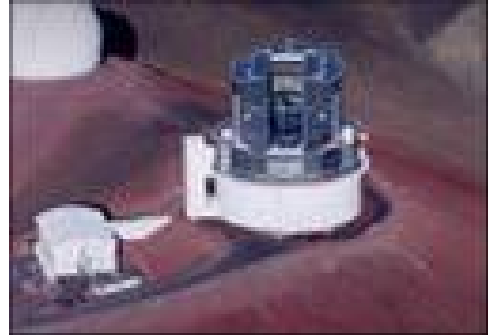


図 5.2: すばる望遠鏡

5.2.3 マウナ・ロア山

標高は 4189m でマウナ・ケアに次ぐ 2 番目の高さです。「マウナ・ロア」とはハワイ語で「長い山」を意味していて、地球上で最も体積の大きな山です。山頂にあるモクアウェオ火口は世界最大の火口です。

マウナ・ロア山も大気や天体観測に適した地理的条件があり、海拔 3400m の地点にはマウナ・ロア太陽観測所があり、太陽観測を行っています。また、局地的な待機の影響を受けない高度であることを利用して、マウナ・ロア天文台では全地球的な大気の観測を行っています。この観測では大気中の二酸化炭素の割合を計測して、地球温暖化に関するデータを収集しています。

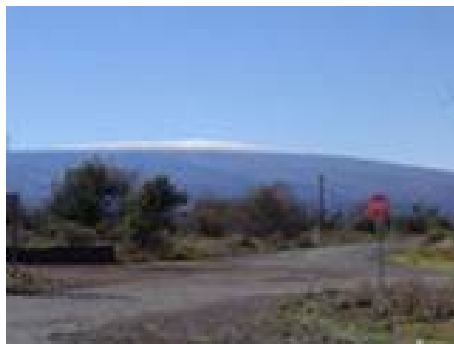


図 5.3: マウ・ナロア山 (*image.blog.livedoor.jp*)

5.2.4 キラウエア火山

キラウエア火山はハワイ島の南東に位置する標高 1247m の火山です。この火山は 1983 年に噴火をし始め、20 年以上たった今でも溶岩は流れ続けている世界で最も活発な火山です。これは世界最長記録でもあります。ハワイ島の火山は、激

しい爆発は少なく、その代わり頻繁に噴火を繰り返し、液状の溶岩を吐き出すという特徴があります。さらに、火口から流れた溶岩は、海に流れて急激に冷やされます。それがやがて陸となり、現在も島の面積を広げています。この噴火によりビッグアイランド (ハワイ島) は更に約 2.3 平方 km 大きくなりました。

火山自体は世界一安全な火山とも言われていて、「ドライブイン火山」と呼ばれていることからわかるように車で気軽に立ち寄れるところです。



図 5.4: 噴火するキラウエア火山



図 5.5: 流れる溶岩

5.3 オアフ島

オアフ島はハワイ州で最も人口の多い島で、州全体の 8 割がこの島に住んでいます。この島には州都ホノルルがあり、政治、経済、観光の中心となっています。ホノルル国際空港やワイキキビーチ、ダイヤモンド・ヘッドもあり、世界有数のリゾート地となっています。パールハーバー (真珠湾) もこの島にあります。

5.3.1 ホノルル国際空港

ハワイの玄関口で、アメリカの航空会社だけでなく、日本やオーストラリア、カナダやニュージーランドなどの太平洋に接する国々の航空会社も多く乗り入れる太平洋のハブ空港的な存在となっています。この空港はハワイ諸島へのハブ空港にもなっています。4 つの主要な滑走路と水上飛行機用の滑走エリアを持ち、海側の滑走路はスペースシャトルの緊急着陸用滑走路に指定されています。また、隣接地にアメリカ合衆国空軍のヒッカム空軍基地があり、滑走路を共有しています。

国際線旅客はターミナル到着後に、到着ゲートからメイン・ターミナルの入国審査場まで、「ウィキウィキバス」と呼ばれる 2 両連結のバスによって移動することが多く、この空港のシンボリック存在となっています。しかし、乗り換え時に空調のない屋外へ出なければならないことや、段差がありバリアフリー対応が難しいことから、新しく完成する連絡通路と動く歩道の完成に合わせて、2008 年 11 月に廃止されることになりました。



図 5.6: ホノルル国際空港 (<http://ja.wikipedia.org/wiki>)

5.3.2 ダイヤモンド・ヘッド

オアフ島にある標高 232m の火山で、火山活動で噴出した火山砕屑物が火口の周囲に積もり丘を形成した火山砕屑丘です。この火山は、30 万年前に噴火が起こったのを最後に火山活動を止めています。この名前の由来は、19 世紀にイギリスの水夫たちがこの山を登ったとき、火口付近の方解石の結晶をダイヤモンドと間違えたことによります。ハワイの原住民は「マグロの頭」という意味の「レアヒ」と呼んでいます。

上空からはほぼ円形の大きなクレーターを見ることができます。また、ただ眺めるだけでなく、手軽なハイキングトレイルとしても人気があり、山頂からはワイキキ全体を見渡すこともできます。

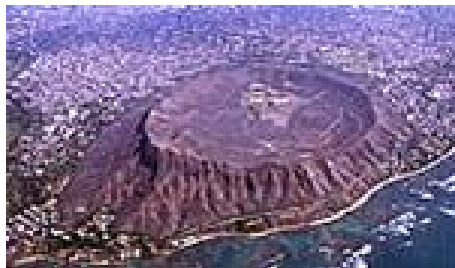


図 5.7: ダイヤモンドヘッド

5.4 マウイ島

マウイ島はハワイで 2 番目に大きな島です。もともとは 2 つの島でしたが、ハレアカラ火山の噴火により、島と島がつながり現在の形になりました。

5.4.1 ハレアカラ火山

標高は富士山より若干低く、3055m です。面積 49.2 平方 km という世界一大きな火口を持つ火山です。巨大な火口には、9 個のクレーターを持つ大規模な噴火口があり、何 10 万年もの歳月をかけて風化し、形成された自然の芸術「スライディング・サンド」と呼ばれる砂の波紋が見る事ができます。ハレアカラ火山は、マウイ島誕生に大きな役割を果たした、強いエネルギー・スポットとしても有名です。

また、この火山には、ヒマラヤとここでしか見られない貴重な植物、シルバーソード（銀剣草、アヒナヒナ：ハワイ語）が咲いています。シルバーソードは標高約 2000～4000m の地域でなければ、生息できないデリケートな植物です。花をつけるまでに、30 年とも 40 年とも言われ、花を付けた後、その一生を終えてしまう貴重な植物です。

また、ハレアカラ山頂には、マグネティックピークという巨大な磁場があり、この山自体がすべてマグネットで形成されており、物理的にも真のパワースポットと言われています。



図 5.8: ハレアカラ火山



図 5.9: シルバーソード

5.5 ハワイ諸島への移住

無人島だったハワイ諸島の最初の上陸者はマルケサス諸島からやってきたポリネシア人だと伝えられています。ブロンズ色の肌と、黒い大きな目、暗褐色の髪、がっちりした体格が特色のハワイの人達の祖先はポリネシア人と呼ばれるグループに属しています。その後、紀元 1100 年頃にタヒチ人が大量移住し、各島に分散。身近にヘイアウ（神殿や祭壇）を作り、灌漑施設、養魚池などを作り、生活の基盤を整備しました。

そして、1100 年頃に移住してから数百年もの間、外界との接触がなかったハワイに、初めて西欧人として上陸したのが 1778 年、イギリス人の探検家ジェームズ・クック（キャプテン・クック）でした。クックは、鉄や火薬を使った武器をはじめ

とする西欧文明の伝来、天然痘、百日咳、はしかなど疫病の蔓延による人口の減少など、その後のハワイに大きな影響をもたらしました。



図 5.10: ジェームズクック

5.6 生活

タヒチ人の生活は、まず上下水道については、畑から出た泥水は地下をくぐらせて海に流し、飲料水を確保するため、川の上流部は立ち入り禁止にするなどして、できるだけ環境を破壊しないためのエコロジー的発想が、当たり前ものとして生活の中に根づいていました。

また、暮らしの面では、独自の土地分割システムを導入しました。ハワイの人々には、土地を所有するという観念がなく、土地は人々が生まれる前からあり、人々は死んで地に帰って行くが、土地はずっとそこにあるという考えから土地は人に属さないという信念があったため、ハワイの島々は島の中心から海岸線さらには海の中までパイを切るように扇状に分けていました。

5.7 文化

かつてのハワイでは、古代のアジア諸国と同じく、森羅万象すべてのものに神が宿るという思想があり、戦の神「クー」、創造の神「カネ」、豊穡と収穫の神「ロノ」、海洋や暗闇を司る神「カナロア」の四大神をはじめ、さまざまな神が信仰の対象となっていて、人々は神に祈りや踊りを捧げることで、その霊力を生活の中に取り込もうとしていました。

5.8 フラダンス

フラはダンス、演奏、詠唱、歌唱のすべてが含まれるハワイの伝統的なダンスです。フラにはカヒコと呼ばれる古典的なスタイル(古典フラ)とアウアナと呼ばれる現代的なフラの2種類があります。

カヒコは元々は男性が打楽器に合わせて力強く踊るというもので、きれいなメロディーや歌にのせて踊るというのではなく、自然や神に対する礼拝を込めて詩を唱えながら踊るという、かなり宗教的で神聖な踊りです。しかも、修行や訓練を行った選ばれた男性しか踊ることを許されない厳粛な踊りでした。ただし、今では女性もカヒコスタイルで踊ることもあります。

カヒコに対してアウアナは、19世紀以降、欧米の音楽を取り入れて作り出された新しい形式のフラです。レパートリーは固定されていないので、現在も新作が創られ続けています。



図 5.11: カヒコ



図 5.12: アウアナ

5.9 ハワイ王朝

ハワイ王朝は、8代98年にわたって続きました。

有名なカメハメハ大王は、初代のハワイ王朝の王様で、それまでバラバラだったハワイ諸島をまとめた人です。カメハメハ大王が即位した時代の日本は、徳川第11代将軍家斉の世でした。

8代続いたハワイ王朝のうち、カメハメハ大王の血筋は5代目で途絶えています。

後半の3代の王様はカメハメハの血縁ではなく、議会で選ばれた王様です。

8人いた王様の中でカメハメハ大王が特別有名なのは、初代の王様だったことに加えて、ハワイはカメハメハの没後、西欧諸国からさんざんに干渉を受けることになりますが、カメハメハ存命中は、諸外国も遠慮気味だったというカリスマ性があったからでしょう。

5.10 現代のハワイ

ハワイ王朝終焉後、1898年にハワイはアメリカに併合され、海外統治領としての時代を経て、1959年にアメリカ合衆国 50 番目の州となりました。

5.10.1 州のシンボル

州花

1923 年、最初にハワイ州の花として制定されたのはハイビスカス・コキオです。気品にあふれたこの『赤いハイビスカス』はハワイ州の花として完璧でしたが、あまりに個体数が少なく、一般に馴染みが薄いという理由で変更を余儀なくされました。今日のハワイ州の花である黄色のハイビスカスは、1988 年に制定されたハイビスカス・ブラッケンリッジー (英名: native yellow hibiscus、ハワイ名: マオ・ハウ・ヘレ) です。



図 5.13: マオハウヘレ

州鳥

1949 年にハワイ州の州鳥となった「ネネ」は「ハワイアン・ゲース」とも呼ばれていて、キャプテン・クックがハワイ島に到着した 1778 年頃に 25000 羽程いたのが外敵によって 1951 年には 1 度絶滅したと思われました。しかし、個人で所有していた 30 羽がかろうじて生き残っていたため絶滅は避けられ、過去 40 年間に渡って人の手による繁殖の努力が重ねられ、現在でも連邦法で大切に保護されています。



図 5.14: ネネ

州木

1959年にククイがハワイ州の州木となりました。ククイの実は、プラムやネクタリンと同じくらいの大きさで、果肉の中に栗に似た堅い種があります。種の中の油分を取り除いて磨き繫いで、レイが作られます。

種の中の油分は良質の脂質で、ハワイアンは、古代からこの油を日焼けの後に塗ったり、湿疹や皮膚炎、火傷や切り傷の治療、家具のつや出し、漁猟をする時の網の浮きなどに使ったり、様々なところで用いられていました。電気がない時代には、油を石のランプの燃料にしたり、種を繫いでロウソク代わりに使ったりしていたので、ククイの木のことを「キャンドルナッツツリー（ロウソクの実の木）」と呼ばれることもあります。



図 5.15: ククイ

5.10.2 近年のハワイ

マリンスポーツやショッピングでおなじみの観光地としての顔を持つ一方で、近年は、カメハメハ2世の時代に西欧的な倫理観に沿わない古い因習をすべて排除するとの考え方のもとで抑圧されてきた伝統文化を再び見直そうという動きも活発です。それは、アメリカという大国のなかであって、少数民族としての立場や、自立を取り戻すための戦いとも重なります。1980年代半ばに起こった「ハワイアン・ルネッサンス運動」がそれで、フラや伝統的な神々、エコロジカルな暮らし、そしてハワイ語などを再認識し、ネイティブハワイアンとしてのアイデンティティを取り戻そうという活動が盛んに行われています。

とはいえ、これは西欧文化を否定するといったものではありません。自分たちのルーツを振り返り、現代の社会に先人たちの知恵を活かしていければというのが基本姿勢。こうした動きにより、ハワイは単なるリゾート地ではなく、固有の文化を持つ「伝統の島」としても深い魅力を持つようになりました。