

すばる研修 2014

事前学習資料



東邦大学理学部物理学科

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	4
1.1.1 すばる望遠鏡の生い立ち	4
1.1.2 立地環境	4
1.1.3 望遠鏡本体	5
1.2 世界で好評価のすばる望遠鏡	6
1.2.1 風の揺らぎを抑える円筒型ドーム	6
1.2.2 世界最大級の鏡	7
1.2.3 主鏡を支えるアクチュエーター	7
1.2.4 4つの焦点	7
1.2.5 日常的に行われるメンテナンス	9
1.3 能動光学と補償光学	9
1.3.1 高性能な望遠鏡とは	9
1.3.2 能動光学	10
1.3.2 補償光学	12
1.3.3 補償光学の仕組み	13
1.3.4 AOとIRCISが捉えた褐色矮星連星	13
1.3.5 補償光学の原理	15
1.3.6 光波面測定, 補償鏡, レーザーガイド星	16
1.3.7 位相補償と位相制御計算機からなる複合体	19
第2章すばる望遠鏡の検出器	20
2.1 すばる望遠鏡検出器の特徴	20
2.2 各焦点の観測装置	22
2.2.1 主焦点	22
➤ ファイバー多天体分光器(FMOS)	22
➤ 主焦点カメラ(Suprime-Cam)	23

➤	超広視野主焦点カメラ(Hyper Suprime-Cam)	24
2.2.2	ナスミス焦点(可視光).....	26
➤	高分散分光器(HDS).....	26
2.2.3	ナスミス焦点(赤外線).....	26
2.2.4	カセグレン焦点.....	27
➤	多天体近赤外線撮像分光装置(MOIRCS).....	27
➤	微光天体分光撮像装置(FOCAS).....	28
➤	冷却中間赤外線分光撮像装置(COMICS).....	28
2.3	補償光装置.....	29
2.3.1	188素子波面補正光学装置.....	29
第3章すばる望遠鏡による観測結果(銀河系内).....		31
3.1.	ガリレオ衛星が月食中に謎の発光.....	32
3.1.1	木星.....	32
3.1.2	木星の衛星.....	33
3.1.3	観測内容.....	34
3.1.4	観測成果.....	34
3.2.	土星の衛星の発見.....	35
3.2.1	土星.....	35
3.2.2	土星の衛星.....	36
3.2.3	観測成果.....	36
3.3.	彗星とは.....	37
3.3.2	彗星の観測方法.....	41
3.3.3	すばる望遠鏡が観測した彗星.....	41
➤	観測1：リニア彗星.....	44
➤	観測2：アイソン彗星.....	47
第4章すばる望遠鏡による観測結果(銀河系外).....		54
4.1	アンドロメダ銀河ハロー.....	54
4.1.1	アンドロメダ銀河とは.....	54

4.1.2	すばる望遠鏡による観測結果	56
4.1.3	その後の調査と考察	57
4.2	矮小銀河 LEDA074886	59
4.2.1	銀河の形態	59
4.2.2	すばる望遠鏡による観測結果	59
4.2.3	観測からの考察	60
4.3	重力レンズシステム SDSS J1004	61
4.3.1	重力レンズ効果とは	61
4.3.2	すばる望遠鏡による観測結果	61
4.3.3	観測からの考察	62
引用・参考文献		64

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 りゅうた

東邦大学理学部物理学科 みさき

1.1 すばる望遠鏡とその立地環境について

1.1.1 すばる望遠鏡の生い立ち

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」(英名: Japan National Large Telescope, JMLT) 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」が選ばれた. 「すばる」は元来おうし座あたりにあるプレアデス星団という星の集まりの和名である. 奈良・平安の時代から親しまれてきたやまと言葉であり, 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^[1].

1.1.2 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最適な場所のひとつとして知られている. 標高 4200m の山頂は, 気圧が平地の $\frac{2}{3}$ 程度しかなく, 地上の天候にほとんど影響されないので, 一年のうち 300 日以上も快晴となる. 貿易風(北東から吹く風)がハワイ上空を滑らかに吹いているため, 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, 近くに大きな都市がないため天体観測を妨げる人口光がほとんど

どないことも大きな理由である。

天体観測に非常に適したこの環境を求めて、世界 11 カ国、計 13 基もの望遠鏡がマウナ・ケア山頂に設置されている。そのためこの一帯を「マウナ・ケア観測所」として国際研究施設を形成している。

マウナ・ケア山は天体観測に適していると同時に、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。

1.1.3 望遠鏡本体

望遠鏡に重要なことは、なにより光をたくさん集めること、集めた光からよりシャープな天体のイメージを得ることである。すばる望遠鏡は単一鏡において世界最大の口径 8.2m の主反射鏡を有し、天体からの微弱な光を集めることが可能である。さらに高解像度を実現するための最新技術によるさまざまな工夫が施されている。

1. 主反射鏡

—有効口径	8.2 m	—研磨精度	0.014 μ m
—厚さ	20 cm	—焦点距離	15m
—重さ	22.8 t	—材質	ULE ガラス

2. 望遠鏡本体

架台…経緯台式架台反射望遠鏡

基礎光学系…リッチー・クレチアン光学式

焦点…4箇所

—主焦点 (F 比 : 2.0 補正光学も含む)

焦点距離…16.4m

—カセグレン焦点 (F 比 : 12.2)

焦点距離…100.4m

—ナスミス焦点 (F 比 12.6)

焦点距離 103.32m

—ナスミス焦点 (F 比 : 13.6)

焦点距離…11.52m

高さ…22.2m

最大幅…27.2m

重さ…全回転部分 555t

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…10～89.5 度

総合星像分解能…0.2 秒角(補正光学なし, $2.15\mu\text{m}$)

1.2 世界で好評価のすばる望遠鏡

すばる望遠鏡は、大型光学赤外線望遠鏡である。光を集める鏡の有効口径 8.2 m の大きさに、観測性能を上げるために数々の新しい技術革新をもつ新世代の望遠鏡である。高い鏡面精度を維持する能動光学をはじめ、空気の乱れを押さえる新型ドーム、4つの焦点それぞれに備えられた独自の観測装置やそれらを効果的に使うための自動交換システムなどがある。

1.2.1 風の揺らぎを抑える円筒型ドーム

すばる望遠鏡の本体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、風通しの良い円筒型のドームを採用している。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可能になっている。

1.2.2 世界最大級の鏡

すばる望遠鏡は単一鏡として、世界最大級の口径 8.2メートルを持ち、天体からの微弱な光をも集めることが可能である。また、集めた光からシャープな天体のイメージを得る高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。望遠鏡を設置する場所選び・最新技術の駆使によって実現されたもので世界の大型望遠鏡の中で特に高く評価されている。

この鏡は7年の歳月をかけて磨かれており、その滑らかに磨かれた鏡は $0.012\mu\text{m}$ の誤差の鏡面精度であり、コンピュータ制御されている。この鏡をハワイ本島の大きさとすると、誤差は紙一枚程度の厚さとなり、制度の高さが窺える。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。

1.2.3 主鏡を支えるアクチュエーター

世界最大級の単一鏡を用いた望遠鏡を作る際、鏡の厚さが 20cm しかないため傾けた際に鏡がゆがんでしまい形状を維持できない。そのため 261本のアクチュエーターと呼ばれるロボットの指を主鏡の裏に設置し常に鏡が理想的な形になるように補正している。

1.2.4 4つの焦点

すばる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ることにより、可視光から赤外線の波長域にわたり観測が可能である。

●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．可視光・近赤外の焦点，最大視野は直径 30 分角である．長所は，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ことである．短所は，観測装置が光束で乱されることである．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．また，収差が大きいのでレンズなどの補正光学系が必要となる．

●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 1.1）可視光・近赤外の焦点．最大視野直径は 6 分角である．長所は望遠鏡の全長を短く出来るため，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の事が可能．短所は，空からの光を遮るためのバツフルが必要なことである．

カセグレン式から派生した光学系として，広い視野にわた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持ちて収差を光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．

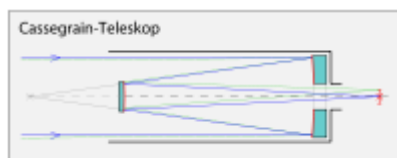


図 1.1：カセグレン焦点の略図^[2]

●ナスミス焦点

カセグレン焦点の直前に斜鏡（平面鏡）を置き、光軸を光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 1.2）．長所は、焦点部の高さが変わらないので大型の観測装置に取り付けることが可能である．短所は、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ことである．斜鏡を用いるため偏光が起きてしまう．

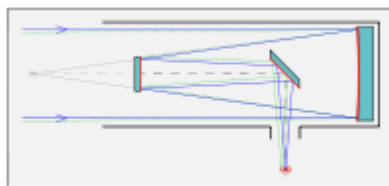


図 1.2：ナスミス焦点の略図^[2]

1.2.5 日常的に行われるメンテナンス

鏡面の性能を維持するために日常的にメンテナンスが行われている．望遠鏡本体にシステムとして組み込まれている，鏡面にドライアイスを吹き付ける作業は週間おきに，アルミニウムの再蒸着（コーティング）は2～3年おきに行われている．

1.3 能動光学と補償光学

本節では能動光学と補償光学について，とりわけ補償光学について説明をする．

1.3.1 高性能な望遠鏡とは

望遠鏡の目的は，遠くにあるものを鮮明に観察することである．ゆえに，高性能な望遠鏡とは目的を十分に果たす

こののできる性能を持ち合わせいる望遠鏡のことを指す。では、より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大抵の場合遠くにあれば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、より遠くの星が、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。すなわち、主鏡の有効口径が大きい望遠鏡ほど光をたくさん集められるので高性能の望遠鏡といえるだろう。

1.3.2 能動光学

望遠鏡の鏡面は設計形状からの誤差が光の波長の約 $1/14$ 以下になるように保つ必要がある。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。これまでは主鏡のガラス材を十分に厚くして変形しないようにするのが常識であったが、大型望遠鏡の場合にはコストが非常に大きくなってしまう。ガラスを薄くすれば軽量化することはできるが、これでは鏡が変形しやすくなってしまう。そこでこの柔らかさを逆手に取り、鏡面をいつも設計どおりの形状になるように自動制御する、というのが「能動光学」である。鏡面の形状誤差を測定し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。光学的測定では大気のゆらぎによる誤差を除くために、およそ 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測定し、正しい力分布と

そ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付けられるので，正確な推定をすることが可能だ．機械的な測定は間接的ではあるが，高速度でサンプリングが行える利点がある．天体の追

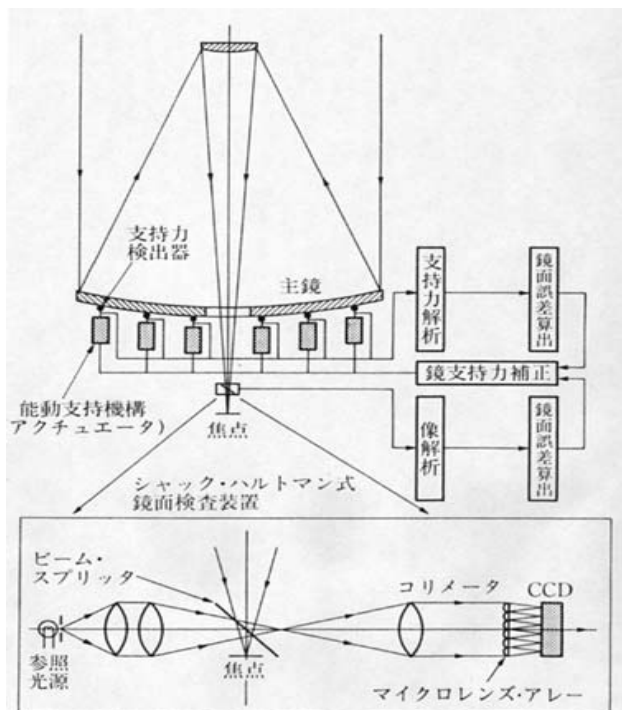


図 1.3：すばる望遠鏡の主鏡能動光学方式の原理^[3]

尾中は常に機械的な測定のもとに制御を行い，時誤記光学的な測定で較正する．すばる望遠鏡で能動光学機構は図 1.3 のような二重のサーボ系として較正されている．

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る，また鏡が放物面からずれた時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，鏡の裏から力をか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り始めて実現可能になる方法である．

1.3.2 補償光学

地上にある望遠鏡では大気が揺らいでいるために，大気圏外に打ち上げられた望遠鏡に比べて分解能が劣ってしまう．図 1.4 は大気の揺らぎを瞬時に補正して，地上の望遠鏡のこれまでの限界を超越することができる．この装置自身は検出器を持っていないので，IRCS/CIAO といった赤外線観測装置と組み合わせて使用する．

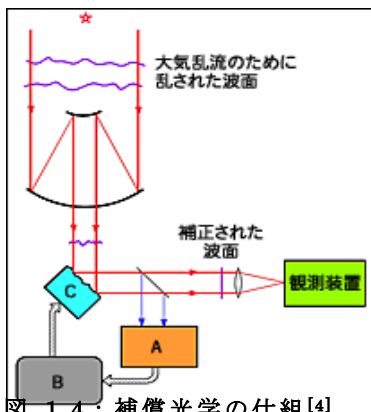


図 1.4：補償光学の仕組み [4]

1.3.3 補償光学の仕組み

「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すれば，回折限界に迫る空間解像力を実現できる」という補償光学の概念は，1953 年，に提案された．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能動光学を高速化したものと位置づけることができる．

天体からくる光は，望遠鏡に到達する前に地球の大気の揺らぎによって乱され、星像はぼやけてしまう．これを元に戻す技術が補償光学装置（略：AO）である．AO を用いると星像がシャープになるので，星像のピーク値が高くなるため暗い天体の検出にも効果的である．図 1.4 のように観測した波面の曲率を「波面センサー（図 1.4A）」を使って測定する．「制御システム（図 1.4B）」を通して「可変鏡（図 1.4C）」に補正する．可変鏡は 36 個のアクチュエーターで制御され，このシステムを用いると波長 $2.2\mu\text{m}$ の赤外線で見えた場合，解像度の面では大気の揺らぎがほぼ完全に克服された画像を得ることができる．

1.3.4 AO と IRCS が捉えた褐色矮星連星

（図 1.5）は AO と近赤外線分光撮像装置（略：IRCS）を使用して撮影された，地球から約 60 光年離れた「うしかい座」を撮影した写真である．図左上での写真では主星のすぐ隣に微かな点を 2 つ確認することができる．図右上は AO を用いずに撮影された写真で，その存在を確認することすらできない．AO をつけた分光観測（図右下）によ

って、これらの 2 つの点減が木星の数倍から数十倍の質量しか持たない、褐色矮星の連生計であることが分かった。

どんなに大きな望遠鏡を使っても、達成できる解像度は地球の大気によって限られてしまう。補償光学はその限界

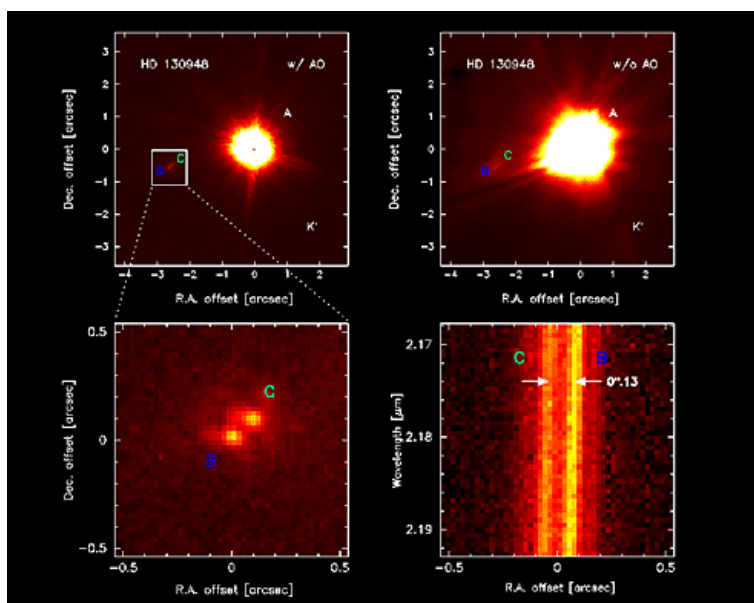


図 1.5 : うしかい座の 6 等星 HD 130948^[4]

を超え、大きな口径を最大限に生かす装置である。

AO の一番の難点は、毎日観測条件が変わるため、それに合わせて装置を調整しなければならないことである。星の明るさなどは不変だが、点に見えるべき星の光が大気に散乱され、どの程度の大きさに見えるのかをあらわすシーイン

グがすぐに変わってしまう。

自然のシーイングが 0.5 秒角程度なら、AO をかけることにより、近赤外線では理論的限界の解像度を達成することが可能となった。これにより、いま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することができるようになった。また、光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取ることはできなかった天体を、分光することまで可能となった。

1.3.5 補償光学の原理

恒星の見かけの直径は少数の例外を除くと、0.001 秒角以下であり、実際には上無限遠にある点光源とみなすことができる。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 での回折限界 $2.4\lambda/D$ にまで小さくなるはずである。

口径 1m, 波長 $0.5\mu\text{m}$, ならば回折限界は

$$0.2 \times 10^{-6}[\text{rad}] = 0.25 \text{ 秒角}$$

となる。

ところが、実際には口径を大きくしても、大気中の温度ゆらぎにより屈折率が僅かに乱れる。そのため、光波面が乱され星像直径は 1 秒角以下になかなかなることはない。このような大気の乱れに起因する星像の暈けの強さを、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大きく変化するが、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 秒角といわれている。シーイングのよい観測場所を求めて、全地球規模で調査が行われた結果、大型望遠鏡の建設はハワイ島、アンデス高原、

カナリー諸島の3箇所に集中するようになった。

1.3.6 光波面測定，補償鏡，レーザーガイド星

波面測定には測定視野内の星を光源として用いる。波面測定法は大別すると、波面の一次微分（勾配）を測定する手法と、波面の二次微分（曲率）を測定する方法に分類できる。勾配測定法としては、シャックハルトマン法とシャリング干渉法が代表的だ。シャックハルトマン法では、平行光束中の瞳位置においたマイクロレンズアレーにより焦点面に結像した多数の星像の配列の歪みから波面を求める。曲率測定法としては、ピンボケ像の輝度むらからポアソン方程式を解いて、波面を求めるロジエ法が実用化されている。波面測定の空間分解能はフリード長とマッチしなければならない。時間分解能はフリード長と有効風速の比で決まり、可視域ではミリ秒以下程度が要求される。光源として、視野中心にない星を使う場合、視野中心方向からのビームと中心からはずれた光源星方向からのビームとでは、大気の異なる部分を通過するため、はずれるに従って位相乱れの測定誤差が大きくなる。このため特に可視域では、光源星の視野中心から精々10秒角以内にあることが望ましい。半径10秒角以内にある星は通常、光源星として使える程十分に明るくない。従って、補償光学のための波面位相測定には、高速・高感度・低雑音の2次元カメラとして、アバランシュ・ホト・ダイオード・アレーや並列スキャナー読み出しCCDの開発に力が注がれている。

波面計測ができれば、波面補償へと進める。能動光学の場合と違って、補償光学では波面の誤差を高速に直す必要があるため、大きな主鏡を強制変形させたのでは時間的に

間に合わない。

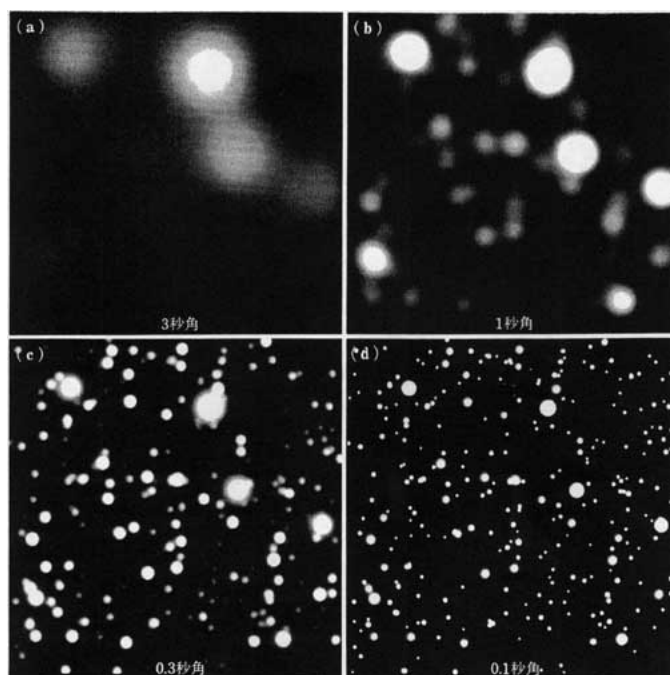
焦点後の光学系がつくる主鏡像の位置に高速応答性の波面位相補償素子を置き、波面誤差を補償する。位相変調型の補償素子も開発されているが、天体観測の場合には波長大域、光損失、偏光特性などの問題が大きいため実用化されるに至っていない。

形状可変の補償鏡面素子としては、裏面に複数のピエゾ素子を接着した薄がらす鏡が最も多様されているが、複数の小型分割鏡をそれぞれピエゾ駆動する方式や、薄膜を正殿アクチュエーターで変形させる方式も開発されている。

補償光学が天文学で実用的になるかどうかは、波面測定ができるかどうかにかかっている。実際に観測したい天体が十分に明るければ、その天体を波面測定的光源として用いる。観測したい天体が暗いときには、近くの明るい星を光源として用いる。波面測定用の星と目的天体とは、大気の揺らぎが共通である必要がある。このため近くに明るい星がないと、波面測定をすることができない。そこで、任意の方向に波面測定用の明るい光源星を作れないか・・・という発想が生まれた。地表から約 90km の上層大気中にナトリウム原子の密度が濃い、厚さ 10km 程度の層がある。ナトリウム原子を励起する波長 589nm の強力なレーザーをこの層に当てれば、ナトリウム原子が発光して十分に明るい人工の星を任意の方向に作ることができる。

能動光学・補償光学の効果をシミュレーションにより示したものが図 1.6 である。図には補償光学が実現して、星像が 0.1 秒角にまで小さくなったときの同じ星野の見え方を同じスケールで示している。補償した場合の像の中心強度は補償なしの場合よりもはるかに高い。光をより集中す

ることができるため望遠鏡の集光効率も向上する．従って，以前より暗い天体が観測できるようになる，より短時間で撮影できるようになった．像がシャープになるため，分光観測でも分光器の入り口のスリットを狭めることができる．このため，分光器そのものを小型化して安定で安価なものにすることができる．



能動工学技術をさらに発展させ小型高速化し，地球大気の温度揺らぎに起因する光波面の擾乱（大きなスケール現象）

図 1.6：補償光学による解像度改善効果のシミュレーション^[3]

象に対して、時間とともに刻々と変化する小さなスケールの乱れ)を実時間制御して、望遠鏡の回折限界の解像力を実現する技術を補償光学と呼ぶ。

1.3.7 位相補償と位相制御計算機からなる複合体

位相補償は、波面センサーと可変形鏡からなり、それを制御する位相制御する位相制御計算機からなる。波面センサーは、シャックハルトマンセンサーと曲率センサーが代表的なものである。シャックハルトマンセンサーは、細かなレンズアレイによって像のずれを測定するものであり、最も一般的に活用されている方式である。曲率センサーはセンサー本体の移動によって、光強度変化を捉えた情報を元に位相制御計算機によって、可変形鏡を制御するための制御信号ベクトル（電圧）を作り出す。基本的には、隣接するセンサー群の行列演算によるものであり、さほど高度な技術は必要とされていない。

位相制御計算機から出力された制御信号ベクトルによって、可変形鏡を変形させるためのアクチュエーターへと電気信号が送られる。このアクチュエーターの微小な運動によって可変形鏡が変形し、航路に導かれた星像の位相補償が行われる。

すなわち、補償光学は位相補償と位相計算計算機からなる技術の複合体とも言える。

第 2 章すばる望遠鏡の検出器

担当

東邦大学理学研究科物理学専攻 りょうすけ
東邦大学理学部物理学科 こうた

2.1 すばる望遠鏡検出器の特徴

すばる望遠鏡の持つ大きな鏡を活かし、宇宙の様々なスケールにおける現象を科学的に観測するため、対象に応じて様々な観測装置を使い分ける必要がある。すばる望遠鏡には観測装置を取り付けることのできる 4 つの焦点(主焦点、カセグレン焦点、2 つのナスミス焦点)が用意されている。特に、主焦点に装置を取り付けることができる大型望遠鏡は少なく、主焦点における広視野観測はすばる望遠鏡の特徴の 1 つである。

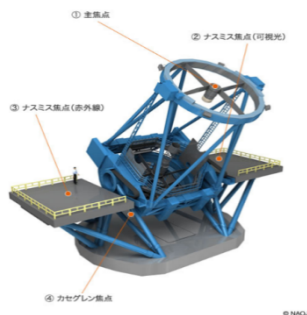


図 2.1 : 焦点の位置^[5]

主焦点は主鏡（回転放物面）に垂直に入射した平行光線が像を結ぶところで、視野を広くとれるのが特徴である。カセグレン焦点は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ばせるもので、比較的複雑な装置でも取り付けることができる。ナスミス焦点は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ばせるものです。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。

それぞれの焦点に取り付けられる観測装置は以下の通り。

- 主焦点
 - ファイバー多天体分光器(FMOS)
 - 主焦点カメラ(Suprime-Cam)
 - 超広視野主焦点カメラ(Hyper Suprime-Cam)
- ナスミス焦点(可視光)
 - 高分散分光器(HDS)
- ナスミス焦点(赤外線)
 - 近赤外線分光撮像装置(IRCS)
- カセグレン焦点
 - 多天体近赤外線撮像分光装置(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)

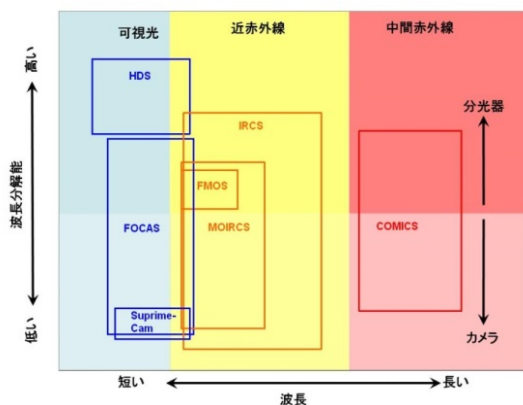


図 2.2：波長と波長分解能の関係^[6]

上図はすばる望遠鏡に備えられた観測装置を、波長および波長分解能によって分類したものである。これより可視光から赤外線までをカバーする撮像用のカメラと分光器を持っていることがわかる。FOCAS や IRCS のように、撮像と分光観測の両方の機能を備えた装置もあり、図の上で重なっている部分でも、それぞれの装置には、視野の広さや観測対象などに大きな違いがあるため役割を分担している。以下では、各焦点に取り付けられた観測装置について説明する。

2.2 各焦点の観測装置

2.2.1 主焦点

➤ ファイバー多天体分光器(FMOS)

すばる望遠鏡の第2期共同利用観測装置で光ファイバーを用いて数多くの天体を同時に分光観測することを可能に

した近赤外線分光器である。FMOS の登場により、すばる望遠鏡の近赤外線領域での分光観測の観測効率はいままでの 10 倍以上となった。広視野で同時に多天体分光観測ができるので、今まで数多くの近赤外線分光データを得ることが難しかった遠方の銀河や暗い活動銀河、星形成領域や褐色矮星などについて、より正確な統計的な観測研究が可能となる。



図 2.3 : ファイバー多天体分光器^[6]

➤ 主焦点カメラ(Suprime-Cam)

すばる望遠鏡の特徴のひとつである主焦点に取り付ける観測装置である。この観測装置は、 4096×2048 画素という大きな CCD を 10 個並べた、8000 万画素のデジタルカメラで、 34 分角 $\times$ 27 分角という広い視野を一度に撮影することができる。広い天域を効率よく観測することで、遠方銀河の探査や暗黒物質の研究、太陽系外縁部の小天体の探査などに威力を発揮する。



図 2.4：主焦点カメラ [6]

➤ **超広視野主焦点カメラ(Hyper Suprime-Cam)**

2012 年にすばる望遠鏡に搭載され、性能試験観測が始まった HSC は、Suprime-Cam の 7 倍もの天域を一度に撮影できる新しいカメラである。

HSC は大きく分けて、カメラ部、補正光学系（レンズ鏡筒）、主焦点ユニットの 3 つの要素で構成されている。カメラ部は焦点面に 116 個の CCD 素子を配置しており、計 8 億 7000 万画素を持つまさに巨大なデジタルカメラである。この CCD 素子は幅広い波長域にわたり非常に高い感度を有することが特徴である。補正光学系は光学収差や大気分散を補正する。結像性能はおよそ 0.2 秒角（2 万分の 1 度角）と、これほどの広視野の光学系では世界最高性能が達成されている。主焦点ユニットはカメラ部や補正光学系などを保持し望遠鏡に取り付けるための機械部品である。主焦点ユニットの姿勢制御には、数トンの荷重を 1~2 マイクロメートルの位置精度で制御できるように特別に開発された 6 本のジャッキが備えられている。このように、

HSC はまさに日本の最新技術の粋を集めた観測装置である。

日本国内で個々に製作されたカメラ部、補正レンズ、主焦点ユニットは、2011 年 8 月から順次ハワイ観測所に届けられた。山頂施設で組み上げ作業が進められ、2012 年 7 月までに主要な部分の組み上げが無事に完了した。そして 8 月 16 日から 17 日にかけて、HSC の望遠鏡への搭載作業が行われた。HSC が望遠鏡上でも正常に駆動することや重量のバランスに問題ないことなどを慎重に確認した後、2012 年 8 月 28 日の夜から性能試験観測を開始し、恒星の光が正しく HSC に導かれ、データが取得できていることを確認した。この性能試験観測では入射光の波面が乱れていないかの確認に注力したため、非常に限られた視野での観測となったが、実際に天体から来た光をとらえることに成功したこの観測は、HSC にとって、そしてすばる望遠鏡にとって非常に大きな一歩であった。



図 2.5 : 超広視野主焦点カメラ
(Hyper Suprime-Cam)^[7]

2.2.2 ナスミス焦点(可視光)

➤ 高分散分光器(HDS)

可視光で 10 万分の 1 の波長差を識別できる装置である。宇宙初期に生まれた星の元素組成を調べ、宇宙における元素の進化を研究したり、星の運動を詳しく測定して太陽系外惑星の軌道を調査したりするために用いられる。6 トンの重さがあり、ナスミス台の片方に常設されている。



図 2.6 高分散分光器^[8]

2.2.3 ナスミス焦点(赤外線)

➤ 近赤外線分光撮像装置(IRCS)

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、20,000 分の 1 の波長差を識別できる分光観測を行う、すばる望遠鏡の基本装置である。ハワイ大学との共同研究によって開発・製作された。IRCS は、すばる望遠鏡のナスミス焦点の片方(赤外線)装着されている。

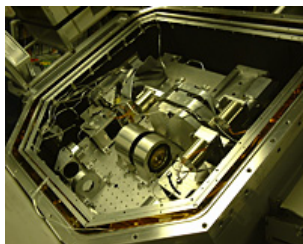


図 2.7：近赤外線分光撮像装置^[9]

2.2.4 カセグレン焦点

➤ 多天体近赤外線撮像分光装置(MOIRCS)

近赤外線用としては巨大な 400 万画素の検出器を 2 つもち、広い視野を撮像する能力をもったカメラであり、口径が 8~10 メートル級の大望遠鏡では世界で初めて、近赤外波長域で一度に多数の天体の分光観測を可能にした装置である。これらの機能により、観測の効率が劇的に向上し、遠方銀河の研究に威力を発揮している。



図 2.8：多天体近赤外線撮像分光装置^[6]

➤ **微光天体分光撮像装置(FOCAS)**

可視光で高い感度の観測を行う基本装置であり、視野内の 100 個の天体のスペクトルを同時に撮影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る。FOCAS は、すばる望遠鏡のカセグレン焦点に装着される。

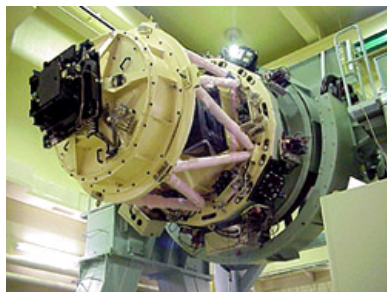


図 2.9：微光天体分光撮像装置^[10]

➤ **冷却中間赤外線分光撮像装置(COMICS)**

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中間赤外線による観測が可能となる。COMICS はマウナ・ケアの優れた中間赤外線透過率を生かすための分光撮像装置であり、惑星系の形成過程や系外銀河の大規模な星形成現象、また星間空間の固体成分である塵（ダスト）の性質や形成過程を調べることができる。

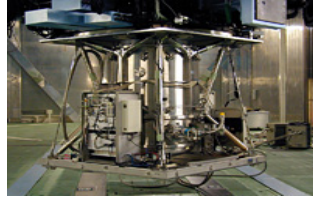


図 2.10：冷却中間赤外線分光撮像装置^[11]

2.3 補償光学装置

天体からくる光は、望遠鏡に到達する前に地球の大気ゆらぎによって乱され、星像はぼやけてしまう。これを元に戻し、望遠鏡の限界性能を実現するのが補償光学装置である。補償光学装置を用いると天体の微細な構造を判別しやすくなり、暗い天体の検出もより効率的になる。

2.3.1 188 素子波面補正光学装置

すばる望遠鏡では、1990 年代後半に第一世代の 36 素子補償光学系を開発、世界中の天文学者に公開した。性能を格段に向上させた第二世代の 188 素子補償光学系は 2006 年 10 月 9 日に試験観測に成功、現在は共同利用観測によって活用されている。この 188 素子補償光学系にはレーザーガイド星生成システムが備わっており、明るいガイド星が観測天体の近傍にない場合でも、補償光学系を利用することが可能である。188 素子波面補正光学装置は、すばる望遠鏡のナスミス焦点の片方（赤外線）に装着される。



図 2.11 : 188 素子波面補正光学装置^[6]

第3章すばる望遠鏡による観測結果 (銀河系内)

担当

東邦大学理学部物理学科 かりん
東邦大学理学部物理学科 こうすけ

銀河とは数多くの星々が一定の範囲内に集団として集まっているものである。その銀河の中でもわれわれの住む地球、太陽系を含む銀河は、銀河系または天の川銀河と呼ばれている。銀河系の直径は約 10 万光年である。その中に自ら光り輝く恒星だけでも 2000 億個以上存在している。銀河は渦巻銀河、楕円銀河などのような種類があり、銀河系は棒渦巻銀河であるとされている^[12]。図 3.1 のような形の銀河が棒渦巻銀河である。銀河の中心には超大質量ブラックホールがあるとされている^[13]。

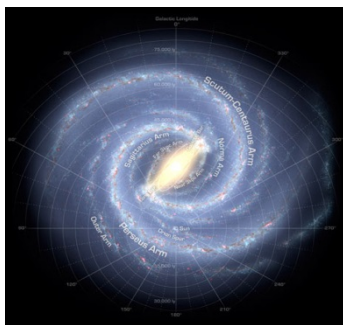


図 3.1 : 棒渦巻銀河系^[13]

太陽系とは太陽の重力の影響によって構成される天体の集まりである。太陽系の惑星は太陽に近い順で水星、金星、地球、火星、木星、土星、天王星、海王星である。火星までを内太陽系、それより外側を外太陽系と呼んでいる。太陽系の小天体には小惑星、太陽系外縁天体、彗星などがある。火星と木星の間には小惑星の軌道が集中している小惑星帯がある。

3.1. ガリレオ衛星が月食中に謎の発光

3.1.1 木星

木星とは、太陽系最大の惑星で、質量は地球の 318 倍あり、太陽系のほかの惑星の総質量と比べても 2.5 倍ある巨大惑星である。岩石と氷でできた核を持ち、その周りを厚い水素の層が覆っている。その水素の層は高い圧力により金属化しているとされている^[14]。表面には、水素やヘリウムを主成分とした大気層が存在し、大気の流れによって巨大な渦である大赤斑や地上の望遠鏡からも確認できる顕著な縞模様を形成している。質量のほとんどをガス成分が担っているためガス惑星と呼ばれている^[14]。



図 3.2 : ボイジャーが撮影した木星^[16]

3.1.2 木星の衛星

木星の衛星は 67 個あり、その中でもサイズの大きい 4 つの衛星をガリレオ衛星と呼び、木星に近いものから、イオ、エウロパ、ガニメデ、カリストと呼ぶ。その大きさと質量は木星の衛星の中でも群を抜いて大きく、木星の衛星の総質量のほとんどをガリレオ惑星が占めている^[15]。

ガリレオ衛星である、イオ、エウロパ、ガニメデ、カリストはさまざまな個性を持ち、多彩な表層状態・地質活動が見られる。イオは激しい火山活動を持ち、表面が常に塗り替えられている衛星である。エウロパは表面が主に H_2O からなる氷でできていて、無数のひび割れや断層に覆われている衛星である。ガニメデは木星最大にして太陽系最大の衛星であり、大規模な断層に覆われた比較的新しい地域と衝突クレーターが埋め尽くす古い地域で二分される。カリストは全面が衝突クレーターに覆われ、地質活動が不活発な衛星である。

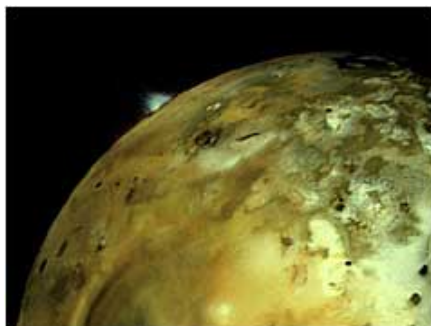


図 3.3 : ボイジャーが撮影した衛星イオの活火山^[15]

3.1.3 観測内容

東北大学、JAXA 宇宙科学研究所、国立天文台などの研究者を中心とする研究チームは、すばる望遠鏡とハッブル宇宙望遠鏡を用いた観測により、ガリレオ衛星が木星の陰に入り太陽光に直接照らされていない食の状態であるが、わずかに輝いているという現象を観測した。

今回の観測ではもともと「宇宙誕生直後の遠方宇宙からわずかな光を捉える」という目的で行われていた。すばる望遠鏡に搭載された近赤外分光撮像装置 IRCS と補償光学装置、ハッブル望遠鏡を用いて、真っ暗であるとされる食中のガリレオ衛星を観測し、背景の明るさと厳密に比較し、遠方宇宙からのわずかな光を捉えるといった観測であった。その際、真っ暗と思われていた食中のガリレオ衛星であるガニメデとカリストが予想に反してわずかに光を発していることが観測された^[16]。

3.1.4 観測成果

太陽光に直接照らされていないガリレオ衛星が光る原因として最有力とされていることが、木星の上層大気に存在するもやによって散乱された太陽光が、影のなかにあるガリレオ衛星を照らしているのではないかということである(図 3.4)。月が地球の影に完全に隠れる皆既月食と同じようなことが起きているのではないかということである。木星の縞模様を作っている雲について完全に理解されていないが、このような衛星の月食の観測から木星のもやを観測的に探ることができる可能性が浮上した^[16]。

この現象のガリレオ衛星をスクリーンと考えたと木星大気を透過した光を観測していると考えられることもできる。太

陽系内の透過光を調べることは新しいことである。太陽系外の惑星の大気を調べる時、惑星が主星の前を遮った際の減光を調べる手法であるトランジット観測を太陽系内の惑星に適用していることと同じである。この方法で太陽系内の惑星の大気を詳しく調べることによって、太陽系外の惑星の大気をさらに詳しく調べることができるであろう [16]。



図 3.4 : ガリレオ衛星の謎の発光について [17]

3.2. 土星の衛星の発見

3.2.1 土星

土星とは、太陽系で 2 番目に大きい惑星であり、大きく目立つ輪を持つことで有名である。木星と同様に、水素やヘリウムを主成分とした大気が存在し、水素の層と岩石などからなる中心核を持っているが、木星ほど高密度に圧縮されていないため木星よりも密度が小さい。

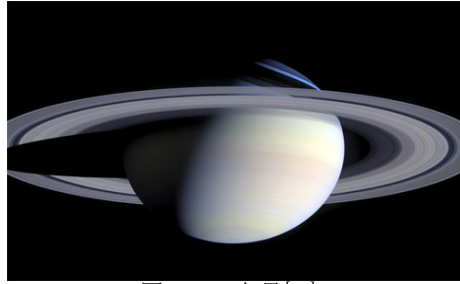


図 3.5 : 土星^[18]

3.2.2 土星の衛星

土星の衛星は 60 個以上あり^[14]、この中でもおおきな 7 衛星を内側から順にミマス、エンセラダス、テティス、ダイオーネ、リア、タイタン、アイアペタスと呼ぶ。土星系の大型衛星は、重力が大きい、平均密度がほぼ純粋な H_2O 氷に近いものや、岩石成分の混合比が 50 重量%を超えるもののようさまざまな特徴を持つ。土星の衛星の中でもタイタンは衛星総重量の 9 割以上を占めていて、太陽系最大級の衛星である。また、タイタンは地表に液体をたたえていて、生命自体も存在している可能性がある天体とされている^[14]。

3.2.3 観測成果

ハワイ大学のデービッド・ジューイットらの研究チームはすばる望遠鏡、ケック望遠鏡、ジェミニ北望遠鏡をもちいて土星の衛星を 12 個発見した。その後、すばる望遠鏡を用いてさらに土星の衛星を 9 個発見した。

発見された衛星の中で土星の自転と逆向きに回る逆行衛星は 19 個発見されている^{[18][19]}。逆行衛星の起源に関する理解が一層深まるとされている^[18]。

3.3. 彗星とは

彗星は、太陽系内小天体の中で恒星状でないもの、つまり点源の周りに「拡散した成分」をもつものとして観測的なみかけの形状に関して定義されている^[20]。本体の大きさは数キロメートルから数十キロメートルであり、構造は核、コマ、尾に大きく分けられる。核の成分は、80%は水、残りの20%は二酸化炭素、一酸化炭素であり、微量成分は炭素、酸素、窒素に水素が化合した種々の分子が含まれ、砂粒のような塵が混ざっているので、彗星は「汚れた雪だるま」と呼ばれている。コマは、核が太陽に近づいて熱せられて表面が蒸発し、そのガスが核の周りに大きく広がって薄い大気となったものである。尾は、太陽放射圧や太陽風によって彗星から放射された塵やガスが吹き流されたものである。尾には、「塵の尾」と「イオンの尾」の2種類あり、「塵の尾」は彗星から放出された塵が流されたもので、「イオンの尾」はイオン化したガスでできており、太陽風によって反太陽方向に直線上に伸びたものである。(図 3.6)

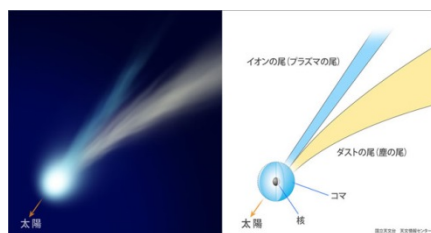


図 3.6：彗星の模式図^[21]

また、彗星は特異な軌道をたどっており、公転軌道は細長い楕円のものが多いが、放物線や双曲線を描くものもある。放物線や双曲線の軌道の彗星は一度現れたら二度と帰ってくることはない。彗星は周期によって分類され、周期

が約 200 年以下の楕円軌道をもったものを短周期彗星、周期が 200 年以上の放物線や双曲線軌道をもったものを長周期彗星と呼ぶ。現在までに短周期彗星は 160 個あまり見つかっており、いつ・どこに現れるかが予測できるため観測はしやすいが一般的に暗い。そして何度も太陽に近づいているため核が融かされ揮発成分が枯渇している。長周期彗星は、太陽に近づいたことが少なく揮発成分を保持している。出現の予測はできないがかなり明るく肉眼で観測できる。(図 3.7)

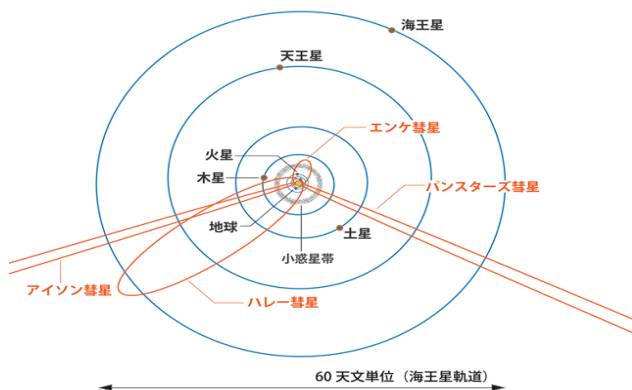
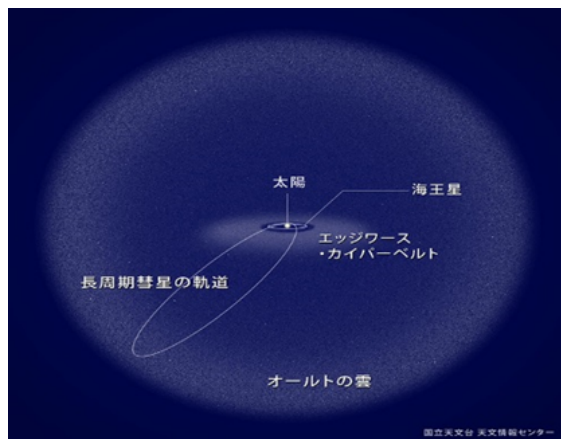


図 3.7 : 彗星の楕円軌道^[21]

彗星は太陽系誕生の現場であった原始太陽系円盤の中で形成された微惑星の残存物だと考えられている。約 46 億年前に希薄で低温の水素を主成分とするガス雲の特に濃い部分（分子雲コア）が自己重力により収縮して中心に原始

太陽が形成された。彗星は 46 億年前の太陽系誕生時の母体である分子雲の情報を記憶しており、彗星を観測することで誕生時の太陽系の環境を調べることができる。彗星の供給源としては「オールトの雲」と「エッジワース・カイパーベルト」の二つが考えられている。太陽から遠い場所にあった氷と塵によってできた氷微惑星のうち、大きく成長した惑星によって太陽系の外側に散らされたものがオールトの雲(図 3.8)、海王星より外側の領域で惑星の成長途中で取り残されたものがエッジワース・カイパーベルト(図 3.9)である。長周期彗星は黄道面とは無関係な分布をもち、いろいろな方向から太陽付近にやってくるように見えるため、太陽の外側・太陽から数万天文単位付近をぐるりと大きく球殻状に取り囲む氷微惑星の集まりであるオールトの雲が長周期彗星の起源であると考えられている。短周期彗星の軌道面は黄道面に沿って分布しており、エッジワース・カイパーベルトは氷微惑星が海王星軌道の外側に黄道面に沿った軌道で分布している場所なので短周期彗星の起源と考えられている。



図：3.8 オールトの雲^[21]

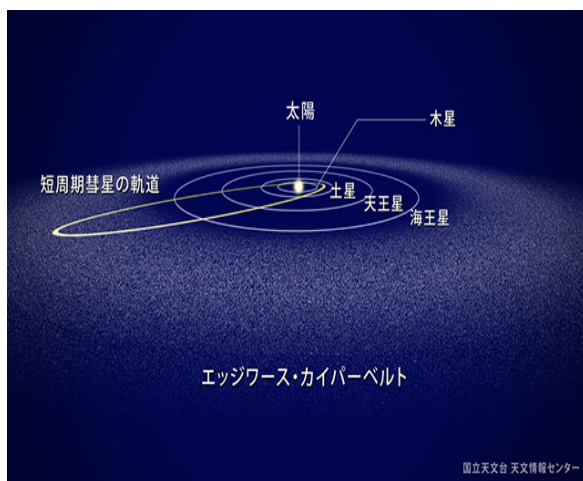


図 3.9：エッジワース・カイパーベルト^[21]

3.3.2 彗星の観測方法

彗星のような太陽系の天体は地球からたいへん近いところにあるため、天体自身が運動している影響が大きく現れ、天球上でのみかけの速度はかなり速くなる。よって、すばる望遠鏡では「非恒星追尾」という方法で望遠鏡を動かし彗星を追尾する。

「恒星追尾」は、恒星の日周運動に合わせて望遠鏡を駆動させ、恒星追尾をする。銀河系内の天体や系外銀河の場合、望遠鏡を恒星追尾させれば同じ天体に対して長時間の露出が可能のため、より暗い天体まで捉えられる。

「非恒星追尾」は、地球と天体の相対的な動きから移動天体の単位時間における移動量を見積もり、予想される天体の位置にそって望遠鏡を動かしながら観測を行うものである。

3.3.3 すばる望遠鏡が観測した彗星



図 3.10：2000 年 1 月 8 日、カセグレン焦点に取り付けた調整用可視光カメラ CAC により、また 6 月 17 日にナスマス焦点に設置した近赤外線カメラ CISCO によって、リニア彗星の観測に成功した^[22]。

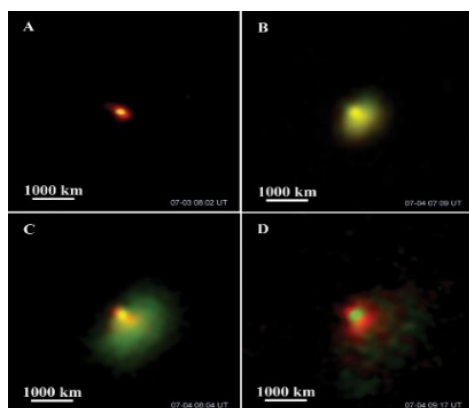


図 3.11：2005 年 7 月 4 日、東京大学と国立天文台を中心とした日本・アメリカ・台湾の国際共同研究チームがすばる望遠鏡を用いてディープインパクト探査機とテンペル第一彗星の衝突を観測した^[23]。

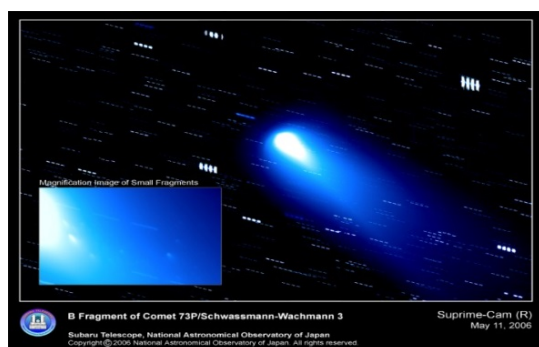


図 3.12：2006 年 5 月 12 日、国立天文台ハワイ観測所の布施哲治さんをはじめとする研究チームがシュヴァスマン・ヴァハマン第 3 彗星の本体（核）の一つが崩壊しつつある様子を観測した^[24]。



図 3.13 : 2010 年 9 月 17 日、総合研究大学院大学の内海洋輔さんらの観測チームが **Suprime-Cam**(主焦点カメラ)によってハートレイ彗星を観測した^[25]。

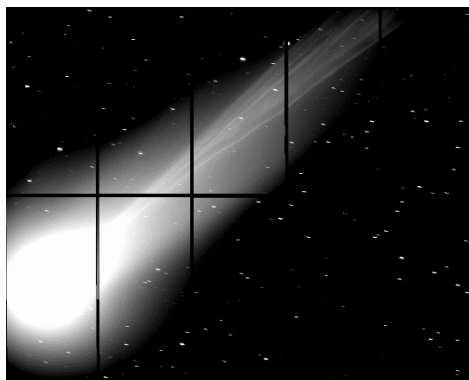


図 3.14 : 2013 年 12 月 3 日、ニューヨーク州立大学や国立天文台の研究チームがすばる望遠鏡に搭載された主焦点カメラ **Suprime-Cam** でラブジョイ彗星を撮影した^[26]。



図 3.15 : 2013 年 10 月 19 日・21 日、東北大学の大坪貴文さんらの研究チームがすばる望遠鏡の冷却中間赤外線分光撮像装置 COMICS を用いて中間赤外線という波長でアイソン彗星を観測した^[27]。

➤ 観測 1 : リニア彗星

<リニア彗星とは>

リニア彗星は遠日点（太陽からもっとも離れる位置）が木星軌道の内側にあり、周期 5.1 年という短い彗星である。1999 年 9 月 27 日にアメリカ・リンカーン研究所の地球接近小惑星探査プロジェクトによって初めて発見された^[22]。

<すばる望遠鏡の観測成果>

2000 年にすばる望遠鏡のカセグレン焦点に取り付けた調整用可視光カメラ CAC とナスミス焦点に設置した近赤外線カメラ CISCO によりリニア彗星の撮影に成功した^[22]。

2001 年には国立天文台、高分散分光器 HDS 開発グループ、および県立群馬天文台の職員からなる観測チームによ

って、すばる望遠鏡の高分散分光器 HDS を用いてリニア彗星の分光観測を行った^[29]。分光観測によって得られるスペクトルのうち、彗星の周囲のガスに含まれる窒素原子 1 個と水素原子 2 個からなる NH_2 分子が発する輝線に注目した。 NH_2 分子は彗星の核を構成する凍った NH_3 分子が太陽の熱で解け、ガスとなった際に赤外線などにより水素原子が一つもぎとられたと考えられていたため、 NH_2 分子が発する輝線を観測すれば NH_3 分子の情報が得られるのである。

NH_2 や NH_3 のような水素原子を 2、3 個含む分子はオルソ状態とパラ状態のものが存在し、この存在比は周囲の環境によって異なる。彗星の核のように氷結したものは凍りつく前の比率がそのまま保存されているためオルソ状態とパラ状態の分子の比を求めれば凍りついた時の温度が推定できる。

オルソ状態とパラ状態の分子はそれぞれ異なる波長の輝線を発し、その波長は非常に近接しているため見分けるのが難しい。そこですばる望遠鏡の高分散分光器 HDS を用いてスペクトル上で接近した輝線群を分離することに成功した。分離に成功した NH_2 分子の輝線群をモデル計算方法によって再現しオルソ状態とパラ状態の存在比を求めた。そしてその値から NH_3 分子のオルソ状態とパラ状態の存在比を求めリニア彗星の核を構成する NH_3 分子の氷結温度が $28 \pm 2 K$ であることを導き出した。この値は太陽系が形成された原始太陽系星雲内においてリニア彗星が土星の軌道から天王星の軌道領域で生まれたことを示している。原始太陽系星雲とは、原始太陽系円盤になる前に分子雲コアが収縮している段階のガスや塵のことである。

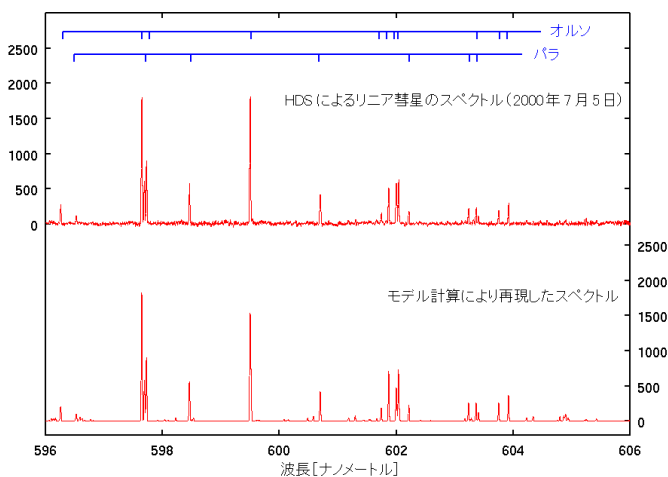


図 3.16 : HDS による分光観測から得られたスペクトルとモデル計算により再現されたスペクトル[28]

また、2003 年にはすばる望遠鏡ではナスミス焦点に取り付けられた近赤外線カメラ CISCO を用いてリニア彗星の分光解析を行い、彗星核を包むコマの中に水の氷粒が存在することを発見した^[29]。彗星核は太陽系が誕生した時に存在していた微惑星の生き残りだと考えられており、その微惑星は星間あるいは原始太陽系星雲中にあった氷ダストが集まってできたとされることから彗星核中の氷を調べることによって太陽系形成期の物理環境を知ることができる。リニア彗星は、太陽に近づくほど明るくなり観測はしやすくなるが、太陽の熱で彗星コマ中の水の氷粒が蒸発し観測できなくなってしまうため、なるべく太陽から離れたところで観測する必要がある。

そこで、今回観測されたリニア彗星は太陽から約 3.5 天

文単位という非常に遠い距離にあったが、すばる望遠鏡の口径 8.2m 鏡の「大きな集光力」と水の氷粒が存在する非常に狭い領域だけを取り出せる「高い空間分解能」によって観測の成功を導いた。

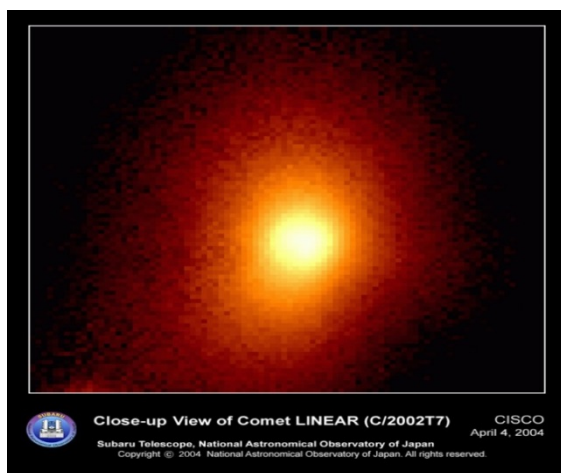


図 3.17 : CISO で撮ったリニア彗星 [29]

➤ 観測 2 : アイソン彗星

＜アイソン彗星とは＞

アイソン彗星は 2012 年にベラルーシのヴィタリー・ネフスキーとロシアのノヴィチョノクによって国際科学光学ネットワークの 40 センチメートル反射望遠鏡を用いてはじめて観測された^[31]。アイソン彗星は太陽に極端に近づく軌道をもっている。近日点通過の際に彗星本体が分裂したり崩壊したりして姿を消す可能性があり、近日点通過後も元の姿をとどめるか否かは彗星本体の大きさやもろさに関

係する。よって、どのような姿で観測できるかは予測が難しいのである。

＜すばる望遠鏡の観測成果＞

2013 年 10 月 19 日・21 日、東北大学の大坪貴文さんらの研究チームがすばる望遠鏡の冷却中間赤外線分光撮像装置 COMICS によって中間赤外線という波長でアイソン彗星を観測し撮影に成功した^[27]。(図 3.15)

2013 年 10 月 31 日、国立天文台の八木雅文さんがすばる望遠鏡に搭載された微光天体分光撮像装置 FOCAS によってアイソン彗星の姿を捉えることに成功した^[32]。(図 3.18)

2013 年 11 月 5 日、国立天文台の宮崎聡さんがすばる望遠鏡の超高視野主焦点カメラ Hyper Suprime-Cam によってアイソン彗星を捉えることに成功した^[32]。(図 3.19)

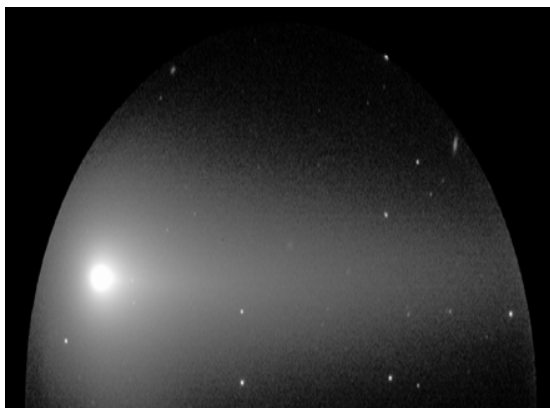


図 3.18 : FOCAS による撮影^[31]

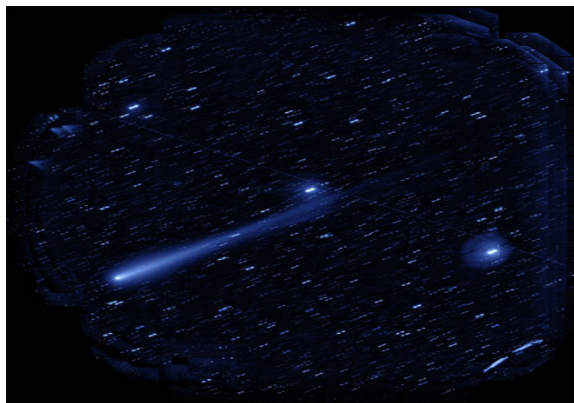


図 3.19 : Hyper Suprime-Cam による撮影^[32]

2013 年 11 月 15 日、京都産業大学の研究チームによってすばる望遠鏡に搭載された可視光高分散分光器 HDS を用いて、急激な増光が始まった直後のアイソン彗星の観測に成功した^[33]。同じく HDS によって観測された他の彗星のスペクトルに比べてガスの輝線の本数が非常に多く、***C2, NH₂, H₂O⁺, O, Na***などのガス輝線が検出された。特に今回観測されたスペクトルにはナトリウム原子の非常に強い輝線が含まれていた。ナトリウム原子は彗星に含まれる塵から蒸発して出てくると考えられているが、観測当時のアイソン彗星の塵による反射光は弱くこの考えには沿わないため、ナトリウム原子の生成において新しい知見が得られる可能性がある。

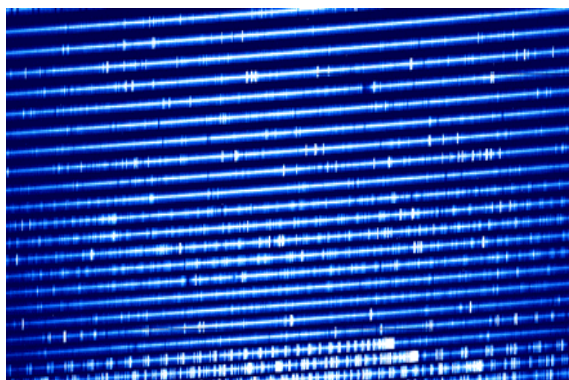


図 3.20 : 急増光中のアイソン彗星の
可視光高分散スペクトル[33]

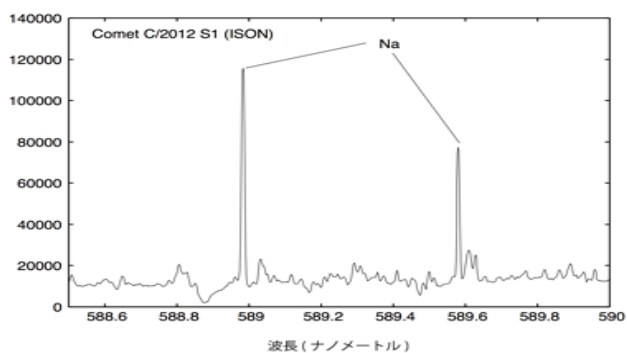


図 3.21 : アイソン彗星のスペクトルの一部（縦軸：
強度）[33]

同時に、 $^{15}\text{NH}_2$ (アミノ・ラジカルの窒素同位体)の検出

に成功した^[35]。 $^{15}\text{NH}_2$ は彗星に含まれる窒素の担い手であるアンモニア分子の由来を知る上で手がかりとなる物質である。今回の観測で彗星の窒素同位体比は太陽や地球大気に比べて ^{15}N がより多く濃集していることがわかった。彗星のさまざまな分子に含まれる同位体の存在比は太陽系の元となった物質の化学的な進化を知るうえで重要な手がかりである。彗星の窒素同位体比 $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$ (~ 150)は、地球(~ 272)や太陽(~ 441)で得られた値に比べて小さく、 ^{15}N が濃集していることは知られていた。しかしその原因は不明であった。そこで窒素原子の担い手である NH_3 (アンモニア)の窒素同位体比を明らかにすることでどのような環境でこのような小さな窒素同位体になったのかを探ろうと試みた。

アンモニアは特定の波長の赤外線や電波を出したり吸収したりするが、その強度は非常に弱いため特にアンモニアの窒素同位体である $^{15}\text{NH}_3$ の直接測定は難しい。そこで NH_2 (アミノ・ラジカル)に着目した。彗星のコマは太陽紫外線によりアンモニアのほとんどが壊されて NH_2 になるので、 NH_2 の窒素同位体比を求めることでアンモニアの窒素同位体比を推定できるというわけである。また NH_2 は可視光域で容易に観測できるため、 $^{15}\text{NH}_2$ の検出にも望みがあった。そしてついにすばる望遠鏡に搭載された HDS によるアイソン彗星の観測によって $^{15}\text{NH}_2$ の検出に成功した。また同時に観測された $^{14}\text{NH}_2$ の輝線と合わせて窒素同位体比($^{14}\text{NH}_2/^{15}\text{NH}_2$) $\sim 139 \pm 38$ を得た。

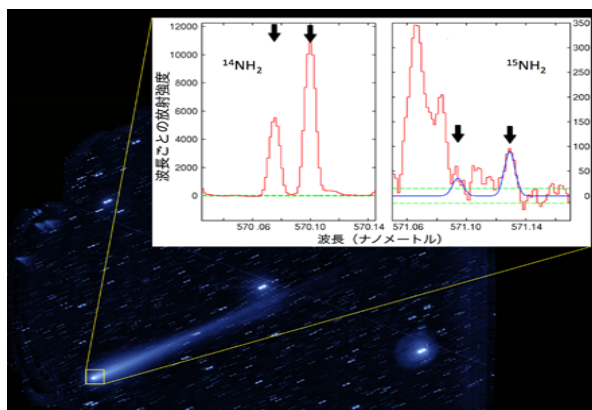


図 3.22 : アイソン彗星の NH_2 輝線のスペクトル^[34]

太陽系は分子雲で形成された物質が元となって作られたと考えられており、太陽系形成時の情報を持っている彗星に含まれた物質の起源を語るには惑星系誕生のもともとの母体である分子雲との比較をしなければならない。アンモニア分子における分子雲環境と彗星との窒素同位体比を比較してみると異なる値を示した。

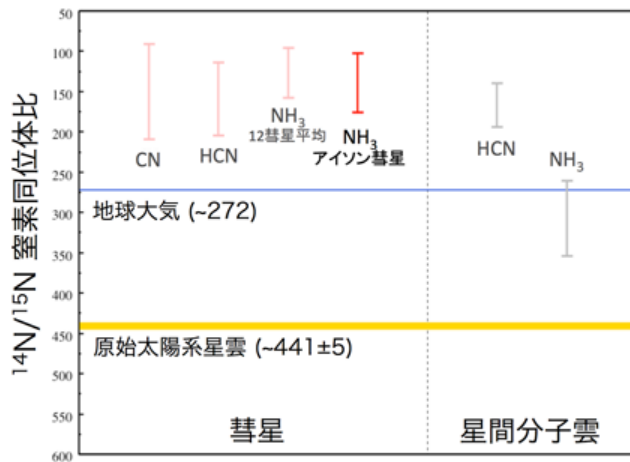


図 3.23 : 彗星と星間分子雲から得られる
分子ごとの窒素同位体比^[34]

これらの結果より、彗星に含まれるアンモニア分子の形成環境は分子雲のガス中ではなく、分子雲に含まれる低温の塵の表面である可能性が出てきた。アンモニア分子が低温塵の表面で形成されたとするならば、アンモニア以外にも生命の起源と関連した複雑な分子が彗星に含まれていて、彗星が地球にこれらの分子を持ち込んだとも考えられる。

第4章 すばる望遠鏡による観測結果 (銀河系外)

担当

東邦大学理学部物理学科 ようこ

東邦大学理学部物理学科 みゆき

銀河系外とは、3章で述べた銀河系の外側のことである。銀河系外には銀河の集まりである銀河団やクエーサーが広がっている。すばる望遠鏡の口径 8.2 メートルもの大きなレンズによってこのような遠方の宇宙を観測することが可能である。以下では銀河系外のすばる望遠鏡による観測について述べていく。

4.1 アンドロメダ銀河ハロー

4.1.1 アンドロメダ銀河とは



図 4.1 : アンドロメダ銀河^[35]

アンドロメダ銀河とは、大きさが最大で銀河系から 250 万光年の距離に存在し、アンドロメダ座に位置する渦巻銀河である。銀河系とアンドロメダ銀河の二つの銀河を中心に半径 300 万光年ほどの範囲により小型の銀河（三角座銀河、銀河系、大マゼラン銀河、小マゼラン銀河など）が約 40 集結し重力的に結びついた「局所銀河群」を形成している。ここで銀河群とは 3 個以上、50 個未満の銀河の重力集合体をさす。このように銀河同士の衝突などの過程を経て今日のアンドロメダ銀河となった。

銀河中の星同士の衝突は、普通の物体同士の衝突とは全く異なり、銀河は密度が低いいため、激しく衝突したとしても、銀河同士が衝突するような破壊的衝突は起こらない。不規則銀河やクエーサーのようなものが存在する原因は銀河同士の間に働く潮汐力と銀河同士ぶつかり合うときの速度が関係している。

この潮汐力は重力の差によって生じる。地球で例えると太陽と月のように 2 つの物体に引かれている状態のことである。潮汐力が大きいと天体は粉々になってしまう。

銀河系は過去に衝突した痕跡があり、その相手はアンドロメダ銀河であるという仮説がある^[36]。その仮説はおおよそ 100 億年前の銀河とアンドロメダ銀河の衝突によって、局所銀河が形成されたとするものだ。内容は原子銀河系と原子アンドロメダ銀河は、破壊的な潮汐力の影響を受けることなく衝突したが、ハロー部分が触れ合い、その影響で局所銀河群を構成する小銀河が誕生した。衝突後、二つの銀河はその近傍に矮小銀河の元となる塊を撒き散らしつつ円軌道を取って遠ざかり現在の位置に至ったわけだが、軌道計算によると、おおよそ 40 億年前の位置を最遠として、現

在再び急速に接近しつつあるというものだ。

このような銀河の過去の合体過程は、恒星ストリームと呼ばれる恒星のかたまりで発見されることが多い。恒星ストリームとは矮小銀河などの小銀河が大きな銀河である銀河系やアンドロメダ銀河の重力ポテンシャルの中に落ちながら軌道運動する際に、潮汐力によって長く引き延ばされた形に恒星が集まっている構造をいう。ストリームの中の恒星はみな同じような速度をもって集団運動をする。

ハロー内の星は、円盤部分にある恒星とは異なる元素組成と空間運動を持ち、銀河の形成と進化過程に対してたいへん重要な情報を提供するものと考えられている。よって、銀河円盤を囲むハローの領域を調べることによって銀河同士の衝突銀河形成と進化の過程に関する情報を得ることができる。また銀河の中でも、アンドロメダ銀河は横向きになっており、ハロー部分を見やすい位置関係となっているためこの観測に適した天体である。しかし、アンドロメダ銀河は、銀河系に近く見かけの大きさが非常に大きいので、すばる望遠鏡に搭載されている広い視野をもつ

Suprime-Cam を利用して観測を行った。

4.1.2 すばる望遠鏡による観測結果

2010 年 1 月にアンドロメダ銀河のハローと呼ばれる銀河円盤を囲む領域に、かつての矮小銀河合体の痕跡と思われる恒星ストリームをすばる望遠鏡によって発見し、恒星ストリームの空間構造を同定することに成功した^[37]。

これまでに観測されていない北西方向短軸の領域に明確な 2 つの恒星密度が高い部分ストリーム E、F が発見され

た。また、長軸の領域にも恒星の非一様分布同定につながる測光観測をし、後に他の共同研究者のすばる望遠鏡の観測結果と組み合わせてストリーム S W という比較的薄い構造があることが判明した^[37]。

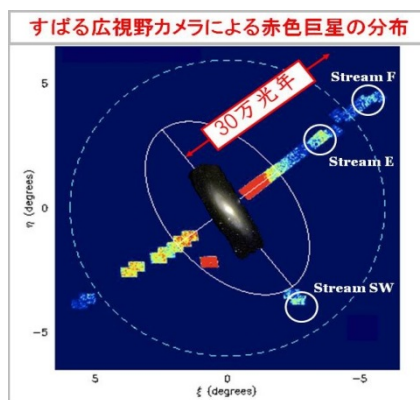


図 4.2：すばる広視野カメラによる赤色巨星の分布^[38]

上図のカラーマップは、赤が最も密度が高く、黄、青にかけて密度が低いように表されている。

4.1.3 その後の調査と考察

さらに、すばる望遠鏡によって見つかったストリーム構造について、ケック望遠鏡の分光装置 DEIMOS を用いて分光観測を行った。この分光装置によって個々の星のスペクトルを観測し、アンドロメダ銀河ハローの一般星の運動や手前に重なって見える銀河系の星の運動を区別して解析する。

その結果、ストリーム SW として見た領域では確かに星が集団で同じ様な運動をしていることが判明した^[37]。

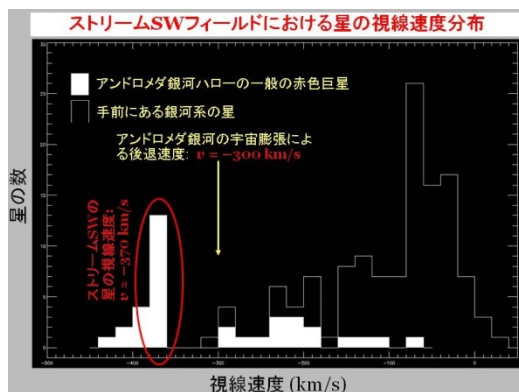


図 4.3 : ストリーム SW フィールドにおける
星の視線速度分布^[39]

これはどの星も同じ様な速度を持つ恒星ストリームの証拠である。矮小銀河が潮汐力で破壊されて引き延ばされたときに期待される空間運動である。

これらのストリーム構造は、銀河系やアンドロメダ銀河のような大きな銀河が、矮小銀河のような小さな銀河が集まってできたときの名残であると考えられ、標準的な銀河形成論で期待される、階層的な小銀河合体過程による銀河形成のシナリオを裏付けるものである。

4.2 矮小銀河 LEDA074886

4.2.1 銀河の形態

銀河にはさまざまな形のものがある。形態分類として有名なものとしてはハッブル分類であり、音叉図で表される。

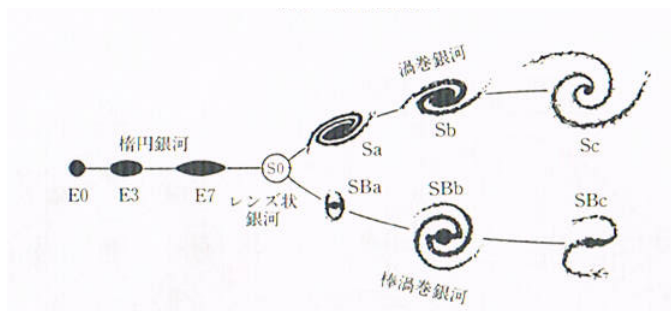


図 4.4 ハッブルの音叉図^[40]

この分類では左に楕円銀河(E)、右に渦巻銀河、中間にレンズ状銀河(S0)がおかれている。渦巻銀河は通常のもの(S)と棒渦巻銀河(SB)の2系列に分かれている。そして、この図では示されていないが、規則的な形をもたない不規則銀河(Irr)がある。

4.2.2 すばる望遠鏡による観測結果

2012年4月、すばる望遠鏡のSuprime-Camによって矮小銀河LEDA074886が発見された^[41]。エリダヌス座の方向、距離7000万光年の周囲の球状星団探索中に発見された。先ほど述べた銀河の形態の分類にはない長方形の形の矮小銀河である。この矮小銀河LEDA074886は、天の川銀河と比較して50分の1ほどしか星がない矮小銀河であ

る。

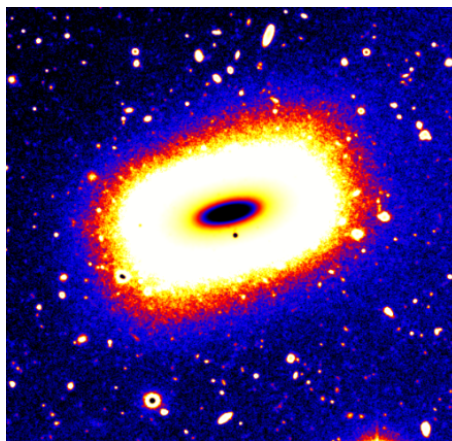


図 4.5 : 矮小銀河 LEDA074886^[42]

4.2.3 観測からの考察

矮小銀河 LEDA074886 の長方形という不思議な形について研究チームは、「厚みのある円盤状の銀河を横方向から見ているために長方形に見えているのではないか」と考えている^[41]。またこの銀河の生い立ちについては、「この銀河は 2 つの渦巻銀河の衝突でできた可能性があります。衝突する銀河の中に元々あった星々が長方形の対角線状にまき散らされた一方で、ガスは中央面に沈みそこで新たに星が作られたことで、結果としてこのような形になったのではないのでしょうか」と推測している^[41]。

4.3 重力レンズシステム SDSS J1004

4.3.1 重力レンズ効果とは

一般相対性理論において、重い重力場中では空間が歪み、その中を通過する光の経路は曲がることが知られている。これは遠方からの天体からの光が重力場の影響によって複数の異なる経路を通過する。この結果同一の天体に対して、見かけ上複数の分離した像が観測される。

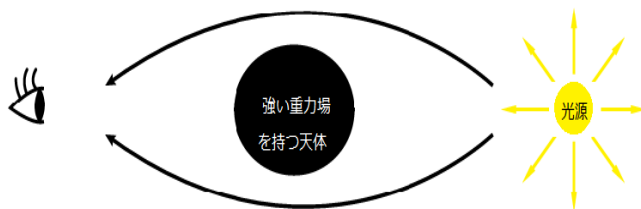


図 4.6 : 重力レンズ効果の概念図

4.3.2 すばる望遠鏡による観測結果

2003 年 12 月に観測された重力レンズシステム SDSS J1004 は、約 98 億光年の距離にあるクエーサーが、途中約 62 億光年の距離にある太陽質量の 300 兆倍の質量をもつ銀河団による重力レンズ効果を受けて 4 つの像をつくっているというものである(図 4.7)。

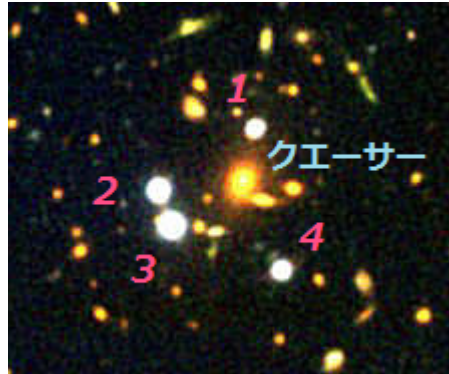


図 4.7：重力レンズシステム SDSSJ 1004 周辺^[43]

上図の中央赤い点がクエーサーで、周りに数字がふつてある白い点が重力レンズ効果による像である。

すばる望遠鏡の観測により、この像と同じ天球上にある銀河団を観測することができ、レンズ源を特定した^[44]。

また、重力レンズ効果によってできた像の間の距離は 14.6 秒角で、本来のクエーサーの位置で計算すると、最大像と像の間は 41 万光年離れたような 4 つの天体がみえていることになる^[44]。

4.3.3 観測からの考察

本観測より、今まで知られていた 80 個程度のクエーサー重力レンズの離角の記録を 2 倍以上更新した。これはいままでも知られていたクエーサー重力レンズは、どれも単独の銀河によっておこったものであるのに対して、この観測は初めて銀河団による重力レンズシステムの発見だからである。このような銀河団スケールの重力レンズは標準的な

暗黒物質モデルから、その存在を予言されていたが未発見のままで大きな謎であった。本観測結果は、この理論予言を初めて実証し、新たな種の重力レンズ現象の存在を確率したというおおきな科学的意義をもっているといわれている^[44]。

引用・参考文献

引用

[1]野尻抱影『星の方言集日本の星』中央公論社

[2]<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%A4%A9%E4%BD%93%E6%9C%9B%E9%81%A0%E9%8F%A1>

[3]<https://www.jsap.or.jp/>

[4]<http://subarutelescope.org/>

[5]http://subarutelescope.org/Introduction/j_telescope.html

[6]http://subarutelescope.org/Introduction/j_instrument.html

[7]http://www.naoj.org/Topics/2012/09/12/j_index.html

[8]http://subarutelescope.org/Introduction/instrument/j_HDS.html

[9]http://subarutelescope.org/Introduction/instrument/j_IRCS.html

[10]http://subarutelescope.org/Introduction/instrument/j_FOCAS.html

[11]http://subarutelescope.org/Introduction/instrument/j_COMICS.html

[12]http://www.nationalgeographic.co.jp/news/news_article.php?file_id=1945371

[13] http://spaceinfo.jaxa.jp/ja/milky_way.html

[14] 宮本英昭・橘省吾・平田成・杉田精司『惑星地質学』東京大学出版会

[15]http://www.jaxa.jp/article/interview/vol18/index_j.html

- [16]http://subarutelescope.org/Pressrelease/2014/06/18/j_index.html, K. Tsumura, et.al, “NEAR-INFRARED BRIGHTNESS OF THE GALILEAN SATELLITES ECLIPSED IN JOVIAN SHADOW: A NEW TECHNIQUE TO INVESTIGATE JOVIAN UPPER ATMOSPHERE”, 2014, The Astrophysical Journal, 789:122 (6pp)
- [17]http://www.nationalgeographic.co.jp/science/photos/photo_science.php?GALLERY_VignVCMId=aa5ee04f3e2b4110VgnVCM100000ee02a8c0RCRD
- [18]http://www.nao.ac.jp/nao_topics/data/000104.html
- [19]http://www.nao.ac.jp/nao_topics/data/000220.html
- [20] 渡部潤一・布施哲治『太陽系の果てを探る』東京大学出版会
- [21] <http://www.nao.ac.jp/astro/comet/>
- [22]http://subarutelescope.org/Pressrelease/2000/07/24/j_index.html
- [23]http://subarutelescope.org/Pressrelease/2001/11/01/j_index.html
- [24]http://subarutelescope.org/Pressrelease/2004/04/04/j_index.html
- [25]http://subarutelescope.org/Pressrelease/2010/10/21/j_index.html
- [26]http://subarutelescope.org/Topics/2013/12/05/j_index.html
- [27]http://subarutelescope.org/Topics/2013/10/22/j_index.html
- [28]http://subarutelescope.org/Pressrelease/2001/11/01/j_index.html

_index.html

[29]http://subarutelescope.org/Pressrelease/2004/04/04/j_index.html

[30]<http://www.nao.ac.jp/astro/sky/2013/ison.html>

[31]http://subarutelescope.org/Topics/2013/11/10/j_index.html

[32]http://subarutelescope.org/Topics/2013/11/17/j_index.html

[33]http://subarutelescope.org/Topics/2013/11/21/j_index.html

[34]http://subarutelescope.org/Pressrelease/2014/02/19/j_index.html

[35] http://spaceinfo.jaxa.jp/ja/andromeda_galaxy.html

[36] 半田利弘・金子隆一・望獲つきよ『面白いほどよくわかる宇宙の不思議』日本文芸社

[37] MIKITO TANAKA, et al, 2010, "STRUCTURE AND POPULATION OF THE ANDROMEDA STELLAR HALO FROM A SUBARU/SUPRIME-CAM SURVEY" THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 708:1168-1203

[38]<http://subarutelescope.org/Pressrelease/2010/01/15/fig2.jpg>

[39]<http://subarutelescope.org/Pressrelease/2010/01/15/fig3.jpg>

[40] 岡村定矩『銀河系と銀河宇宙』東京大学出版会

[41] ALISTER W GRAHAM, et al., 2012, "LEDA 074886: A REMARKABLE RECTANGULAR-LOOKING GALAXY" THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 750:121.

[42]<http://subarutelescope.org/Pressrelease/2012/03/19/f>

ig1.png

[43]<http://subarutelescope.org/Pressrelease/2003/12/17/f>

ig2j.jpg

[44] Naohisa Inada, et al, 2003,” A gravitationally lensed quasar with quadruple images separated by 14.62 arcseconds” Nature,426,810-812

参考資料

須藤靖『宇宙の大構造 その起源と進化』培風館

渡部潤一・井田茂・佐々木晶 『太陽系と惑星』日本評論社

吉岡一男・海部宣男『太陽系の科学』NHK 出版