

ミラの謎 – 今も

竹内 峰 (柳町自然研究所)

目 次

1 ミラの謎	2
1.1 大きな実視光度の変化	2
1.2 大きくない全放射光度の変化	4
2 表面の変動	4
2.1 スペクトルの変動	4
2.2 色の変動	5
2.3 表面温度	7
2.4 一酸化チタンとは	9
3 周期光度関係	10
3.1 大マゼラン星雲	10
3.2 われわれに近いミラ型星	10
3.3 新たな宇宙の灯台	13
4 ミラ型星の膨張収縮	13
4.1 スペクトル線のずれ	13
4.2 大きさの変動を測る	14
4.3 膨張収縮の様式	15

5 ミラの謎	16
5.1 星の表面近くの電波源	16
5.2 ミラの尾	16
5.3 半規則変光星との関係	17
補遺	20
明るさを示す様々な等級	20

1 ミラの謎

1.1 大きな実視光度の変化

鯨座オミクロン星の明るさが変わることに、16世紀末にダヴィド・ファブリキウス (David Fabricius) が気付いた。これが、現在に続く変光星研究の扉を開いたことは、広く知られている。

ミラの変光が約11か月の周期で繰り返されることに気付いたのはヨハン・ホルワルダ (Johan Holwarda) である。現在では周期は332日であるとされているので、当時から変光の周期がほぼ変わっていないことが分かる。

この星の変光で最も驚かされることは、何といってもその変光の規模の大きさである。肉眼で見た場合の星の明るさを記載する等級は、**実視等級** (visual magnitude) と呼ばれているが、最も明るい場合には2.0等で、最も暗い場合には10.1等である。その差8.1等の増光は、到達するエネルギーの率が千七百倍になっていることに相当する。

17世紀の人々が、このような到達するエネルギーの差を計算できていたわけではないが、ラテン語で「驚異」という意味の「ミラ」という呼び名を与えたのは、今なお正當である。

図1にミラの光度変化の様子を掲げた。まず見て分かることは、その振幅の大きいことであるが、それと同時に極大光度や極小光度が絶えず変化していることである。これは、ハーロー・シャプレー (Harlow Shapley)

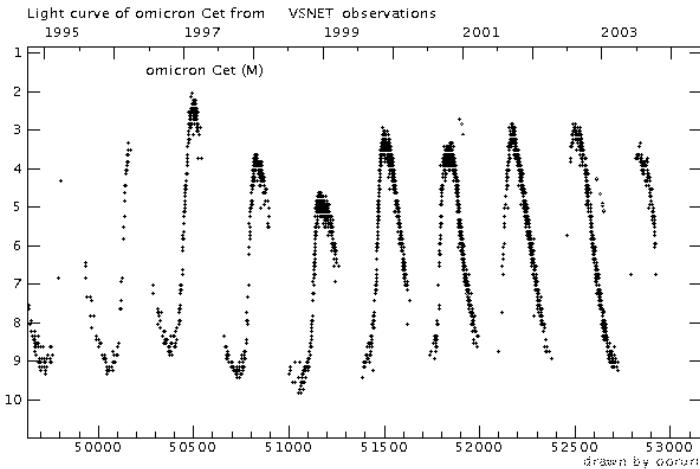


図 1: 鯨座オミクロン星の変光曲線. 1995 年から 2003 年にかけての約 3,000 日間の観測結果が示されている. この結果は VSNET で発表されているものである.

が、脈動変光星の共通の特徴としてあげたことであって、この星が膨張収縮を繰り返しているからではないかと想像させる第一の根拠となる.

それにしても見事な光度変動であるといわざるを得ない.

ミラのような星はその後次々と発見された. ホルワルダの周期確認から 38 年後の 1868 年には白鳥座カイ星の変光が発見され、18 世紀のうちに海蛇座 R 星、獅子座 R 星が発見されている. 以前は赤色変光星と呼ばれることも多かったが、変光星総合目録 (GCVS) ではミラ型変光星と呼んでいる.

変光星総合目録では、スペクトルの特徴が Me 型, Ce 型, Se 型で、明るさの振幅が実視等級で 2.5 等から 11 等の範囲にあり、周期は 80 日から 1000 日であると記されている. さらに赤外線による観測での性質についても記述があるが、それは後に触れる.

1.2 大きくない全放射光度の変化

20世紀に入り、星からの放射をさらに精密な測定が試みられるようになった。エジソン・ペティット (Edison Pettit) とセス・ニコルソン (Seth B. Nicholson) とは、熱電対を用いて、星から到着する電磁波（もちろん可視光も含めて）の総エネルギーの測定に取り組んだ。このような、全波長領域にまたがる放射の総量に基づく光度を、全放射光度と呼び、それを表す等級を**全放射等級** (bolometric magnitude) と呼ぶこととする。理科年表の天文部などでは、輻射等級と記しているが、同じものを指している。

彼らは6個のミラ型変光星を、1921年から1927年まで7年間にわたって観測し、これらの星の実視等級での振幅は平均して5.9等であるのに対して、全放射等級での振幅は平均して0.89等であるという結果を得た(1)。実視等級での5.9等という振幅は明るさが230倍変化していることを示しているのに対し、0.89等というのは、2.3倍の変化ということである。これは、ケフェウス座デルタ型星などと比べて、けっして大きくはない。

それほど大きくないミラ型変光星の全放射等級での変化と、大きな実視等級での変化との関係が、ミラ型星の大きな謎となった。

2 表面の変動

2.1 スペクトルの変動

ミラ型変光星が脈動しているとすれば、その光度変化は表面温度の上昇下降によるであろう。表面温度の上昇は、スペクトルの特徴を調べれば温度の変動が分かるはずである。

ミラ型変光星のスペクトルは、Me型、Ce型、Se型などに分類されている。スペクトル型に添え字のeがあるのは、輝線が見られることを示している。吸収線が帶状に分布しているのを、暗帯と呼ぶ。M型、C型、S型などのスペクトル型は、どのような暗帯が見られるかで分類されている。このようなスペクトルを示す星を晩期型星と呼ぶが、表1に各スペクトル型の特徴を示した。

表 1: 晩期型星のスペクトルの 3 種類の系列

スペクトル型	特徴
M 型	一酸化チタンの暗帯
C 型 (炭素星)	炭素, ジシアンの暗帯
S 型	一酸化ジルコニウムの暗帯

チタンやジルコニウムは、星に大量に含まれているわけではないが、その酸化物が可視光の領域で不透明さをつくりだすので、光学観測では目立った特徴となる。星のスペクトルは、表面温度が低くなると、わずかな化学組成の変化によって大きく様子が変わる。藤田良雄 (Yoshio Fujita) は、こうした星の表面でどのような化学反応が生ずるかを計算し、酸素とチッ素とに対して炭素が多いか少ないかによって、この 3 種類のスペクトルが生ずることを、始めて明らかにした(2)。C 型の星を炭素星、M 型と S 型の星を酸素星と呼ぶことが、藤田の結果に基づいて始まった。

ミラのスペクトルを研究したアルフレッド・ジョイ (Alfred H. Joy) は、吸収線の特徴から、明るいときに温度が高く、暗いときに温度が低いという性質を確かめた(3)。脈動星はその共通の特徴として、明るさの変化は表面温度の変化に起因しているという性質を持っているが、ミラ型星も脈動星としての性質を持っていることが、このようにして確かめられた。

2.2 色の変動

スペクトルの特徴のほかに、色の変動がどうなっているかも、ミラ型星が脈動星かどうかを確かめるもうひとつの目安として注目された。色の指標として多く用いられるのは、 $(B - V)$ である。これは、 B 帯と呼ばれる光の領域と、 V 帯と呼ばれる光の領域との等級の差である。 B 帯は、初期の写真乾板の感度の高い領域に対応しており、 V 帯は、肉眼で感度の高い領域に対応している。すなわち、 B 等級は初期の写真乾板に写った星の

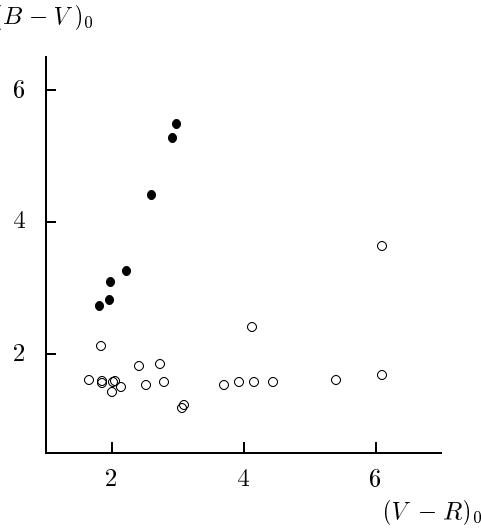


図 2: 観測された晩期星の色（酸素型と炭素型の違い）. 横軸は赤い光での明るさである R 等級と実視等級の差である. 縦軸は $(B - V)$ 等級である. 添え字の 0 は、星間物質の影響を計算で取り除いた値であることを示している. 白丸は Me 型と Se 型の変光星で、黒丸は炭素型の変光星である. 特徴的な暗帯の影響で、各領域での光の明るさが異なることが分かる.

明るさに相当し、 V 等級は実視等級に対応する. B 等級から V 等級を減じた値が小さければ、青側である B 等級が明るいのであるから、星は青いということであり、大きければ、赤いということである.

ミラ型変光星の色の観測は、 $(B - V)$ 等級では、最も青くなるのは増光中の時期で、極大光度を過ぎて減光する時期に最も赤くなるという結果が得られた. 別な光の領域での観測では、最も明るい時期に最も赤いという結果が得られた. これでは、脈動変光星かどうか確定できない. そこで、星の表面温度と色との関係が、ミラ型変光星ではどのようにあるかが問題となる.

図 2 に観測されたミラ型変光星や半周期変光星の色を示す(4). 図の横

軸は、赤い光での明るさである R 等級と、 V 等級との差である。M型やS型は、酸化物の暗帯が目立つので酸素星と呼ばれるが、これらの星の温度の指標として $(B - V)$ 等級が利用できないことが分かる。しかし、炭素星と呼ばれる星では、表面温度の変化が $(B - V)$ 等級の変化として現れる。このような観測結果から、ミラ型星の色の観測と表面温度を安易に関係づけることができないことが分かってきた。

2.3 表面温度

B 等級や V 等級を比較する以外に、ミラなど酸素の多い晚期型星の表面温度を推定する方法はないであろうか。ペティットとニコルソンは、全放射等級と水を透過する放射だけを測定して、ミラ型星の表面温度を推定しようとした。水は、赤外線のうち波長が 1.3 マイクロメートル以上のかなりの部分を吸収するので、この方法は、温度の低い星から到達する放射の、赤外線領域と可視光領域との明るさの比を調べることになる。

彼らは、ミラ型星の観測結果と実験値とを比較して、ミラ型変光星の表面温度は 1800 度から 2350 度の範囲で変化していることを見いだした(1)。白鳥座カイ星では、最低温度は 1630 度まで低下するという結果が得られた。

ジョイは、表面温度が高温時で 2300 度、低温時で 1800 度であるということは、全放射等級では 1.1 等の変動となることを指摘した。また、表面での不透明度の影響を考えなければ、この温度変化は、実視等級で 3.3 等の半価であることを指摘し、観測される大きな実視等級での光度変化は、低温時に可視光領域で、星の表面での一酸化チタンの吸収が強くなることによると考えた(3)。

赤外線での観測でも、異なった波長域で測った明るさの差を色と呼んでいる。一酸化チタンなど分子の影響があると、ばらつきが大きくなるので、 J 等級（波長 1.26 マイクロメートル付近での明るさ）と K 等級（波長 2.15 マイクロメートル付近での明るさ）といいういすれも赤外線で測った明るさの差を自安にすると、スペクトル型で M0 から M5 までの範囲では、信頼できる関係が得られている(5), (6)。表 2 には、マーク・ハウダシェルト

表 2: スペクトル型と表面温度, 色の関係星の表面構造の理論計算と観測を比較して求めたハウダシェルトらの結果. 化学組成は太陽と同じとして計算されている. 表面温度の単位は絶対温度, 表面重力の単位はセンチメートル毎秒毎秒である.

スペクトル型	表面温度	表面重力	色 ($J - K$)
M0	3880	11.48	1.011
M1	3835	9.55	1.037
M2	3740	6.46	1.093
M3	3675	4.90	1.133
M4	3595	3.47	1.186
M5	3470	2.14	1.278

(Mark Houdashelt) らの結果を掲げている.

J 等級や K 等級は, 研究者によって波長域などが微妙に異なるので注意が必要であるが, ここでは南アフリカ天文台での観測と比較できるような値を掲げている.

ハウダシェルトら結果で, もうひとつ気付くことは, 可視光の観測結果の整理に広く利用されている色のひとつである ($B - V$) 等級と理論との比較である.

結果を図 3 に示したが, M0 型から M6 型にかけては, ($B - V$) 等級はほとんど変わらない. しかし, M7 型になると逆に青くなる. ミラ型星の場合, ($B - V$) 等級が青い場合には, 表面温度が高い場合と低い場合と双方あり, この色を観測しただけでは区別がつかない. これに対して, スペクトル型では, 温度が低いか高いかは, 観測される線や帯の特徴で区別できる. しかし, 色の観測からは, M6 型より低温側の場合には表面温度を推定することはできない.

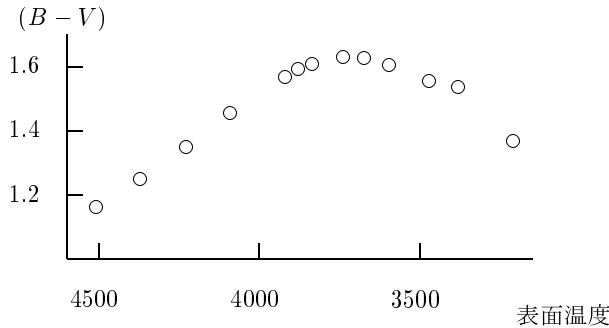


図 3: K 型, M 型巨星の表面温度と色 ($B - V$) との関係. 横軸は表面温度, 縦軸は ($B - V$) 等級である. ハウダシェルトらの計算結果である. 観測ともほぼ一致している. 表面温度が下がるとこの色は青くなることに注意したい.

2.4 一酸化チタンとは

これまでに, 一酸化チタンという物質が何ヵ所かで問題となってきた. 一酸化チタンとはどのようなものであろうか.

一酸化チタンは, 酸素原子 1 個とチタン原子 1 個とが結びついてできた分子である. まず, チタンであるが, われわれの身近では, **チタン** (titanium) といえば硬い銀白色の金属である.

チタンの酸化物である二酸化チタンは, 白色の顔料として広く用いられている. 実はチタンは宇宙全体では, カルシウムやコバルトなどと並んでかなりの量存在していることが分かっている.

太陽の表面ではチタンのイオンが観測されているが, 温度が低い場合にはチタンは酸素と結合して一酸化チタンの分子となる. 星の表面温度が 4000 度より低くなると, スペクトル中に一酸化チタンが観測されるようになる. この分子は, 可視光領域で高い不透明度が生ずる原因となる.

ミラのスペクトルに, 一酸化チタンの特徴が見られることを指摘したのは, アルフレッド・ファウラー (Alfred Fowler) である (7). 当時の彼の論文を読むと, 低温で表面重力の小さな星をアンタレス型 (Antarian) と呼

んでいたことが分かり, ミラもそのひとつとされていたことが分かる. また, 現在, 帯状のスペクトル (band spectre) と呼んでいる分子起源のスペクトルを, 溝を連続的に刻んだような (fluted) と表現している. 学術用語も時代とともに変わっている.

3 周期光度関係

3.1 大マゼラン星雲

変光星の周期光度関係については, マゼラン星雲の観測が役立つ. ミラ型変光星の場合も, 球状星団中の星の観測から周期光度関係を求める試みがなされたが, やがて大マゼラン星雲に含まれる星の観測によって, 周期光度関係が明瞭に示された(8). 図4に彼らの得た結果を示す.

この結果が得られたのはわずか20年前である. 長くミラ型星の周期光度関係は確認されておらず, 例えばパトリック・ムーア (Patrick Moore) が「天文学のギネスブック」に, ミラ型星にはケフェイドのような周期光度関係はないと明記しているが, それは1979年のことである(9).

周期と K 等級との間の関係は, 報告の中では次のように表されている.

$$K \text{ 等級} = -3.45 \times (\log (\text{周期}) - 2.4) + 11.15 \quad (1)$$

この式は, 周期が250日の星の K 等級が11.15等であることを強調する表現であり, 周期が10倍大きくなれば, 明るさが3.45等変わることを示している.

3.2 われわれに近いミラ型星

われわれの太陽系に近いミラ型星の絶対光度を知るためにには, 個々の星の距離を知らなければならない. 大気の外側へ打ち上げた人工衛星ヒッパルコスによる三角測量で, 鯨座オミクロンほか幾つかの星の距離が分かった. 距離が分かれれば絶対光度が計算できる. ジリアン・ナップ (Gillian R.

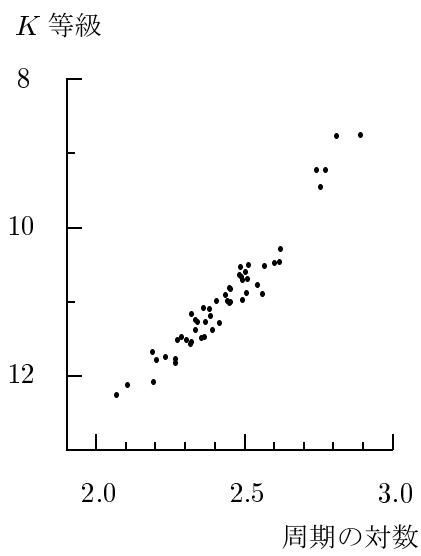


図 4: ミラ型変光星の周期光度関係. 大マゼラン星雲の 55 個のミラ型変光星の周期と光度を示す. 横軸は周期（単位は日）の対数で、縦軸は K 等級である.

表 3: ミラ型変光星の距離と絶対光度

星	実視等級 (極大)	距離 光年	絶対光度 (平均) <i>K</i> 等級
鯨座オミクロン	2.0	350	-7.6
白鳥座カイ	3.3	490	-7.8
海蛇座 R	3.5	390	-7.8
竜骨座 R	3.9	440	-7.0
獅子座 R	4.4	270	-7.1

Knapp) たちは、大マゼラン星雲で得られた周期光度関係は、銀河系内のミラ型変光星でも同様に成り立っているとしてよいことを確かめ(10).

彼女らの求めた距離、絶対光度のうち、いくつかの明るいミラ型星の値を表 3 に掲げる。この表にある距離は、ヒッパルコス衛星の観測結果を当初整理して得られた距離と多少異なっている。当初の整理ではミラよりも暗いという結果が得られていた、白鳥座カイ星と竜骨座 R 星の距離は、より近いという結果が得られ、絶対光度は他のミラ型変光星と同様な値になっている。

南アフリカの天文台で行われたミラ型変光星の詳しい赤外線観測の結果がパトリシア・ホワイトロック (Patricia Whitelock) らによって発表されている(11)。それと、表 3 に掲げられた距離とに基づいて、これらの星が太陽の何倍のエネルギーを放射しているかを計算してみると、鯨座オミクロン星 (ミラ) は太陽の 5436 倍、白鳥座カイ星で 4514 倍、海蛇座 R 星で 6185 倍、竜骨座 R 星で 3079 倍、獅子座 R 星で 2497 倍という値となる。

ポール・メリル (Paul W. Merrill) らは、1924 年の論文で、ミラ型星のエネルギー放射率を太陽の 1600 倍と推定している(12)。それに比べると、現在知られている値は 3 倍以上となっている。ミラ型変光星は膨大なエネルギーを刻々放出しているが、その熱源は太陽などの主系列星とは異なり、水素だけでなく、ヘリウムその他の原子核の融合反応によっている。

3.3 新たな宇宙の灯台

ミラ型変光星の周期光度関係が確認されたことにより、ミラ型星は宇宙の距離測定の拠り所として改めて注目されることとなった。

銀河系の中では、その分布を詳しく調べることにより、どれくらい昔に、どこでどのような星ができたかを研究することができる。

また、銀河系の外側、はるか遠方にある星雲の中のミラ型星を観測し、その周期を調べて距離を求めることができる。形がメキシコの帽子ソンブレロに似ていることで知られている NGC5128 星雲のミラ型星の観測から距離を求める試みがなされたが、それまでの各種の方法に劣らない精度で距離を測ることができることが確かめられている(13)。

ミラ型星の周期の決定には、かなりの年月がかかる。3 周期くらいでは精度が不充分で、10 周期分の観測が必要であろうから、明るいミラ型星については、10 年程度の観測の蓄積が必要である。ミラ型星とのつきあいは、時間がかかるのを覚悟しなければならない。

4 ミラ型星の膨張収縮

4.1 スペクトル線のずれ

スペクトルが高温を示す時に星が明るいということは、ミラ型変光星が脈動星であることを示している。しかし、スペクトル線のずれから星の表面での運動を探ると、ケフェウス座デルタ型星のような明瞭な関係は発見できなかった。

ミラを詳しく観測したジョイは、星が明るい時に比べて、星が暗い時は星の大気の外側への動きが速いことを見いだした(3)。星のある決まった球殻の動きが観測されているとすると、このようなスペクトル線のずれの振る舞いは、光度極大の際に星の収縮速度が最高で、光度極小の際に星の膨張速度が最高であると解釈される。ケフェウス座デルタ型星では、星が膨張しつつある時に、星の表面温度が高いという性質があったが、ミラ型ではその逆になっている。このことは、長い間明瞭な説明が得られないま

まに過ぎてきた。

ミラ型変光星の膨張収縮と明るさの変動についての、近年の説明は、たとえばマーク・ライド (Mark J. Reid) らの論文で知ることができる(14)。彼らの説明は次のようになる。星の半径が最も小さい時には、星の大気は高温で比較的透明であり、星の内部の比較的高温の球殻から放射される光が観測される。星が膨張して星の表面の温度が下がり、チタンと酸素が結合して一酸化チタンが形成されると、星の相対的に外側の低温の球殻から放射される光が観測される。

ジョイの観測結果を、ライドらの説明と照らし合わせると、星が膨張し続ける間、光度は減少し、やがて一酸化チタンで観測されていた球殻は密度が低下して透明になり、その内側のより高温の球殻から放射される光が見えてくると、光度が増加すると解釈できる。

4.2 大きさの変動を測る

観測技術の進歩により、われわれからの距離が 500 光年以内にあるようなミラ型変光星の大きさの変動を、大望遠鏡を利用して測定することが近年可能となってきた。

ミラ型変光星は周期が数百日もあるので、その変光に伴う半径の変動を測定するためには、長期間の観測が必要となる。最近ヘンリー・ウッドラフ (Henry C. Woodruff) たちは、ハワイのケック 望遠鏡を使用し、8 年間にわたってスペクトルが M 型の特徴を示す鯨座オミクロン (ミラ) 星、獅子座 R 星、カシオペヤ座 R 星、海蛇座 W 星、同じく海蛇座の R 星などを干渉計で観測したが、明るい時は半径が小さく、暗いときは半径が大きいという確認している(15)。

ミラ型星の場合、内側から、高温で分子がない層から、外側へと温度が低くなるにつれて分子を豊富に含むようになり、やがて希薄になって、放射が自由に外側に出てくるようになる。このどこを表面とするかであるが、そこから出発する放射の半分程度が星の外側まで出てくるようなところを表面とするのが、気体と放射との関係を考えて妥当であろう。

鯨座オミクロン星では最も膨張した際には半径は太陽の 300 倍を超え, 収縮した際には太陽の 200 倍近くまで縮む. 平均半径は太陽の 270 倍程度である. 半径極小に比べて半径極大の際は, 1.2 倍ほどにふくらむ. これに對して, 可視光で見える星の大きさは, 星が最も膨張した時には, 星の半径の 2 倍にもなる.

Me 型のミラ型星については, 星が最も収縮した時期に星の放射が最も強く, 星が最も膨張した時期に星の放射が最も弱くなる. しかし, スペクトルが Se 型である白鳥座カイ星では, そこまで確かめられてはいない. 分子の形成や分解の状況がミラなどを異なるのか, 脈動星特有の変動の不規則性が原因で結果が不明瞭になっているのか, そのいずれかはまだ分からぬ.

4.3 膨張収縮の様式

ミラ型星が膨張収縮を繰り返していることは間違いない. あるるとすると, その様式は何かということが問題となる. 膨張収縮の様式が複雑になれば, 気体が動く過程で発生する渦などに起因する制動力が大きくなると思われる所以, 星全体が膨張収縮するような動きは, もっとも単純な基本様式であると想像される. しかし, 近年, ミラ型星の膨張収縮は第 1 陪振動様式であるという説が広がった.

これは, 1990 年代に行われた干渉計でミラ型星を観測した結果, 半径が太陽の 350 倍以上であるという結論が導き出されたことによる(16). これはその後のウッドラフたちの観測で得られた半径に比べて 3 割も大きい. このように半径が大きいといふとすると, 質量が星の構造の理論から推定された値で変わらないとした時, 周期密度関係の特性周期が 0.3 よりも小さいということになる. このような特性周期は, 第 1 陪振動様式の場合に相当する.

このような大きな値が得られたのは, この時期の干渉計観測が, 波長が 0.7 マイクロメートルから 0.9 マイクロメートルの範囲の光について行われており, 星の表面よりも外側に存在する固体微粒子によって影響されて

いたからである(17). ミラなどは基本様式で膨張収縮しているとしてよさそうである.

ホワイトロックたちは, 周期が 225 日より短いミラ型星が, 色の違いで二つのグループに分けられることを見いだした. この違いは, 周期とスペクトル型の関係でも認められる(11). この二つのグループは, 周期光度関係でも違いが認められ, 赤いグループの方がやや明るい. 星の質量が同じとして特性周期を計算してみると, 赤いグループの値は青いグループに比べて約半分であり, 第 1 陪振動様式で膨張収縮をしていると解釈できる. 彼女らが見いだした赤いグループに属する星としては, 乙女座 R 星, レチクル座 R 星, 天秤座 RS 星, 小狐座 R 星などがある. このグループの研究は始められたばかりである.

5 ミラの謎

5.1 星の表面近くの電波源

ミラ型星の表面のすぐ近くに, いくつもの電波源がある. これらの電波源は星から放出された気体の塊で, ある特別な状態になった時に電波を放射すると考えられる. こうした電波源からの電波の強さの変動や, その動きの観測は, 星から流れる気体のようすを知る上で手がかりを与える. こうした研究は次の小節で述べるミラの尾の形成の研究にも不可欠である.

さらに, これらのミラ型星の表面近くから来る電波と, 遙か遠方の別の電波源から来る電波との, 方向の違いを精密に測ることは, ミラ型星の距離を測ることができ, ミラ型星の分布を研究するための資料が得られるので重要である.

5.2 ミラの尾

ミラが周囲に物質を放出していることは間違いないとされていたが, 紫外線の観測で, 見かけが角度しい 2 度を超える長い尾を引いていることが

明らかになり、その研究がいつそう進むことになった(18).

角度で2度を超えるということは、距離が350光年であることを考えると、少なくとも12光年はあるということで、このような長い尾がどのようにして形成されたかは大きな謎である。ミラは視線方向では毎秒63キロメートルの速さで遠ざかっており、天球面に平行な運動を測定した結果では、秒速120キロメートルでほぼ真南に動いている。紫外線観測ではミラの南側に、衝撃波面のような構造がある。これは、ミラが周囲の気体をかき分けて南の方へ進んでいることを示している。

ミラから放出された気体が、周囲の空間の気体に衝突して減速され、ミラの動きから取り残されたのが、観測される尾であろう。ミラの尾の最も先の方の気体が何年前にミラから放出されたものであり、尾を構成する気体の総量はどの程度であるかに关心が持たれ、電波観測(19)や理論計算(20)に基づいて議論されている。こうした研究では、尾の先端の気体がミラから放出されたのは、10万年以上前であり、尾を構成している気体の総量は、ミラの質量の千分の一よりも多いという結果が得られている。

こうした値が、これまでの星の進化の理論と一致するかどうかも興味深い。

5.3 半規則変光星との関係

ミラ型星の謎のひとつは、半規則変光星との関係である。半規則変光星は、スペクトル型ではケフェイド不安定帶の赤い端からより低温で、周期が100日から200日くらい、かつ振幅がV等級で1ないし2等以下、かつ脈動変光星と思われる星を指している。

変光が規則的でないということを指標にして考える所以であるから、分類自体がそもそもいまいで、総じて今後の研究対象と思えばよいであろう。

これら半規則変光星とミラ型星とは、表面温度や絶対光度に共通なところが多く、半規則変光星のうち、何らかの理由で振幅が大きくなつた星がミラ型星ではないかという考え方以前からあつた。

大マゼラン星雲の変光星観測で、半規則変光星の周期光度関係が何本か

に分かれていることが分かり、半規則変光星の研究がさらに進もうとしているが、ミラ型星の位置づけがどうなるかは、これまでのところ謎のままである。半規則変光星については、別なノートで改めて述べることとしよう。

参考文献

- [1] Pettit, E., Nicholson, S. B., 1933 Measurement of the Radiation from Variable Stars. *Astrophys. J.*, Vol. 78, p. 320
- [2] Fujita, Y., 1939: An Interpretation of the Spectral Sequence for the Late Type Stars. *Jap. J. Astron. Geophys.*, Vol. 17, p. 17
- [3] Joy, A. H., 1926: A Spectrographic Study of Mira Ceti. *Astrophys. J.*, Vol. 63, p. 281
- [4] Mendoza, E. E., 1967: Multicolor Photometry of Long Period Variables. *Tonantz. and Tacub. Obs. Bull.*, Vol. 4, p. 114
- [5] Houdashelt, M. L., Bell, R. A., Sweigert, A. V., Wing, R. F., 2000: Synthetic Spectra and Color-Temperature Relations of M Giants. *Astron. J.*, Vol. 119, p. 1424
- [6] Barthés, D., Luri, X., 2001: Period-Luminosity-Colour Distribution and Classification of Galactic Oxygen-rich LPVs. II. Confrontation with Pulsation Models. *Astron. Astrophys.*, Vol. 365, p. 519
- [7] Fowler, A., 1903: The Spectra of Antarian Stars in Relation to the Fluted Spectrum of Titanium. *Mon Not. Roy. Astron. Soc.*, Vol. 64, Appendix p. 16
- [8] Feast, M. W., Glass, I. S., Whitelock, P. A., Catchpole, R. M., 1989: A Period-luminosity-colour Relation for Mira Variables. *Mon Not. Roy. Astron. Soc.*, Vol. 241, p. 375

- [9] Moore, P., 1979: *The Guinness Book of Astronomy Facts & Feats*, Guinness Superlatives Limited, Enfield, Middlesex
- [10] Knapp, G. R., Pourbaix, D., Platais, I., Jorissen, A., 2003: Reprocessing the Hipparcos Data of Evolved Stars. III. Revised Hipparcos Period-luminosity Relationship for Galactic Long-period Variable Stars. *Astron. Astrophys.*, Vol. 403, p. 993
- [11] Whitelock, P., Marang, F., Feast, M. W., 2000: Infrared Colours for Mira-like Long-period Variables Found in the Hipparcos Catalogue. *Mon Not. Roy. Astron. Soc.*, Vol. 319, p. 728
- [12] Merrill, P., Strömberg, G., 1924: The Absolute Magnitudes of Long-period Variable Stars. *Astrophys. J.*, Vol. 59, p. 97
- [13] Rejkuba, M., 2004: The Distance to the Giant Elliptical Galaxy NGC 5128. *Astron. Astrophys.*, Vol. 413, p. 903
- [14] Reid, M. J., Goldston, J. E., 2002: How Mira Variables Change Visual Light by a Thousandfold. *Astrophys. J.*, Vol. 569, p. 931
- [15] Woodruff, H. C., Tuthill, P. G., Monnier, J. D., et al, 2008: The Keck Aperture Masking Experiment: Multi-wavelength observations of 6 Mira Variables. *Astrophys. J.*, Vol. 673, p. 418
- [16] Haniff, C.A., Scholtz, M., Tuthill, P. G., 1995: New Diameter Measurements of 10 Mira Variables - Implications for Effective Temperatures Atmospheric Structure and Pulsation Modes. *Mon Not. Roy. Astron. Soc.*, Vol. 276, p. 640
- [17] Ireland, M. J., Scholtz, M., 2006: Observable Effects of Dust Formation in Dynamic Atmospheres of M-type Mira Variables. *Mon Not. Roy. Astron. Soc.*, Vol. 367, p. 1585

- [18] Martin, D. Christopher, Seibert, Mark, Neill, James, D., et al., 2007: A Turbulent Wake as a Tracer of 30,000 years of Mira's Mass Loss History. *Nature*, Vol. 448, p. 780
- [19] Matthews, L. D., Libert, Y., Gérard, E., et al., 2008: Discovery of an HI Counterpart to the Extended Tail of Mira. *preprint*
- [20] Wareing, C. J., Zijlstra, A. A., O'Brien, T. J., Seibert, M., 2007: It's a Wonderful Tail: The Mass-loss History of Mira. *Astrophys. J.*, Vol. 670, p. L125

補遺

明るさを示す様々な等級

天体の明るさを示すために用いられる等級には、どの波長域を測定しているかで、さまざま種類がある。

すでにこのノートで用いられたものでは、*V* 等級, *B* 等級のどあるが、ミラ型変光星を理解する上では *K* 等級も欠かせない。これらの等級について少し説明を加える。

***B* 等級**：波長が 0.44 マイクロメートル付近の放射を光電変換装置で測定した際の明るさ。*B* は青 (blue) に由来する。

***V* 等級**：波長が 0.55 マイクロメートル付近の放射を光電変換装置で測定した際の明るさ。*V* は肉眼で見た明るさ (visual) に由来する。

***R* 等級**：研究者により多少異なるが、波長が 0.66 マイクロメートル付近の放射を光電変換装置で測定した際の明るさ。*R* は赤 (red) に由来する。

J 等級：波長が 1.26 マイクロメートル付近の放射を赤外線検知器で測定した際の明るさ。J は、アルファベット順で I (赤外, Infrared) の次であることによる。

K 等級：波長が 2.15 マイクロメートル付近の放射を赤外線検知器で測定した際の明るさ。K はアルファベット順で J の次であることによる。

全放射等級：全波長域の放射の強さを表す。当初、熱電対を用いて測定されたが、現在ではさまざまな波長域での測定に基づいて推定する。理科年表などでは「輻射等級」と記されている。物理学での用語に準じて表現すれば、「全放射等級」であろう。

変光星ノート No. 8 ミラの謎 – 今も
2008 年 8 月
柳町自然研究所
〒 980-0811 仙台市青葉区一番町 1-8-10-504