

# STELLAR No. 29 LIGHT

ステラーライト

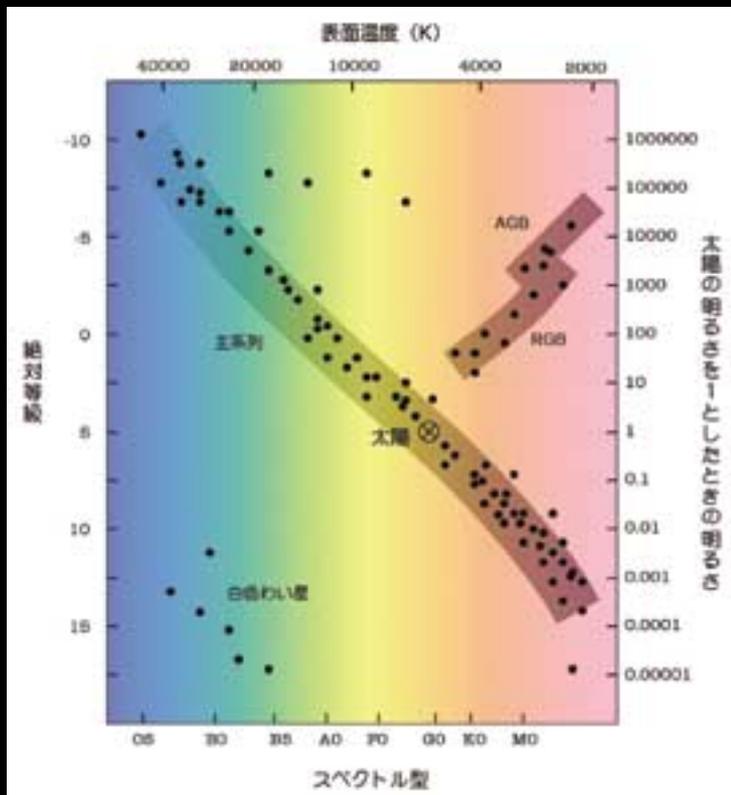


図1:ヘルツシュプルング・ラッセル図 (HR図)。恒星の表面温度を示す色指数を横軸に、絶対光度を縦軸にプロットしたもので、太陽などの多くの恒星は主系列と呼ばれる帯状の部分に分布する。これに対して、進化した赤色巨星はそこから外れた低温度で明るい星の部分 (Red Giant Branch: RGB) に位置する。そこからさらに伸びる特に低温度で明るい天体が分布する位置が漸近巨星分枝 (Asymptotic Giant Branch: AGB) と呼ばれる領域で、ミラ型変光星のような進化末期の天体がそこに分布する。(天体列伝: 驚異の変光星ミラ参照)



図2: GALEXが見たミラから延びた尾のような構造。右端の最も濃い部分の中にミラが存在する。その右端には、ミラからの放出物質と星間物質が作る、衝撃波の弓のような構造が見える。左に延びる尾の長さはおおよそ2°で、星間での移動や尾の形成を考慮すると3万年から50万年程度の時間に相当する。尾の密度や幅、そして向きの変化などに、質量放出の時間的変化や星間物質の状況などが反映されている。(天体列伝: 驚異の変光星ミラ参照、©NASA/JPL-Caltech)

台長室から ~世界天文年 (IYA)~

天体列伝 ~驚異の変光星ミラ~

天体観測入門 ~天体観測ってどうやっているの?~

天文台の素朴な疑問スペシャル ~今年のノーベル物理学賞って、宇宙の誕生と関係があるんですけど...!?~

GUNMA ASTRONOMICAL OBSERVATORY

県立ぐんま天文台

## 台長室から 世界天文年 (IYA)

台長 古在 由秀

ガリレオ・ガリレイという名前を知っている人は多いと思う。イタリア半島の西北海岸に、斜塔や大伽藍<sup>がらん</sup>で有名なピサという都市があるが、ガリレオはまだイタリアが統一国家でなかった時代のピサで、1564年に生まれた。ガリレオは1642年に亡くなるまで、物理学や天文学で大きな業績をあげたが、考案されたばかりの望遠鏡を最初に天体に向けたのがガリレオで、1609年のことである。

その望遠鏡の口径は4cmしかなかったが、これを月に向け、月面にクレータ、山、黒い色の海を見つけ、次の年には、ガリレオ衛星として知られている、木星の4つの明るい衛星を発見した。また、太陽の黒点を観測したし、金星に満ち欠けのあることも見いだした。金星の満ち欠けは、16世紀のなかばに発表されたコペルニクスの地動説を支持する証拠の一つとなった。

ガリレオが、天動説と地動説の学者の論争という形式で書いた名著『天文対話』は翻訳され、岩波文庫に収められている。そしてガリレオは次第に地動説を信ずるようになり、ローマ教皇庁の異端裁判にかけられ、有罪の判決を受けたが、「それでも地球は動いている」という有名な言葉を残したことは、よく知られている。

そして来年 (2009年) は、このガリレオの最初の望遠鏡による観測から数えて400年目にあたるので、国際天文学連合が提唱し、2009年を世界天文年 (International Year of Astronomy: IYA) として、多くの人たちの天文学への関心を更に高めてもらうための計画を進めている。これには、ユネスコや国連も賛同して、真に国際的な計画になった。

日本でも、世界天文年の国内委員会を組織し、活動を開始した。現在では星座などのもとになっているのはヨーロッパの伝説であるが、日本では特に東アジア諸国との協力関係を重視し、東アジアに残されている星の伝説を集めて、本を編纂<sup>へんさん</sup>することも考えられている。そのための研究会も予定されている。もちろんこのなかには、日本での伝説も重要な部分となるはずで、興味ある本ができそうだと期待している。

また、より多くの人に望遠鏡で天体を観測してもらおうと、1500円程度で買える小さな望遠鏡を製作する計画は、既に実現しており、これを望遠鏡の少ない発展途上国には寄贈する予定もあるが、日本でも売られ、望遠鏡での天体の観望を楽しんでもらおうとしている。

もちろん、既存の望遠鏡で更に多くの人たちに天体観望を楽しんでもらうということも考えられている。ぐんま天文台もこれに賛同し、今までやってきたような来館者のための天体観望にはさらに力を注ぎ、年明けの2009年1月4日には、IYAの幕開けを祝う夜間開館を行い、多くの県民の方に天体観望に参加して頂くための計画を持っている。ぜひ、多くの方が参加されることを期待している。

世界的なIYAの開始を記念する式典は、1月15～16日に、パリのユネスコ本部で開かれる予定である。



# 天体列伝

## 驚異の変光星ミラ

### 史上初の変光星

時間とともに明るさを変える恒星を変光星という。しかし、科学史においてそのような星が知られるようになったのは、それほど古い時代のことではない。人類が最初に認識した変光星、それがくじら座にあるミラである。今から遡ること約400年、1596年8月13日、ドイツ人の牧師ファブリツィウスがくじら座に見えない3等程度の星を見つけた。これが最初の観測であるという。ただし、この時は次第に暗くなってしまったために、突然現れては消えていく新星のひとつだと思われるらしい。当時、新星の現象は知られていたものの、変光星という概念は全く存在しなかった。それから数十年後、同じ位置に似たような星が繰り返し現れていることに気がついたのは、1638年にこの星を自ら観測したオランダの天文学者ホルワルダであった。1603年に発行されたバイエルの星図にくじら座 $\alpha$ （オミクロン）として記録されるなど、それ以前にも度々観測の記録が残されていたのである。同じ位置に似たような新星が次々に現れることは極めて不自然なことであり、これは新星ではなく、周期的に明るさを変える星がそこに存在しているのであると彼は結論付けた。人類史上初めての変光星の発見である。変光星の概念が全くなかった当時としては、驚異的な出来事であった。このため、ラテン語で「驚異」（英語では“wonderful”）を意味するミラという名前がつけられた。当時の指導的な天文学者であったヘヴェリウスがそう呼んだ結果であるという。最も明るい時は2等程度まで明るくなり、星座の中でかなりめだつ存在となる。しかし、暗い時には10等近くまでになり、肉眼では全く見ることができない。

### ミラ型天体とAGB天体

ミラの発見以来、この星によく似た変光星は他にも多数発見されており、最初の天体にならってミラ型変光星と呼ばれている。太陽程度の質量の恒星が最末期まで進化した天体で、惑星状星雲（後述）を形成する前の段階にあると考えられている。

中心部における水素の核反応は既に終了しており、その結果発生したヘリウムもさらに核反応を経て炭素と酸素に変化し、星の中心に中心核を形成している（図1）。この中心核では、密度が非常に高いために電子が

縮退して、縮退圧と呼ばれる圧力が発生している。電子はフェルミ粒子と呼ばれる素粒子の一種で、ひとつの物理状態（量子状態）には複数の電子が入ることができない。このため、ある程度以上に多くの電子を安定して詰め込むことはできないようになってきている。しかし、恒星の中心部などで極端に密度が高くなった場合には、存在可能な量子状態の総数よりも実際の電子の数が多くなってしまふことがある。このような状況にあることを縮退という。この時、過剰な電子が圧力を発生させる。これが縮退圧で、縮退状態にある限り圧力は温度に依存しない。したがって、中心核で電子が縮退していると、核反応を起こして高温・高圧にならなくても、恒星全体からの重力を縮退圧だけで支えることが可能になる。この中心核がミラ型天体の基本構造を決めることになるが、その直径は、地球と同程度かやや大きい程度の非常に小さなものである。

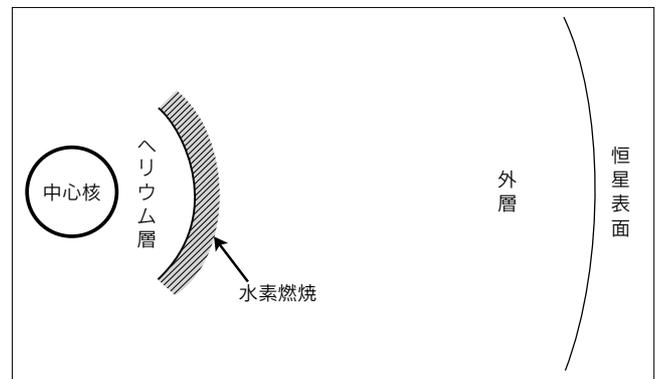


図1: ミラ型変光星の内部構造。中心核は炭素と酸素からなり、そこでは電子が縮退した状態にある。

中心核の外部はヘリウムの層が取り囲み、その外側は水素ガスを主体とした巨大な外層がさらに取り囲む。通常は、外層底部にある水素の核反応が主なエネルギー発生源となっており、発生したヘリウムはその下にあるヘリウム層に徐々に蓄積されて行く。そこに溜まったヘリウムの総量がある限度を越えると、激しいヘリウムの核反応が短期間発生し、そこから多くのエネルギーが発生する。これを熱パルス、あるいはヘリウム・フラッシュといい、時々発作的に繰り返し発生する。

このような状態にある天体の外層は非常に大きく広がり、典型的には太陽の数百倍まで広がった巨大な星となる。一方で表面の温度は低く、3000K程度あるいはそれ以下になる。温度は低くなるものの、大きく広

がった表面積は巨大で、全体の明るさは太陽の数千倍から一万倍程度にまで達する。見かけの上では、低温度の赤い色をした巨星、すなわち赤色巨星として観測される。恒星の表面温度を示すスペクトル型や色指数などを横軸に、絶対光度を縦軸にプロットしたヘルツシュプルング・ラッセル図 (HR図) の上では、太陽などの多くの恒星が主系列と呼ばれる帯状の部分に分布するのに対して、赤色巨星は、そこから外れた低温度で明るい星の部分に位置する (表紙図1)。ミラ型変光星のような進化末期の天体は、そこからさらに伸びる特に低温で明るい天体が分布する漸近巨星分枝 (Asymptotic Giant Branch: AGB) と名付けられた部分に分布するため、AGB天体と呼ばれることも多い<sup>1)</sup>。

## 恒星の最期と質量放出

AGB上に進化してミラ型天体となった恒星は、巨大で明るい星に姿を変えたものの、質量が増えた訳ではない。大気密度は極めて薄く、また表面での重力も非常に弱くなる。このため、大気は不安定になり、星全体が膨れたり縮んだりする脈動を繰り返すようになる。この脈動が明るさの変化の原因であり、ミラの場合331日程度の周期で脈動を繰り返す (図2)。極大時の明るさは最大2等程度、極小で9等程度であるが、その変動も大きく、1等近くまで明るくなることもあれば、極大になってもあまり目立たないようなこともある。

振幅の大きな脈動は大気を大きく押し上げ、勢い余った一部の物質は恒星の表面を離れ、星間空間に飛び出して行く。これを質量放出と言う。ミラのような天体の場合、一年間に太陽質量の $10^{-8}$ から $10^{-6}$ 倍程度の質量が放出されている。あまり大きな量に感じられないかもしれないが、 $10^6$ から $10^8$ 年すなわち百万年から1億年の時間がたつと太陽ひとつ分、つまりはその星が持つもともとの質量のほぼ全てに匹敵する量が星から失われることになる。これは、AGBにおける質量放出の時期を終えると、その星が消滅することを意味する。そして、この期間は、1億年から100億年以上の寿命を持つ星にとって決して長い時間ではない。むしろあつという間だと言うべきであろう。100億年の寿命を持つ太陽のような星にとって、100万年の時間は寿命の1万分の1、典型的な人間の寿命を100年とすると、その1万分の1は百分の1年、すなわち3日程度の時間に過ぎない。人間であれば生涯最後の数日にある状態、これがミラ型天体の姿なのである。

質量放出の結果、ほとんど全ての物質を宇宙空間に戻してしまうと、中心にあった高温の中心核だけがむき出しの状態になって残り、これが次第に冷えていく。白色矮星と呼ばれる天体である。白色矮星が十分に高

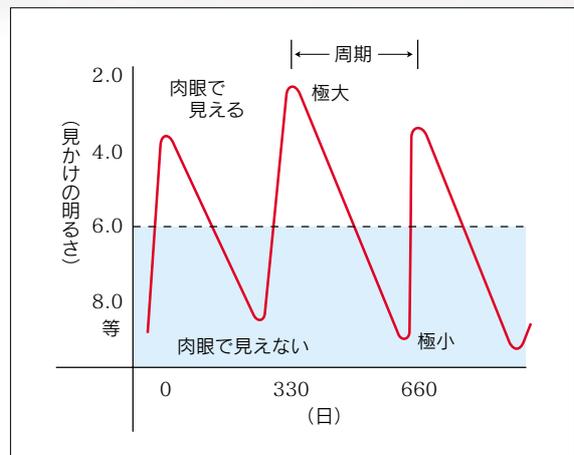


図2: ミラ型変光星の光度変化を示す模式図。光度の立ち上がりが早く、減光期間が長いのは、脈動の激しさをしめす指標だと考えられている。最大、最小光度や、変光の周期なども毎回微妙に変化する。

温である時期には、放出後に星の周辺にただよっていた物質が白色矮星からの紫外線に照らされて輝くことがある。これが惑星状星雲である。大きく広がっているために非常に目立つが、白色矮星が冷えていくことに加え、星周の物質も遠くへ拡散してしまうために、やがて見えなくなっていく。これで恒星の生涯は完全な終焉となる。

生涯の末期にある天体自身や質量放出をともなった進化の詳細については、まだ多くの謎が残されたままになっている。熱パルスにおける核反応の様子、すなわち、そこでどのように物質が生成され、それがどのような経路を辿って星の進化に影響を与えるのか、その実体はまだほとんど分かっていない。質量放出現象についてもまた然りである。脈動で大きく持ち上げられた物質が低温になり、そこで固体微粒子 (ダスト) が形成され、それに働く恒星からの放射圧が質量放出の原動力になっていると考えられているが、本当の物理過程は十分に理解されていない。特に、ダスト粒子の形成や熱パルスと質量放出の関係、あるいは恒星の進化に伴う放出率の変化などは現代でも未解決の重要問題とされている。

## 太陽の未来と生命の過去

質量放出を行う恒星末期進化の謎は、単独の恒星自身だけの問題にとどまらない。放出された物質は次世代の恒星の材料にもなるため、銀河スケールでの星々の輪廻と銀河の進化、そして多数の銀河で構成される宇宙全体の理解のためにも決して避けて通れない重要な課題なのである。放出された物質の中には、恒星内部の核反応で生じた様々な元素が含まれているため、必然的に宇宙の化学進化や物質循環、そして生命の起源の問題とも密接に関連している。

我々のように有機物質でできた生命にとって、炭素の起源は特に重要である。宇宙に存在する炭素の多くは、進化末期にある赤色巨星に由来している。ヘリウム層での核燃焼で発生した炭素の一部は、熱パルスと対流によって恒星の外層に運ばれる。中には炭素の量が非常に多くなって、炭素星と呼ばれる特異な化学組成の赤色巨星になるものもでてくる。そして、外層にある炭素は、他の元素とともに質量放出現象によって大量に宇宙空間に放出される。放出された炭素は巡り巡って、やがては次世代の恒星を生み出す材料として用いられるようになる。恒星が生まれれば、その周辺に惑星が誕生することは決して稀なことではないことが、最近の研究から明らかになっている。若い恒星の周りで惑星が誕生すれば、当然、赤色巨星に由来する炭素も新しい惑星に取り込まれることになる。取り込まれた炭素は、その惑星において鉱物などに固定される場合もあるであろうし、中にはダイヤモンドを形成するものもあるかもしれない。そして、一部の炭素は、生命の源である有機物質を構築し、それが生命の発生につながっていると考えられている。

我々、生命は有機物質を構成する炭素をはじめ様々な元素からつくられている。その多くは消滅しつつある恒星の中で作られ、それが質量放出の結果ここにたどり着いたものである。脈動する進化した恒星。これは太陽の将来（恐らく50億年後くらいに太陽もミラのような赤色巨星になることであろう）であるだけでなく、我々自身の昔の姿を見ていることにも相当する。このような天体の研究は、人類の過去を究極の意味で振り返る研究なのかもしれない。

ぐんま天文台においても、150cm望遠鏡を使った観測によって、生涯を終えつつある赤色巨星について、その残された進化の謎を解くための研究を進めている。炭素星における炭素同位体比率の測定や、AGB期を終え惑星状星雲に進化しつつある天体での元素量の測定などである。比較的最近開始した時間のかかる仕事である。紙面の余裕もないことから、ここでは詳細を述べることはできないが、いずれ興味深い結果を報告できる機会があるものと期待している。

### 質量放出と星周構造

進化したAGB天体から放出された物質は毎秒10km程度の速度で星間に広がっていく。遠くにある星周物質ほど過去に放出されたものであり、その空間分布には質量放出の履歴が残されていると考えられている。そこで、星周の放出物質の構造を観測すれば、そこから放出履歴を調べる研究が可能である。星から離れた物質の温度は非常に低くなるため、一般的には衛星を

用いた赤外線での観測が有効である。実際、赤外線天文衛星IRASや赤外線宇宙天文台ISOなどでこのような研究がなされてきた<sup>2)</sup> (図3)。



図3: 波長90ミクロンの遠赤外線で見えたAGB天体りょうけん座Y星の姿。大きく広がった星周ダストの構造と中心部に集中した強いダスト成分は、質量放出が連続的ではなく、1~2万年程度の休止を挟んで繰り返されていることを示している。

最近の観測からは、より複雑な状況を考慮する必要があることも分かってきている。例えば、赤外線の観測から、ミラ型変光星の一つであるうみへび座R星 (R Hya) には星から離れた低温のダスト層があり、これは過去の質量放出の名残で、熱パルスが関連しているのではないかと考えられていた<sup>3)</sup>。しかし、最新のスピッツァー宇宙望遠鏡 (Spitzer Space Telescope) による解像度の高い赤外線観測では、単純な低温ダストの塊ではなく、放出された物質が星間物質と相互作用を起こしたもっと複雑な状況を見ているのであるという<sup>4)</sup>。物質を放出しながら星間物質の間を星が動いていく過程で、放出物質と星間物質との間で衝撃波が発生しているというのだ<sup>5)</sup>。

そして、ごく最近、紫外線観測衛星GALEX (Galaxy Evolution Explorer) の観測によって、ミラから延びる彗星の尾のような形状の構造が発見された<sup>6)</sup> (表紙図2)。星から放出される物質と、星間物質が相互作用を起こした結果の構造だと考えられている。最初の発見から400年以上、これまでに様々な観測と詳細な研究がなされ、現代の我々には「見慣れた」天体となっていたミラではあるが、このような姿が紫外線で見られるとは誰も予想していなかった。21世紀の今日においてもなお「驚異」の天体であり続けているようである。

GALEXが見たミラ周辺の構造は、R Hyaで見られる星周構造と形態がよく似ている。やはり、星間物質と放出物質との相互作用がその成因であると考えられている<sup>7)</sup>。しかし、星間を動く速度が特に速いために、水素分子が衝撃波で加熱されたガスとの衝突によって励起され、誰もが予想さえなかった紫外線を放っているらしい。速度の遅いR Hyaでは似たような構造が赤外線で見られるものの、紫外線では検出されていない。ミラから細長く延びた構造は、星間を動く3万年から50万年程度の時間の中で形成されたものだと考えられている。そこには、この時間スケールでの質量放出

を伴うAGB天体の進化履歴と宇宙空間における星と周囲の状況の情報が含まれている。紫外線で観測されたのは高速移動故の特例かもしれないが、いまだに謎の多い恒星の末期進化の解明に大きく役立つことは間違いない。

一方で、星周構造の一般的な検出には赤外線がより適していることも忘れてはならないであろう。空間分解能を著しく向上させた最近の赤外線衛星による観測は、極めて有効な研究手段であり、今、最も有力なものが日本の「あかり」衛星(図4)である。実際、この種の観測は精力的に実行されている<sup>8)</sup>。これによって、恒星進化と星間の詳細な理解はさらに大きく進むことが期待されている。

### 大型望遠鏡によるミラ型天体の観望

大きく広がった巨星であっても、非常に遠くに存在するため、どんなに大きな望遠鏡を使ってもその形を見ることは難しい。いくら倍率を上げて、ひとつの点に見えるばかりである。一方で、望遠鏡の大きな口径に由来する集光力は、星を肉眼で見るよりも遙かに明るく見せてくれるはずである。

人間の目は、暗いところで色彩に対する感覚をほとんど喪失する。最も明るい幾つかの星を省けば、肉眼で星の色を判断するのは容易なことではない。しかし、望遠鏡を使えば、星を明るく見せることによって、人間の目でも、その色をはっきりと感知することが可能になってくる。

大型望遠鏡で見るミラ型天体の色は非常に赤い。肉眼で見える星に、それ程赤く見える星は存在しない。中でも、炭素星の色は特に赤く、幻想的ですからある。表面の温度がより低いことと、恒星の表面にある分子ガスが青や緑に見える光の成分を吸収しているためである。

大型望遠鏡を使えば、直視分光器というプリズムを使った簡単な道具を使って、星の光でつくられる虹、すなわちスペクトルを見ることも可能である。ミラ型天体の場合、赤く見える天体であるため、青い光や緑色の光などは弱く、赤い光が卓越している。雨上がりに見られる太陽の光でつくられた虹の七色とは大分違った雰囲気である。注意深く観察すると、ところどころに暗い影の存在が見えてくる。酸化チタンの分子ガスによる吸収線である。ここから、この星にはチタンや酸素が存在していることが分かってくる。さらに、このような分子が安定して存在していることから、その温度はあまり高くなく、3000K程度であることも推定できることになる。酸素に対して炭素が卓越している炭素星の場合、スペクトルの見え方は大きく異なる。



図4: 日本の赤外線天文衛星「あかり」。口径68.5cmの赤外線望遠鏡で、2006年2月に打ち上げられた。望遠鏡全体が液体ヘリウムと機械式冷凍機によって冷却されており長い波長の赤外線の観測が可能になっている。2007年8月以降、液体ヘリウムの枯渇により観測波長域が縮小したものの、現在も観測体制を継続している。上側は飛行中の想像図で、下側が打ち上げ前の実物の写真。傍らの人物はぐんま天文台の高橋英則博士。

る。酸化チタンの吸収はなく、その代わりに炭素分子やシアンなどの吸収線が影として見えてくる。低温であることに加え、このような吸収が影響して、炭素星は非常に赤く見えているわけである。

ぐんま天文台の150cm望遠鏡の場合、肉眼に比べて5万倍程度、あるいはそれ以上の光を集めることができる。この望遠鏡を使えば、一番暗くなった時であっても、ミラの赤い姿をはっきりと見ることができる。ミラ以外にも様々なAGB天体を楽しむことが可能である。その他のミラ型変光星としては、しし座R星、うみへび座R星、こと座R星、カシオペア座R星などが代表的なものである。Rと名付けられた星が多いのは、それぞれの星座で最初に発見された変光星に与えられる名前がRだからである。ミラの場合は、変光星の命名方法が確立される以前にくじら座o星の名前がつけられていたため、Rの称号は与えられていない。ちなみに、くじら座R星は存在しており、ミラとは別の暗いミラ型変光星である。ひとときわ赤い炭素星としては、うさぎ座R星、オリオン座W星、りょうけん座Y星、うお座TX星などが明るく美しい。望遠鏡の視野の中にポツカリと真っ赤な星が浮いているのは、何とも不思議な光景である。大型望遠鏡なればこそその楽しみ方である。ぐんま天文台の大型望遠鏡を使って、生涯の最期にある天体の赤い色を是非体験してみたい。

(専門員(観測普及研究員) 橋本修)

#### 参考文献

- 1) 橋本修 1996, 天文月報 89, 382
- 2) H. Izumiura et al. 1996, Astron. & Astrophys. 315, L221
- 3) O. Hashimoto et al. 1998, Astron. & Astrophys. 329, 213
- 4) T. Ueta et al. 2006, Astrophys. J. 648, L39
- 5) C.J. Wareing et al. 2006, Mon. Not. R. Soc. 372, L63
- 6) D.C. Martin et al. 2007, Nature 448, 780
- 7) C.J. Wareing et al. 2007, Astrophys. J. 670, L125
- 8) T. Ueta et al. 2007, AIPC 948, 365



# 天体観測入門

## 天体観測ってどうやっているの？

### 天文学者は星を眺めるか？

皆さんが参加される観望会が終わった後、天文台の職員が天文学研究のために望遠鏡を使って、天体観測をおこなっていることをご存知でしょうか？時々、「職員の人はこの後、朝まで星を見ているのですか？」といったことを、観望会終了間際に聞かれることがあります。実際、天文学者は望遠鏡でずっと星を眺めていると思っている人が多いようですが、実は望遠鏡で直接星を見たことのある天文学者は少ないかもしれません。ここでは、天体観測の研究が、実際どのように行われているか紹介したいと思います。



図1: 150cm望遠鏡の観望鏡

### 観望と観測の違い

週末の夜に行っている「観望」会では、皆さんにいろいろな天体を実際にご自身の目で見ていただいて、宇宙にはさまざまな天体が存在することや、はるか彼方の天体を見て宇宙の広がりを実感していただいています。一方、「観測」では、宇宙に存在している天体の種類は何種類あるのか？宇宙の広がりは何光年あるのか？といったことをできるだけ正確に「測定」することになります。できるだけ正確に測定するためには、「ものさし」のようなものが必要となりますし、その「ものさし」にはできるだけ細かい目盛りが必要で、細かい目盛りを読むための良い目も必要になります。このものさしは、日によって長さが変わるようなものでは困りますし、人によって違うものを使う場合は基準を決めなければ使い物になりません。実際、観望会の時に「この星は何色に見えますか？」と聞いても、返ってくる返事は「赤」「オレンジ」「いろんな色」、というように人によってまちまちな場合が多いのです。そこで、観測では様々な装置を使って、できるだけ正確な記録を残すことにより、誰もが同じ情報を共有できる

ようにします。そして、これらの情報を元に、その天体の正体を探ったり、宇宙の構造を調べたりすることになります。重要なのは、人の主観が入らない正確な情報ということです。そのため、観測には機械を使って星の光を調べることが大半で、直接自分の目で望遠鏡を覗いて観測することはあまりありません。初めて望遠鏡で天体観測を行ったガリレオなど、大昔の天文学者は実際に望遠鏡を自分の目で覗いて観測を行っていましたが、出来るだけ正確に記録を残すために、何度も同じ天体の観測を行い、スケッチなどを行っていました。現在でも、実際に自分の目で望遠鏡を覗いて星の明るさを測定したり、スケッチを行い天体の動きなどを調べている場合もありますが、このような観測でもきれいな絵であることよりも、より正確な情報であるということの方が重要なのです。

### 天体写真もデジカメで

このように、出来るだけ客観的に天体からの情報を残すためには、カメラを使うことが非常に有効です。特に、近年の天体観測では冷却CCDカメラを用いた観測が多くなっています。CCDカメラは普通のフィルムを使った銀塩写真と比べると、非常に感度が良いため、遥か彼方からやってくる淡い光をとらえる天体観測には威力を発揮します。加えて、CCDカメラによる撮影の方が、銀塩フィルムによる撮影よりも正確な情報を得ることができるのです。何となく、デジタル画像の方が手を加えやすいこともあって、銀塩写真の方が正確な姿を写していると思われがちですが、撮影の条件によってはCCDカメラの方がやってくる光の情報を正確に得ることが出来ます。その上、CCDカメラを使うと、撮った画像を即座に見ることができるという利点もあります。フィルムを使った撮影だと、いちいち現像しなければ実際に写っているかどうか分かりません。CCDカメラで撮った画像は、保管やコピーも簡単に行えます。このように、天体観測においてCCDカメラの開発が、劇的に観測の効率を上げることになったのです。ただし、CCDカメラでは常に電気信号があり、長時間の露出を行うとこれがノイズとなってしまいます。これを少しでも減らすために、天体観測ではCCDを冷やして使うのが一般的です。このような冷却CCDカメラは近年安価になったとはいえ、まだまだ大きなものは非常に高価ですし、使うにはパソコンなどのコンピュータも必要となります。

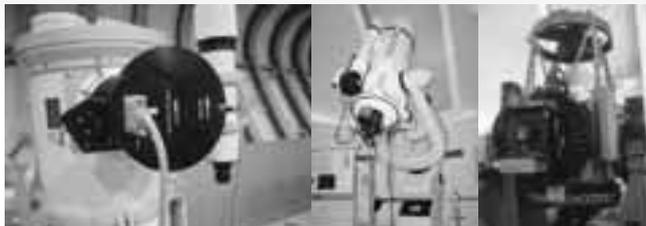


図2: ぐんま天文台の観察用望遠鏡、65cm望遠鏡、150cm望遠鏡に取り付けられているCCDカメラ

## 天体からの3種類の情報

天体観測では、CCDカメラなどを用いて天体からの光を正確にとらえることが重要ですが、実際、天体からの光にはどのような情報が含まれているのでしょうか？ 直接ロケットや人工衛星によって調べることができる地球近傍の惑星や衛星などを除くと、天体からの情報はやってくる光だけです。これを可能な限り細かく正確に測定することになります。それでは、光の測定とはいったい何を測るのでしょうか？ 私たちが星を眺めてどのような情報を得ているか考えてみるとわかりますが、その星の位置、明るさ、色の3種類に分けられます。星の位置は、赤道座標という天の北極を基準として地球の緯度、経度と同じように赤経、赤緯というものであらわされます。もともと星の明るさは、肉眼で見える星の中でもっとも明るい星のグループを1等星、もっとも暗いグループを6等星というように等級で表されていました。現在では、基準となる明るさが決められており、シリウスは $-1.5$ 等星、北極星は $2.0$ 等星といったように、少数点以下まで決めることができるようになっています。ただし、この等級も目で見た場合と写真に撮った場合で食い違うことがあります。写真では、人間の目より青い光に反応しやすいことから、同じ明るさに見える星でも、より青い星の方が明るく写るためです。そのため、等級を示す場合には、その等級がどの色を基準としたものか示すことが必要です。特によく使われるのは、 $B$ 、 $V$ 、 $R$ 、 $I$ という特定の色だけを通すフィルターを使って測定された明るさです。たとえば、オリオン座にある赤い色のベテルギウスは緑色を中心とした $V$ 等級では $0.6$ 等の明るさですが、青色を中心とした $B$ 等級では $2.4$ 等になってしまい、一方青い色のリゲルは $V$ 等級も $B$ 等級も約 $0.1$ 等です。そして、星の色はこの $B$ 等級や $V$ 等級の差で表すことができます。たとえば、青い星だと赤い星と比べて、 $B-V$ の引き算を行ったときに大きな数字になり、星の色を数値としてあらわすことができるようになります。しかし、青い色だけを通す $B$ フィルターを使っても、フィルターを通ってくる青い色にも幅があるため、より詳細な情報を得るためにはこれだけでは不十分なのです。そこで、星の色を可能な限り細かく分けて観

測する、分光観測というものが必要になります。皆さんよくご存じの、虹はよく七色に光が分かると言われますが、その色の境目ははっきりしているわけではなく、連続的に変化していきます。このように、分光観測では、プリズムや回折格子を使ってやってくる光の成分を連続的に分けてその色（波長域）ごとの光の強さを測定します。このようにやってくる光をさまざまな方法で数値として表し、できるだけ細かく正確に測定することで、可能な限りその天体の情報を得て、その正体に迫ることができるのです。

## 望遠鏡のご利用は計画的に

以上のように、天体からやってくる光をさまざまな手法で観測することによって、多くの情報を得ることができるようになります。もちろん、可能な限り多くの天体について、一度の観測で様々な色の強さを測定できるのが理想的なのですが、望遠鏡や観測装置、カメラなどの性能によって、一度に撮影できる範囲は限られますし、正確に測定できる明るさや色の範囲も限られたものとなります。そのため、観測といってもまずは何を調べるのか決めなければなりません。そしてその目的に合わせて、観測する天体や波長域を決めることになり、それによってどの観測装置を使うか決まります。観測する天体が決まると、その天体がいつごろ観測できるかを調べて、実際に観測を行う日の何時から何時まで観測できるかを調べておく必要があります。このようにして、観測計画を立て、実際に観測を行う日の観測天体について順番を決めておきます。その日にしか観測ができないような天体があれば、それが最優先のターゲットとなります。たとえば、ガンマ線バーストが起こった、といった連絡があれば、できるだけ早く観測しなければすぐに暗くなってしまいますので、まっさきに望遠鏡を向ける必要があります。それに、季節によって見える星座が変わるように、その時期に観測できる天体も限られており、特に、時間と共に西に沈んでしまう天体は、早く観測しないと「次の観測は来年」なんてことになってしまいます。南の低いところを通る天体も、観測できる時間が限られます。このような条件を考慮した上で、出来るだけ多くの天体を観測できるように観測の順番を決めておきます。突発天体があれば、まずそれを観測し、その後は西に沈んでしまうものがあるれば、それを観測し、その他の天体もできるだけ最も高い位置に来る南中前後に観測できるようにします。それから、天体の明るさや、研究の目的によって、それぞれの天体にどの程度時間をかけるかを検討しておきます。基本的に、明るい天体でしたら、すぐにすみますし、暗い天体は時間がかか



図3: オリオン座の写真。オリオンの左肩の赤い星がベテルギウス、右下の青い星がリゲル。

ります。もちろん、望遠鏡を向けてみるまで明るさが分からない場合もあります。このような場合は、なかなか計画を立てにくいのですが、暗すぎて観測できない場合も想定して、予備の天体も準備しておきます。貴重な夜の時間を無駄にしないで、効率よく観測できるかどうかは、この観測計画がしっかり立てられるかが鍵となります。

しかしながら、このように計画を立てても、予定通りに観測が進むことはほとんどありません。その主な原因は、その日の気象条件です。ターゲットの方向に雲があれば、他の天体を先にやることになりすし、薄い雲があつたり、シーイングが悪い場合には、当初の予定よりも余計に時間をかける必要が出てきたりします。実際の観測現場では、このように臨機応変な対応が求められますので、すべてを機械やコンピュータに任せるわけには行かないのです。

### 天気予報は当てにならない？

このように、観測を始めるまでに入念な準備を行ってきても、当然天気が悪ければ観測はできません。観測できる天気かどうかは観測の目的や、手法によって多少違います。たとえば、明るい月の分光データを得るのは、多少雲が多くても少し月が顔を出してくれば、すぐに得られますが、非常に暗い天体を探すような観測だと、雲がないことはもちろんのこと、風が強かつたりして、シーイングが悪いと難しくなりますし、満月の時には月明かりで空が明るくなってしまう、観測できない場合があります。ですから、天気予報でいくら晴れとなつていても、実際に観測できる天気かどうかは、その日の夜になつてみないと分からないのです。

ぐんま天文台での観測で、観測できるかどうかの条件が一番厳しいのは、赤外線での観測で、星が見えてい

ても雲があつたり、湿度が高いと大気中の水蒸気によって光が吸収、散乱されてしまつて地上までやってくる量が減つてしまい、赤外線ではほとんど見えなくなつてしまいます。

### 観測準備

観測の準備は日が沈むころから始めます。観望会が行われる日でも、行われない日でも日没前から、望遠鏡を外気温になじませるために、ドーム内のドアを開けて風を入れておきます。11mドームの展示パネルにも書いてありますが、ドーム内部と外気温に差があると、ドームスリットを開けたときに空気の流れがおき、星像が乱れてしまいピンボケのようになってしまいます。そのため、ドーム内は昼間も熱がこもらないようにしてありますが、巨大な望遠鏡では、本体の温度が外気温と同じになるには時間がかかるのです。

ここまで準備が整えば、後は暗くなるのを待つことになりませんが、その間も気象情報から目を離すことはできません。夏場の蒸し暑い日には、気温が下がると大気中の水蒸気が結露し、望遠鏡をぬらしてしまう可能性もありますし、冬場だと、北から風によって雪が飛んでくる場合もあります、このような場合には星が見えていても観測が(観望も)できません。

さて、18時を過ぎると(夏時間は19時)観望会が始まります、季節によっては観望会が始まった直後では、まだ空が明るく、明るい天体しか見えない場合がありますが、日没後1時間もすると空には星がたくさん見え始めます。そうなるといよいよ望遠鏡の本領発揮です、皆さんに様々な天体を見ていただきます。観望会中職員はずっと望遠鏡のそばにいて、皆さんに天体の解説を行ったり、隣の制御室から操作して、望遠鏡を天体に向けたりします。望遠鏡が天体に向いた後、最初に職員が覗きますが、雲に隠れていないか、ちゃんと目的の天体が視野の中心に来ているか、シーイングは悪くないか、ピントは合っているか、などを確認するためです。それ以外に、じっくり星を眺めることはありません。このように、観望会中はドーム内に職員も含め、大勢の人がいるわけですが、観測が始まるとドーム内に人が立ち入ることはほとんどありません。望遠鏡を他の星に向けるときに、ちゃんと動いているか、何か障害物があつたりしないか、といった確認のために見るくらいです。実は人間も体温があるため、ドーム内に一人でも人が居るとそれが熱源となり、星像に影響を与える可能性があり、あえて出来るだけ入らないようにしているのです。そのため、観望会終了後、観測が始まったら、ほとんど隣の制御室で過ごすことになります。

観望会では150cm望遠鏡の横についている観望鏡に焦点を合わせ、天体の光を集めていますが、観測装置は望遠鏡の主鏡の下についていたり、観望鏡の反対側にある台の上に乗っていたり、または横に取り付けられています。そのため、第三鏡と言う望遠鏡本体の中にある鏡を動かして、その観測で使う装置に焦点を合わせます。65cm望遠鏡の場合は、望遠鏡の下から伸びているワンダーアイという装置を外して、観測装置を取り付けます。このようにして、観測装置に天体の光が入るようにすると、後は望遠鏡をつかって自分の目で直接覗くことはできなくなり、すべて観測装置を通し、CCDカメラで得られた画像をコンピュータのディスプレイで見ることになります。望遠鏡のピント合わせも、天体の位置あわせもすべてディスプレイに表示される画像を見ながら行います。



図4: 11mドームの隣にある制御室。ここから望遠鏡や観測装置を動かす。データの解析や、望遠鏡などを動かすためのコンピュータが並んでいる。

### 観測は時間との戦い

さて、このようにして、観測が始まってしまえば、

後はひたすらコンピュータの画面とにらめっこです。もちろん、時々お天気は気にしながらということになりますが、夜空を眺めている暇もあまりありません。次々と予定していた天体に望遠鏡を向けては、シャッターを開き、CCDで読み込まれる画像をチェックして、望遠鏡の向きや露出時間を調整しながら観測を続けていきます。そうこうしていると、あつという間に日付が変わり、日の出が近づいてきます。空が明るくなってくると、だんだん暗い天体は写らなくなってきますし、長い時間の露出は出来なくなってしまいますので、薄明までの残り時間を気にしながら、観測はラストスパートです。このころになってくると、時間と共に眠気とも戦わなければなりません。そして、外が完全に明るくなるころにはドームを閉じて、最後に観測データの較正用のデータをいくつか取って観測は終了となります。しかし、研究全体としてはここからのデータ処理が大変です。これについてはまたの機会に紹介させていただきたいと思います。



図5: 観測の一コマ

(主任(観測普及研究員) 本田敏志)

## 天文台の素朴な疑問スペシャル

### 今年のノーベル物理学賞って、宇宙の誕生と関係があるそうですけど…!?

今年のノーベル物理学賞は、「素粒子物理学における対称性の自発的な破れの発見」で南部陽一郎氏と、「自然界にクォークが3世代以上あることを予言する、対称性の破れの起源の発見」で小林誠氏と益川敏英氏が受賞されました(写真1)。これらの発見は天文学にとっても関係の深い内容ですので、特に宇宙との関連を解説します。



写真1: 左から、南部陽一郎氏、小林誠氏、益川敏英氏(ノーベル財団のウェブサイトより)

#### 対称性の破れとは?

対称性が自発的に破れるとは、どういうことでしょうか。この現象は、実

は磁石とよく似ています。

身の回りの物質には、電子が含まれています。電子は、小さな粒(つぶ)だと考えてくださって結構です。電子には、「スピン磁気モーメント」と呼ばれる量が備わっていて、非常に小さな磁石としての性質(N極とS極を持つこと)を示します。私たちがよく知っている磁石は、この非常に小さな磁石である電子が協同して同じ方向を向いて並んでいるので、全体として1つの大きな磁石としての性質を示すのです。

磁石を加熱していくと、ある温度以上では、並んでいた非常に小さな磁石たちが協同の力を振り切って、ばらばらに運動するようになります。そうなると、磁石の性質は消えてしまっています。非常に小さな磁石たちがばらばらな方向を向いている「秩序のない」状態では、どの方向も対等だという意味で、「対称性がある」状態です(図1)。

一方、熱かった温度が下がると、非常に小さな磁石たちは、

(部分部分で) あるそろった方向を向いて並ぶようになり、磁石の性質を(各部分部分では)回復します。これが、「対称性が自発的に破れた」という意味です。(各部分部分ではありますが、)並ぶ方向が1つ選ばれたということは、もはや、あらゆる方向が対等というわけではないので、「対称性が破れた」状態です。「自発的な」とは、並んだ方がばらばらの方向を向くよりエネルギーが低いので、「エネルギーが低い状態が自然に選ばれた」という意味です(図2)。

このように、無秩序な状態から秩序ができていく現象は、古くから「相転移」と呼ばれていました。水が凍って氷になることも相転移です。



図1:どの方向も対等で「対称性がある」状態の小さな磁石  
図2:あらゆる方向が対等というわけではなく「対称性が破れた」状態の小さな磁石

## 宇宙の秩序と構造

南部陽一郎氏<sup>1</sup>(シカゴ大学名誉教授)は、ジョナ・ラシーノ氏(ローマ大学サピエンツァ校名誉教授)との1961年の共著論文で、それまでは絶対的に信じられていた真空の対称性までもが自発的に破れることを、世界で初めて示しました。

それだけでなく、南部氏らの提唱した「自発的な対称性の破れ」は、ビッグバンから宇宙が始まって以来、様々な力が生まれ、宇宙の構造と多様性が作られていく「宇宙の相転移」の様子をすべて記述するのです。

宇宙の初期には、何度も相転移が起きたと考えられています。佐藤勝彦氏(東京大学教授)らが提唱したインフレーション宇宙理論も、宇宙の急激な膨張を引き起こすと同時に、それまで一様でのつぱりとした空間に、その後成長して銀河となる「密度の揺らぎ」(銀河の種)を作って、一様な空間の対称性が自発的に破れるのです。

それ以降も、宇宙では相転移が起きるたびに対称性が自発的に破れ、物質の秩序や天体の構造が創生されてきたのです。

南部氏らの発見は、このように宇宙の構造と多様性が作られていく過程を記述する普遍的な機構なのです。

## 宇宙の物質の起源

「反粒子」という言葉を聞いたことがあるでしょうか?反粒子とは、身の回りの普通の粒子と比べると、重さ(質量)やスピンと呼ばれる量が同じで、電荷などの正負の性質がちょうど逆になっています。前述の電子の反粒子は陽電子です。素粒子の世界では、粒子と反粒子が同等に存在することができます。

反粒子が粒子と衝突すると、反粒子と粒子の両方とも消えてしまい、光が出ます。それでは私たちも、いつかは反粒子とぶつかって消えてしまうのでしょうか?いいえ、その心配はありません。現在の宇宙には反粒子が非常に少なく、私たちや宇宙の天体の物質などほとんどが粒子だけからできているので安心

なのです。

では、どうして粒子の数の多い宇宙が実現したのでしょうか。この問題を詳しく調べたアンドレイ・サハロフ氏(故人)は1967年に3つの必要な条件を示しましたが、そのうち1番重要な条件が、「粒子と反粒子を入れ替える対称性の破れ」でした。粒子と反粒子を入れ替える対称性があれば、粒子と反粒子は公平に扱われるため、どちらも同じ数だけ存在し、やがてお互いがぶつかって消えてしまうはずですが、現実の宇宙では粒子の数の多いはるかに多いので、この対称性は破れているのです。

これに先立ち1963年にニコラ・カビボ氏(ローマ教皇庁科学アカデミー会長)が、クォークと呼ばれる素粒子(図3)は、種類の異なるクォークが少し混ざって存在しているとする画期的な理論を発表していました。カビボ氏はクォークが2世代の場合の理論を考えていましたが、この場合には粒子と反粒子を入れ替える対称性は破れていません。

しかし、反粒子が非常に少ない現実を説明するため、小林誠氏(高エネルギー加速器研究機構名誉教授)と益川敏英氏<sup>2</sup>(京都産業大学教授・京都大学名誉教授)は、粒子と反粒子を入れ替える変換に対する対称性が破れる理論を探していました。1973年に小林氏と益川氏は共同で、3世代のクォーク(クォークが6種類)が混ざって存在しているとすれば、粒子と反粒子を入れ替える対称性を破ることを発表しました。つまり、小林氏と益川氏の理論は、宇宙には反物質が少なくなることも説明するのです。

当時、クォークは3種類しか発見されていなかったため、6種類も存在するのは非常に斬新なアイデアだったそうです(この論文には、粒子と反粒子を入れ替える対称性を破る他の可能性も同時に発表していました)。その後、世界の加速器実験の進歩と共にクォークは次々と見つかり、6種類が本当に混ざって存在していることも実験で確かめられました。

その後、小林氏と益川氏の理論を基礎として、サハロフ氏の他の2つの条件も満たす理論が作られ、宇宙の中で物質がどれだけ生成してくるかを吉村太彦氏(岡山大学教授)らが計算し、柳田勉氏(東京大学教授)と福来正孝氏(東京大学教授)が提唱した理論を使って物質の生成を導く改良版も近年研究が進んでいます。

これらの物質が様々な形の銀河を作り、多種の原子を生成する大きな星を作り、そして地球とすべての生命を作ったのです。もし仮に、反粒子が粒子と同じ数あったとしたら、それらは出会って消滅して光になるだけなので、宇宙には物質が何も無かったこととなります。空虚な空間が広がるだけで、光り輝く星も、それにロマンを感じて観測し続ける人間も誕生しなかったこととなります。

(専門員(観測普及研究員) 中道晶香)

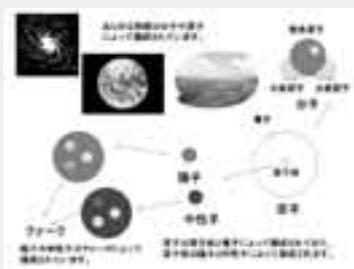


図3:クォークとは

1: 20年ほど前のことになりますが、南部氏が日本に帰国した際、筆者の学生時代の研究室へセミナーに来られ、その後、研究室で一緒に居酒屋へ行ったことがありました。「世の中の全ての現象は(超常現象でさえも)、物理学の法則の式で必ず書き表すことができる。」と熱く語られたことが印象に残っています。強い信念を感じました。

2: 筆者は京都大学にいた時期に益川氏とお話したことがあり、お茶目な人柄が印象に残っています。益川氏は、セミナーで人の研究の話の話を聞いたり議論したりしていると、誰も考えつかなかった本質的で有益なコメントをされるので、「あの人は天才だよ。」と評判でした。

# 天界四季折々

街がクリスマスの飾り付けで賑やかに彩られる季節になりました。たいていクリスマス・ツリーのてっぺんには大きな星が飾られていますが、これはキリストの生誕を東方の三博士に知らせたベツレヘムの星を表しています。今号の天体列伝では変光星ミラをご紹介しますが、このベツレヘムの星が実は明るくなったミラではないかという説もあるそうです。たまたま今年は12月にミラが最も明るくなり、肉眼でもはっきり見ることができるようになります。皆さんもご自身の目で、あるいは、大きな望遠鏡を使って、クリスマスの星ミラをご覧になって、歴史と宇宙に思いを馳せてみてはいかがでしょうか？ ぐんま天文台の一般観望は、金土日曜日と祝日の晴れた夜6時から9時（最終入館は8時半）に行っております。ぜひ暖かい服装でお越しください。

## ★主な観望天体

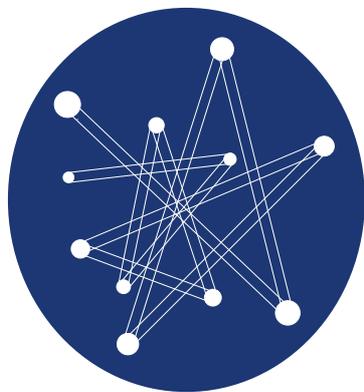
惑星：天王星  
変光星：ミラ  
二重星：アンドロメダ座ガンマ星（アルマク）  
散光星雲：オリオン大星雲 M42  
惑星状星雲：エスキモー星雲 NGC2392  
散開星団：二重星団 NGC869 + NGC884

## ★イベント・開館情報

詳しくは天文台のホームページをご覧ください。

12月13日(土)	ふたご座流星群説明会・観望会
12月27日(土)～1月5日(月)	年末年始閉館（1月4日夜は特別開館）
1月4日(日)	世界天文年2009オープニング・イベント&新春特別観望
1月10日(土)	天文講話（第5回）
2月7日(土)～8日(日)	太陽望遠鏡による月投影
3月7日(土)	天文講話（第6回）
3月21日(土)	冬のダイヤを見よう（ボランティア自主企画）

訃報：昨年度までぐんま天文台副台長を務められた清水実先生が10月20日にお亡くなりになりました。ご冥福をお祈りいたします。



GUNMA ASTRONOMICAL OBSERVATORY

県立ぐんま天文台

発行日 ■ 2008年11月

発行 ■ 県立ぐんま天文台

電話 ■ 0279-70-5300 FAX/0279-70-5544

所在地 ■ 〒377-0702 群馬県吾妻郡高山村中山6860-86

ホームページ ■ <http://www.astron.pref.gunma.jp/>

※広報誌のバックナンバーは上記ホームページからお取りいただけます。

※広報誌や天文台の利用について、ご意見をお寄せください。