

再び活動期に入ったプレオネ

— Be 星の大気活動をさぐる —

小暮智一*・平田龍幸**

1. はじめに

プレオネは初冬の夜空を飾るプレアデス星団の一員で、B8 型, 5 等級の青白い星である。

プレオネが 1972 年に再び活動期に入ったという報告は 3 つの天文台から独立に発表された。パリ天文台, ヤーキス天文台, およびスミスソニアン天文台である。早速岡山天体物理観測所で撮影された分光乾板を調べてみると, 1969 年 12 月と 1971 年 8 月に撮ったものがある。いずれも活動期以前のものである。活動期に入った直後のものとしては 1972 年 10 月に撮ったのが 1 枚だけある。しかし, 1973 年後は機会あるごとに観測をつづけ, これまでの 4 年間に大気活動の展開する様子が大分明らかになって来た。他の天文台からはその後の詳しい解析は報告されてない。活動期はまだ前段で発達中であるが, 興味深い問題も出て来たので, 紹介をかねて中間報告をしてみた。

2. Be 星とガス殻星

本題に入る前に Be 星(輝線 B 型星)とガス殻星(Shell star—といっても外層大気は殻状でなく, 円板状ないし環状のものが多いと思われるので, shell star, ガス殻星という呼び方は正確ではないが慣例に従っておく。)のスペクトルの特徴を簡単にまとめておこう。

Be 星は B 型星のなかで水素のバルマー線, 特に H α 線に輝線を示す星で, Fe II, Ti II などの電離金属線に輝線のあらわれることもある。Be 星は一般に自転速度が大きく ($V \sin i = 200 \sim 400$ km/s), 輝線成分は浅く広がったバルマー吸収線の上に重畳して現われるのが普通である。

一方, ガス殻星の特徴は鋭い吸収線の存在にある。それらはガス殻吸収線とよばれ, バルマー線の中心や Fe II, Ti II, Si II などの電離金属線に見られる。その現われ方は A 型超巨星 α Cyg (デネブ) によく似ていて, α Cyg 線と呼ばれたりする。バルマー輝線は通常ガス殻吸収線の両側に現われるが, 輝線を伴わないガス殻星もある。

ガス殻吸収線の形成は Be 星の場合と同じく拡がった外部大気によるもので, 十分なガスが星表面と観測者の

間に存在し, その温度が α Cyg の大気 (~ 1 万度) に近ければよい。ガス殻星の平均の自転速度は通常の Be 星より大きく, 外部大気のガスは赤道面に集中していると考えられる。また, 通常の Be 星にもガス殻吸収線の現われる時があり, それも晩期 B 型星ほど確率が高い。

この意味ではガス殻星というよりはガス殻現象と呼ぶべきかも知れない。また, ひとくちにガス殻星とよばれても, 現象の現われ方には星による個性がある。プレオネは一つの典型であって, 一つの星が B 型星, Be 星, ガス殻星とスペクトル的に変化するのである。これに類似の星としては通常は Be 星であるが, 1932~1942 の間に 3 回にわたってガス殻現象を示した γ Cas がある。

プレオネの研究が重要な意味をもつのは, こうしたスペクトル変化を追跡することによってガス殻星現象を含めた Be 星現象の解明に役立つと期待されるからである。その意味でプレオネが新しい活動期に入り, 大気変動を直接追跡する機会が得られたのは幸運である。

3. スペクトル変化

プレオネ観測の歴史は 1888 年にハーバード天文台で Be 星として観測されたときに始まる。1903 年まではバルマー輝線が記録されているが, 1905 年にヤーキス天文台の E. B. フロストが観測したときには輝線はすべて消失し, 正常な B 型星にもどっていた。

プレオネに再び輝線が現われたのは 1938 年 10 月である。D. マクローリンは水素輝線の中心部および Fe II, Ti II, Sc II, Cr II, Ni II などにガス殻吸収線を確認し, プレオネがガス殻星になったことを示した。これが第 1 回活動期のはじまりである。その後, ガス殻活動は次第に発達して 1945~46 年に最盛期に達し, 次節に述べるような活動現象を示しながら, 1954 年にガス殻吸収線は消失する。

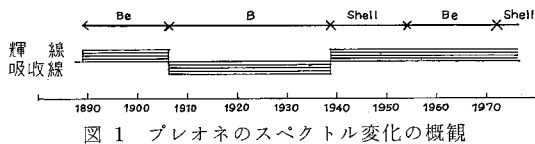
その後はプレオネは通常の Be 星となり, バルマー輝線強度の変化は N. イルマズ嬢によって測定されている。それを見ると H α 輝線強度は平均的にはゆるやかに増大の後, 1960 年ごろの極大を経て, 次第に減少し, そのまま 1972 年に始まる新しいガス殻活動期につながるのである。1954~1971 にわたるこの時期は活動期とは呼ばれていないが, H α 輝線の変動を詳しく見ると, かなりはげしい短期的変化を伴っていて, この間も外部大気は決して安定でなかったことを物語っている。

1888 年から 1975 年に至るプレオネのスペクトル変化

* 茨城大学理学部

** 京都大学理学部

T. Kogure, R. Hirata: Pleione in the New Shell Phase—An Atmospheric Activity of the Be Star—



の概略をまとめたのが図1である。この図で興味深いのは Be—B—ガス殻星—Be—ガス殻星、といった分光的变化が17年または34年ごとに現われている点である。プレオネにもなにか太陽活動周期に似たようなものが存在するのであろうか。

4. 1938~1954年の活動期

この時期の大気活動は1945~46年の極大期を境として前半と後半とはかなり異った様相を示す。

前半はいわば成長の時代である。ガス殻吸収線は次第に強度を増すが、その視線速度はどの吸収線もほぼ+10 km/sで星自体の視線速度に等しく、赤道をとりまく外部大気の膨張は極めてゆるやかであることを示している。

電離金属線の現われ方は全般的には前述のように α Cyg によく似ているが、それと比較して O. ストルフェは顕著な電離金属線の電離ポテンシャルが活動初期の Ni II (18.2 eV), Cr II (16.6 eV) などから次第に低下し、活動極大期では Sr II (11.0 eV), Fe I (7.8 eV) まで下っていることに注目している。

活動期前半の静かな成長に比べて後半は動的な展開と消滅の時期である。それを示すのがバルマー・プログレッションである。バルマー系列番号がすすむにつれて視線速度が増大または減少するとき、プログレッションがあるという。これは外部大気の流出速度が星の中心からの距離によって異るときに現われる。図2にはプレオネの場合の負のプログレッションを示す。

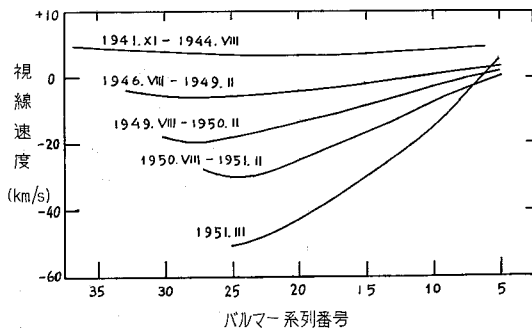


図2 プレオネの前回活動期にみられた平均のバルマー・プログレッション (P.W. メリル 1952)

リンバー (1969) はその説明に加速的な速度場を考えた。彼は恒星表面からのガス供給が1946年まで続いた後停止し、それ以後は仮定された速度場に沿って大気ガスは散逸していったと考えた。これによってバルマー線 H25 の視線速度、吸収線強度変化に説明を与えたが、プ

ログレッションそのものは説明できないことが、彼の弟子のマールボローによって指摘されている。

この活動期間中、水素バルマー輝線は顕著な強度変化を示さなかったようである。活動期後半の吸収線大気のダイナミックな過程に比べると対照的であるが、輝線を形成する外部大気はそれとは独立に存在していたのであろうか。いずれにしても、水素輝線についての観測資料が少ないのは残念である。

5. 新しい活動期のプレオネ

1972年に始まった新しいガス殻活動期は4年経った現在、全般的な過程は前回の活動期とよく似ている。ここではわれわれの観測は基いてやや定量的に大気の活動状況を眺めてみよう。

はじめに、輝線およびガス殻吸収線の強度変化を表1に示す。また、H α 輝線は図3に見るように、その強度が活動期前の値から一たん減少し、それから徐々に回復している。これから活動期以前に存在していた輝線大気が消滅し、新しい輝線大気がゆるやかに形成される様子が示唆される。これにたいして電離金属線の強度は着実に増加しつつある。しかし、1975年現在も、A. B. アンダーヒルが前回活動期の極大時 (1946) に測定した値よりは大幅小さく、ガス殻の成長はまだ途上にあるといえる。

次に、バルマー線のガス殻吸収線の出来方を考えてみる。前に述べたように、外部大気が光球前面をおおうときガス殻吸収線が形成される。したがって、吸収線の強度は光球面が外部大気におおわれる割合 β ($0 \leq \beta \leq 1$) と、外部大気の平均の光学的厚さ——ここでは H α 線にたいする $\tau_0(H\alpha)$ を採用する——とによって決定される筈である。この原理をバルマー系列番号にたいする吸収

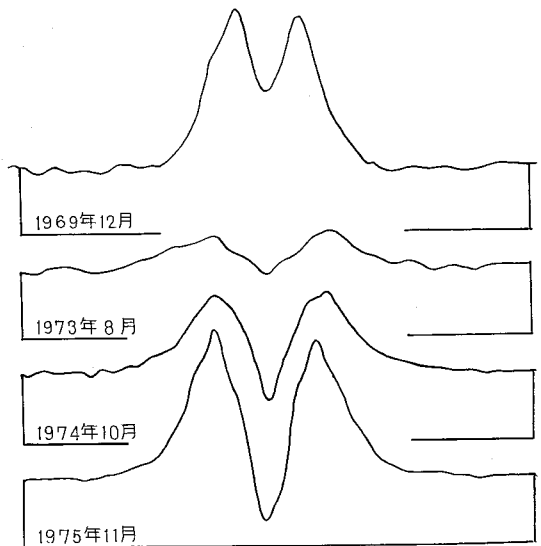


図3 H α 線輪郭の変化

表 1 スペクトル線強度（等価幅）の変化

観測時期	バルマー輝線		電離金属, 吸収線				注
	H α (Å)	H β (Å)	Fe II λ 4233 (mÅ)	Ti II λ 4395 (mÅ)	Fe II λ 4508 (mÅ)	Fe II λ 4584 (mÅ)	
1969 12月	21.6	2.6	—	—	—	—	活動期前
1972 10月	—	—	110	—	—	—	
1973 8月	7.8	—	130	—	—	—	
11月	9.6	0.83	140	130	130	240	
1974 8月	11.1	—	200	150	—	—	
10月	11.9	0.91	340	230	160	320	活動期
1976 11月	16.1	1.24	377	324	270	426	
1946 2月*	—	—	—	—	626	768	前回活動期(極大時)

* A. B. アンダーヒル (1949) による.

線中心強度の関係に適用すると、観測値と理論曲線との比較から上記パラメーターが求められる。簡単のために、赤道方向から見たモデル (図 4) を考えると、外部大気は赤道方向に R_a の距離までひろがり、高さ H をもつ。解析の結果はこの大気が光学的に厚い a 層と、比較的薄い b 層とに分けられることを示している。

他方、赤道方向への大気のひろがり角は角運動量保存を仮定すると、輝線または吸収線の幅の測定から推定される。H α 輝線と H δ 吸収線から導いたひろがり半径をそれぞれ R_e , R_a とし、図 5 に H_a , H_b と共に、その時間変化を示す。この図からわかるように、外部大気は拡がりつつあるが、その速度は極めて小さい。図から読みとると

$$\frac{dR}{dt} \approx 0.03 \text{ km/s}, \quad \frac{dH}{dt} \approx 0.02 \text{ km/s}$$

の程度である。この緩やかな膨張も前回の活動期前半とよく似ている。

さて、外部大気の拡がり角と、その平均の光学的厚さが知れると大気中での平均電子密度 \bar{N}_e と、大気質量 M_{gas} とが計算できる。その結果を時間変化として示したのが図 6 で、この図から大気は現在までガスを蓄積し

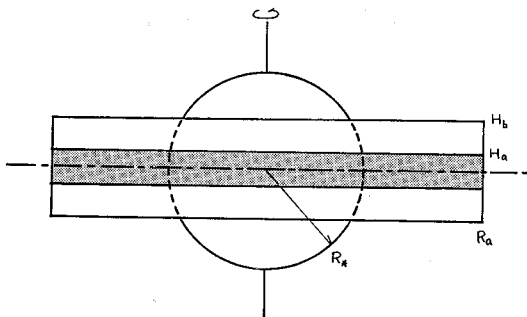


図 4 プレオネの外部大気モデル
光学的に厚く赤道に近い a 層と、光学的に薄く、 a 層をはさむ b 層とに分かれる。

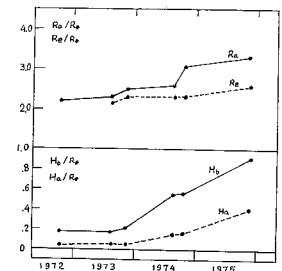


図 5 プレオネ外部大気のひろがりの時間変化

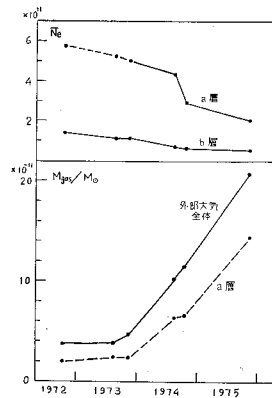


図 6 外部大気に
おける平均電子密度 \bar{N}_e と、大気
質量 M_{gas} の時間
変化

つつあることがわかる。蓄積される割合を読みとると

$$\frac{dM_{\text{gas}}}{dt} \approx \begin{cases} 10^{-11} M_{\odot}/\text{年} & (1973 \text{ 年}) \\ 10^{-10} M_{\odot}/\text{年} & (1974 \sim 1975 \text{ 年}) \end{cases}$$

が得られる。これは星の表面からの質量流出量が年とともに増大しているものと解釈される。

今回の活動現象が前回と類似の過程をたどるならば、星からの質量供給は極大活動期まで続いて、そこで停止し、それ以後は外部大気の散逸過程に移るのであろう。その過程が今回はどのように展開するか、今後の観測に期待したい。

6. 活動機構に関する諸問題

プレオネが 17 年ないし 34 年ごとに形態を変える様子は既に述べたが、その原因については皆目わかっていない。高速自転が一因であろうとは推測されるものの、それでは解答にならない。特に、大量の質量流出を伴うガス殻活動には何らかの内部的機構が必要である。それを観測的に見出すのは容易ではないが、その徴候と思われる二、三の現象に注意を向けてみよう。

(1) Ca II K 線

新しい活動期に入って、Ca II K 線には他の金属線にない特徴が見出された。そのガス殻吸収線に幅広く浅い吸収線が重なって現われたのである。浅い吸収線は中心

の深さ約 0.1, 半幅は 5.5 \AA に達する。幅を自転速度に換算すると 430 km/s となり, 星自体の自転速度 $V \sin i = 340 \text{ km/s}$ より著しく大きい。Ca II H 線は H ϵ と重なるので見わけにくい, 同様の特徴が存在するらしい。

この幅広い吸収線の形成は星の赤道付近に形成された低温の高速自転帯によるものと考えられるので, この高速自転帯による自転不安定が光球面からの質量流出の直接的原因であるという考え方も成り立ってくる。この考え方の当否は, 活動期後半の, 多分, 質量流出の停止した時期にこの自転帯がどうなっているかによって検証できるのではないと思われる。

(2) バルマー吸収線の翼部のふるまい

B型星の光球面で作られる水素のバルマー吸収線は一般にシュタルク効果によって雄大な翼部をもつ吸収輪郭を形成している。更に, プレオネのような高速自転星ではドップラー効果によって吸収線は更にひろげられる。バルマー線の中心部はガス殻吸収線。輝線成分によって複雑な輪郭になるが, 翼部は星そのものを見ていると考えてよい。プレオネでは新しい活動期に入ってこの翼部が一たん弱くなり, ガス殻吸収線の発達と共に元の強さにもどりつつあることが観測された。同様の傾向は前の活動期においても見られたし, 若干異なるが, γ Cas のガス殻活動期にも類似の現象が見られた。 γ Cas の場合は外部大気による連続光がその原因と考えられたが, プレオネでは事態はそれ程単純ではないようである。

(3) 光度変化

プレオネは活動期に入る前後に著しい光度変化を示すという性質をもっている。図7に前回と今回の活動期における光度変化を示してある。前回の資料はピネンディク (1948) による写真等級を, 今回の分は A. S. シャロフと V. M. リューティ (1972, 1973, 1975) による三色測光を中心に, われわれの岡山での観測結果を加えたものである。全体的なパターンの類似性が注目される。活動期直前の光度変化が何を意味するか, 興味深い問題である。

再び γ Cas との比較をとると, プレオネは(色-光度)図や二色図 ($B-V$, $U-B$) でも γ Cas と異なるユニークなふるまいを見せる。その相異点の原因がどこにあるかもあわせて考察すべきであろう。

いずれにしても, 上記 (1), (2), (3) の現象を統一的に説明するには光球自体の変化, 外部大気の影響を総合的に考慮しなければならないが, それは今後の課題である。

(4) 他のガス殻星

プレオネは典型的なガス殻星であるが, ガス殻現象をより一般的に理解するために, 他のガス殻星の例を二, 三あげてみよう。

まず, 比較的安定した外部大気をもつガス殻星の例と

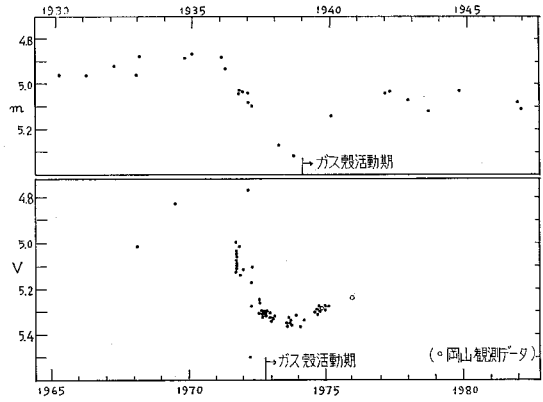


図7 プレオネの活動期開始前後の光度変化

して 1 Del がある。ガス殻吸収線の輪郭は対称的で, その視線速度は星自身のものと一致している。もちろん, バルマー・プログレッションは示さない。EW Lac もそれに近いが, 詳しく見ると外部大気は数年の時間規模で変動していることが見出されている。

他方, 変動するガス殻星としては, プレオネや γ Cas のように大量のガスを流出し散逸させる型のものと, 48 Lib, HD 33232 のように振動型ともいべきものがある。例えば, 48 Lib は 1934 年頃から約 10 年の周期で振幅が 100 km/s に達する速度変動を示し, それに伴って顕著なバルマー・プログレッションをおこした。

また, ζ Tau, ϕ Per, AX Mon のように連星であるために複雑なふるまいを示す星もある。チェコスロバキアの P. ハルマネックらはすべてのガス殻星は連星ではないかと示唆しているが, ガス殻星にはさまざまな型のものがあり, ガス殻現象にもバラエティがあるので, 一つの統一したイメージで解釈するのはまだ困難ではないと思われる。

7. むすび

プレオネは一つの星が B—Be—ガス殻星の三様のスペクトル変化を 17 年という時間規模で見せてくれる興味深い星である。

現在, 新しい活動期が進行中で, 輝線および殻吸収線の強度が増加している。これは星の赤道付近から流出したガスで形成されている外部大気が成長しつつあることを示している。この外部大気がどこまで発達し, やがて極大期を経てどのように消滅していくか, を追跡するのが今後の課題である。

なお, われわれはもっぱら可視域のスペクトル解析を実施しているが, プレオネの表面活動を全面的に理解するには近赤外から, さらには遠赤外までの観測が望まれる。これは流出したガスの運命を見きわめるためにも必要である。また, 星自体の変動をさぐるには遠紫外の観測が有力な手段になるのではないと思われる。