

輝線星分光観測のすすめ

Invitation to the spectroscopic observations of emission-line stars

美星天文台 小暮智一

1. はじめに Introduction

輝線星(emission-line stars)に対して通常の吸収線を示す星は正常星(normal stars)と呼ばれるが、どんな星にも何らかの特異さがあって、正常星などはないという極論もある。太陽のような典型的な正常星でも、彩層起源の輝線成分が見られることがあるから、ひとくちに輝線星とは何かと定義するのは難しい。通常は「可視域でかなり強い輝線を示す星または示した星」と理解されている。そのように限定しても、輝線星は早期型星(高温度星)から晩期型星(低温度星)まで多様な星を含み、HR図上のほとんど全域にわたっている。ここでは輝線星全部について言及することは出来ないので、その一部について観測上の興味ある例や、期待される成果なども述べてみよう。

輝線を形成する機構は大きく分けて熱的と非熱的に分けられる。熱的は星の光球からの放射によって電離、励起されたガスが再結合、カスケード遷移によって輝線を放射する機構で早期型星の広がった大気(星周圏)に主として働く。一方、非熱的機構は中期、晩期型星の対流層で発生した力学的エネルギーによって加熱され、電離、励起された後に輝線を形成する過程で、彩層、フレアなどの輝線がそれに当たる。非熱的には降着円盤、近接連星に見られるガス流も含まれ、その場合、衝撃波加熱が主要な役割を果たしている。

従って、輝線を観測し、その形成機構や輝線の変動を考察することによって星周圏の構造や彩層活動、フレア、ガス流の非熱的構造の解明に迫ることが出来る。しかし、そこまで難しく考えなくても、輝線の観測はそれだけで十分に興味の対象になる。趣味(探求心と審美感)と実益(科学的貢献)を兼ねた観測が可能である。

2. 輝線星分光の楽しみ How to enjoy emission-line spectroscopy

最近は公共天文台にも分光器を備えたところが増えているので、ぜひ、輝線星の分光にアタックすることを勧めたい。分光観測にはいろいろの楽しみがある。もっとも分光器といっても分散はさまざまであり、望遠鏡や観測目的などによって言い方は異なるが、ここでは 20 \AA/mm 以下程度が高分散、 $50 - 100 \text{ \AA/mm}$ 程度が中分散、 100 \AA/mm 程度以上を低分散としておこう。分散によって観測対象や観測目的も異なるが、「分光の楽しみ」という観点からは一般的に次の点が上げられよう：

(1) 多様な輝線の現れ方を楽しむ Various appearance

ここでは輝線星が主テーマであるが、輝線スペクトルという点では星雲の観測を付け加え、星との比較も楽しみたいものである。19世紀の中頃、初めて星雲のスペクトルを見たW・ハギンスは星雲の輝線スペクトルに感銘し、星雲が星の集団でないことを証明したのであった。星雲も星も共に変化に富んだ輝線を見せてくれるので、もし、カラーでスペクトルを撮ることが出来ればすばらしいコレクションになろう。

(2) 時間的変動を追いかける Various time variations

天体観測の面白さはなんと言っても時間的変動を追いかける点にある。輝線スペクトルの場合も例外ではない。輝線星の大部分は輝線に変動を示すので時間をかけて追跡するといろいろ面白い現象に巡り会う。ある星は輝線が消えて吸収線に戻ったり、ある星は輝線輪郭に大きな変動を示す。ただ、時間スケールは様々なので星によっては長期間の忍耐強い観測の継続が必要になる。

最近まで星の観測は測光と分光が別々の分野になっていて、相互の協同というのがあまりなかったと言える。そのため対象となっている星も案外共通性に欠ける。しかし、輝線星の中には変光や色の変化を伴うものも多く、測光と分光の共同観測が期待される。

(3) 新しい輝線星を探す Search of new stars

これは多少将来的展望にはいるかも知れないが、シュミット望遠鏡やリッチークレチィエン望遠鏡のように視野の広い望遠鏡に対物プリズムを付けて、視野の星をすべて分光するので、多数の星について輝線の有無をパトロールしたり、新しい輝線星を検出したり出来る。オリオンやおうし座など領域によっては新しい発見も期待される。銀河面から離れると輝線銀河などの検出も可能となる。ただ、輝線天体は一般に微光なので、小型の望遠鏡であればまずは知られた領域の星についてパトロールによる変動の検出が観測の主体になるであろう。

3. どんな星をねらうか What are the favorite stars for observations.

ここでは中小口径の望遠鏡による中低分散の分光を念頭において観測のねらいを付けてみよう。口径1 m以上の望遠鏡であれば 10 \AA/mm 台の分光も期待できる。

(1) 明るい星、輝線の強い星：中小口径であれば当然、それぞれの輝線星タイプの中で明るい星をねらうことになる。また、輝線の強い星が魅力のあるスペクトルとなる。コレクションを目指すのであれば、輝線のはっきりした星を選びたい。明るい星雲も視野に入れておこう。

(2) 時間変動や突発的変化の期待される星を選びたい。輝線が強くても変動の少ない星もあるし、不規則にゆっくり変動する星、突然のように輝線を見せる星など、変動はさまざまな形を取るが、一般に言うと輝線強度の大きな変動をキャッチするにはかなり長期間の継続的観測が必要である。フレア星のような場合、新星のような突然の現れ方を示すのでチャンスに左右される面もある。幾つかのプログラム星をリストしてそれを定期的にパトロールするのがこつである。

(3) 共同観測のすすめ

最近では特定の星について国際的なキャンペーンで集中的に観測する例が増えている。注意すれば何かの星について共同観測の呼びかけを目にすることが出来る。しかし、そのような例はまだまだ十分とは言えないし、自分の観測条件と合わない場合も多い。従って、身の回りのグループによる継続的な観測を勧めたい。とくに、光電測光との連携は科学的にも意義が大きい。

4. どんな輝線をねらうか Important emission lines

分光観測では分光器の分散度と目的の輝線によって観測波長域を決めなければならない。低分散であれば可視域の主要部分がカバーされる。

(1) 星、星雲を問わずまずは $H\alpha$ 線 ($\lambda 6563 \text{ \AA}$)を見よう。

ほとんどの輝線星では $H\alpha$ 線が最も強い輝線を示すので、輝線の消長を見るには $H\alpha$ 線が適している。ただし、WR星では $H\alpha$ 線は弱い、電離ヘリウムの線に重なっている。また、輝線が強すぎると輪郭がつぶれてしまうので、輝線のダブルピークやP Cyg型輪郭などで視線速度を測定すると言った場合には輝線強度の低い輝線を選んだ方がよい。

(2) 早期型星ならば $H\beta$ ($\lambda 4861 \text{ \AA}$)、 $H\gamma$ ($\lambda 4341 \text{ \AA}$) 輝線が適当である。また、この波長域 ($\lambda 4000 - \lambda 5000 \text{ \AA}$)には Fe, Ti, Si, Mg などの金属輝線も多数現れることもある。

(3) 晩期型星ならば Ca II H, K線 ($\lambda 3933, 3968 \text{ \AA}$)に注目しよう。これらの線は早期型星には現れず、晩期型星の彩層活動の指標ともなっている。

(4) 星雲ならば禁制線で $H\alpha$ 付近には[N II] ($\lambda 6548, 6584$), [S II] ($\lambda 6716, 6731 \text{ \AA}$), [O I] ($\lambda 6300, 6363 \text{ \AA}$), $H\beta$ 付近では[O III] ($\lambda 4959, 5007 \text{ \AA}$)などが、星とは明らかなコントラストを見せて現れるはずである。星の中にも共生星のように禁制線を示すものがある。

ここで輝線の見方についてひとこと述べておこう。

(1) 輝線は通常、おなじ波長の吸収線の上に重なって現れることが多いので、吸収線の上にどれだけのピークの高さを持つか、どれだけの等価幅を持つかによって輝線強度を表す。どちらも輝線の両側の連続スペクトルの強度を基準にして測る。等価幅は輝線の面積 (輝線の高さ \times 波長) を連続光の高さにならしたときの波長幅であるから単位はオングストローム (\AA)になる。

(2) 輝線輪郭はバルマー線 ($H\alpha$ 、 $H\beta$ 、 \dots)のような幅の広い輝線では中程度の分散でも輪郭を見ることが出来る。輪郭で注目されるのは輝線の、半値幅、非対称性、ダブルピークの有無や P Cyg 輪郭などである。輝線星に見られる輝線輪郭の主なタイプの概略を図1に示しておこう。

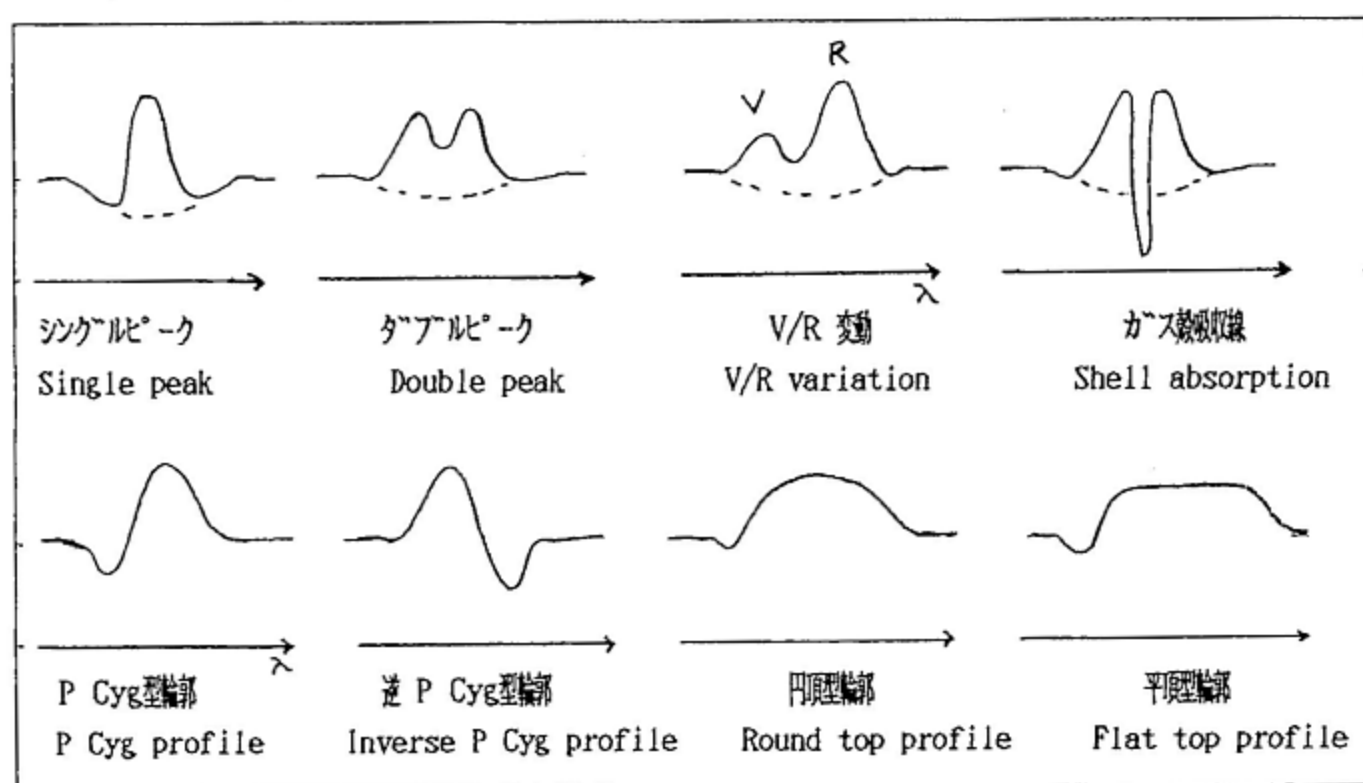


図1. 輝線星に見られる輝線輪郭のいろいろ

5. 早期型輝線星 Early-type emission-line stars

(1) WR星: WR (オルフ・ライエ) 星は19世紀の半ばにパリ天文台の Wolf と Rayet によって発見された特異星で、幅広く、強い輝線スペクトルを示し、吸収線はほとんど見られない。輝線は N, C, O などの2回ないし4回電離したイオンの線で、これらの元素の顕著さに応じて WC (C-系列)、WN (N-系列) に分けられるが、後になって WO (O-系列) が付け加えられた。WR星のスペクトルの例を図2に示そう。これは Torres & Massey (1987) のスペクトルアトラスによるもので輝線を形成するイオン名も記入されていて便利である。図に見るように幅広い輝線が見られるが、輝線の広がり星風の高速流出を表しており、流出速度は 2000 から 3000 km/s に達する。これらの輝線は長期的にはほぼ安定しているが、最近高分散スペクトルによって数日以内の急速な変動が輝線の強度や輪郭に観測されている。これは輝線を形成する高密度、高速度の恒星風の不安定性によるものと考えられている。

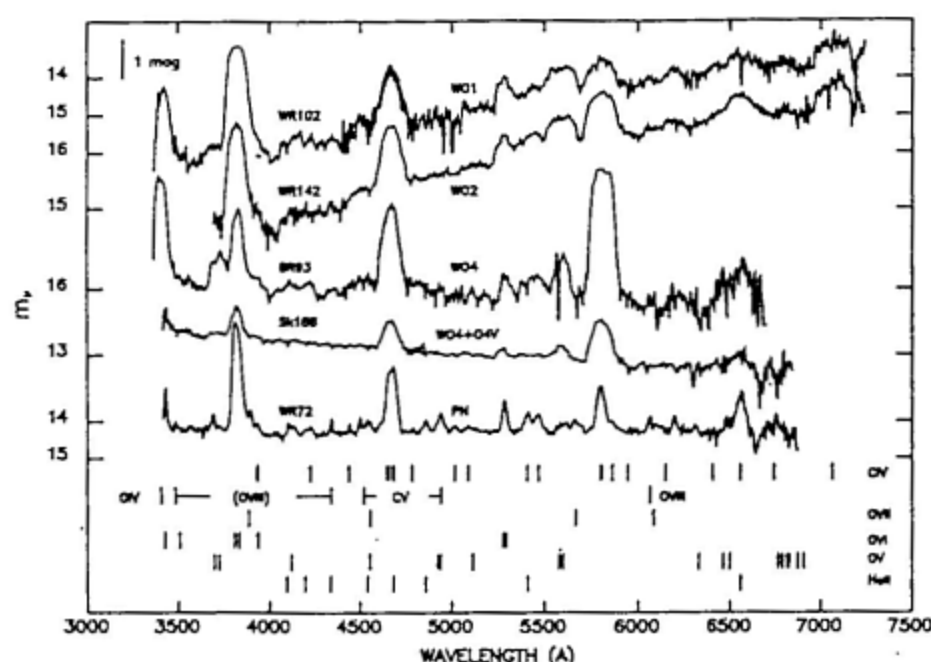


図2 WR星のスペクトルアトラスの例
(Torres & Massey, 1987)

(2) P Cyg 星と LBV (最輝青色変光星)

LBV (Luminous Blue Variable) は HR 図の最上部に分布する超巨星の仲間で、星として安定に輝くことの出来る上限に近い質量を持った大質量の星ばしである。現在観測されている最大質量の星は南天の η Car であるが、それに次ぐのが北天の P Cyg 星である。そのほか、S Dra, AG Car など幾つか知られているが南天に多い。

P Cyg は強い輝線を示す早期 B 型の超巨星である。輝線の輪郭は赤側に輝線、青側に吸収成分をもつ、P Cyg 型輪郭のプロトタイプになっている。図3に美星天文台で得られた高分散スペクトルの例を示そう。この輪郭は広がった大気からのガスの流出を表し、光球の前面で観測者に向かうガスが青側の吸収成分を作るが、この成分の Doppler 移動量からガスの流出速度が測定される。P Cyg 星では流出速度はおよそ 200 - 220 km/s である。

P Cyg は紀元 1600 頃に超スロー新星として 3 等星まで明るくなり、その後 1650 年代にも増光を示したが 1700 年頃からは 6 等星から緩やかに明るさを増し、現在

5等星として比較的安定状態にある。しかし、最近の観測によると数10日のスケールで輝線強度と流出速度 (Stahl & Kaufer, 1994)、および明るさ (de Groot, 1990) を変えている (図4)。明るくなると輝線強度が低くなるという示唆もあるがはっきりしない。この星は明るくスペクトルも賑やかなので共同観測をやってみれば面白いであろう。

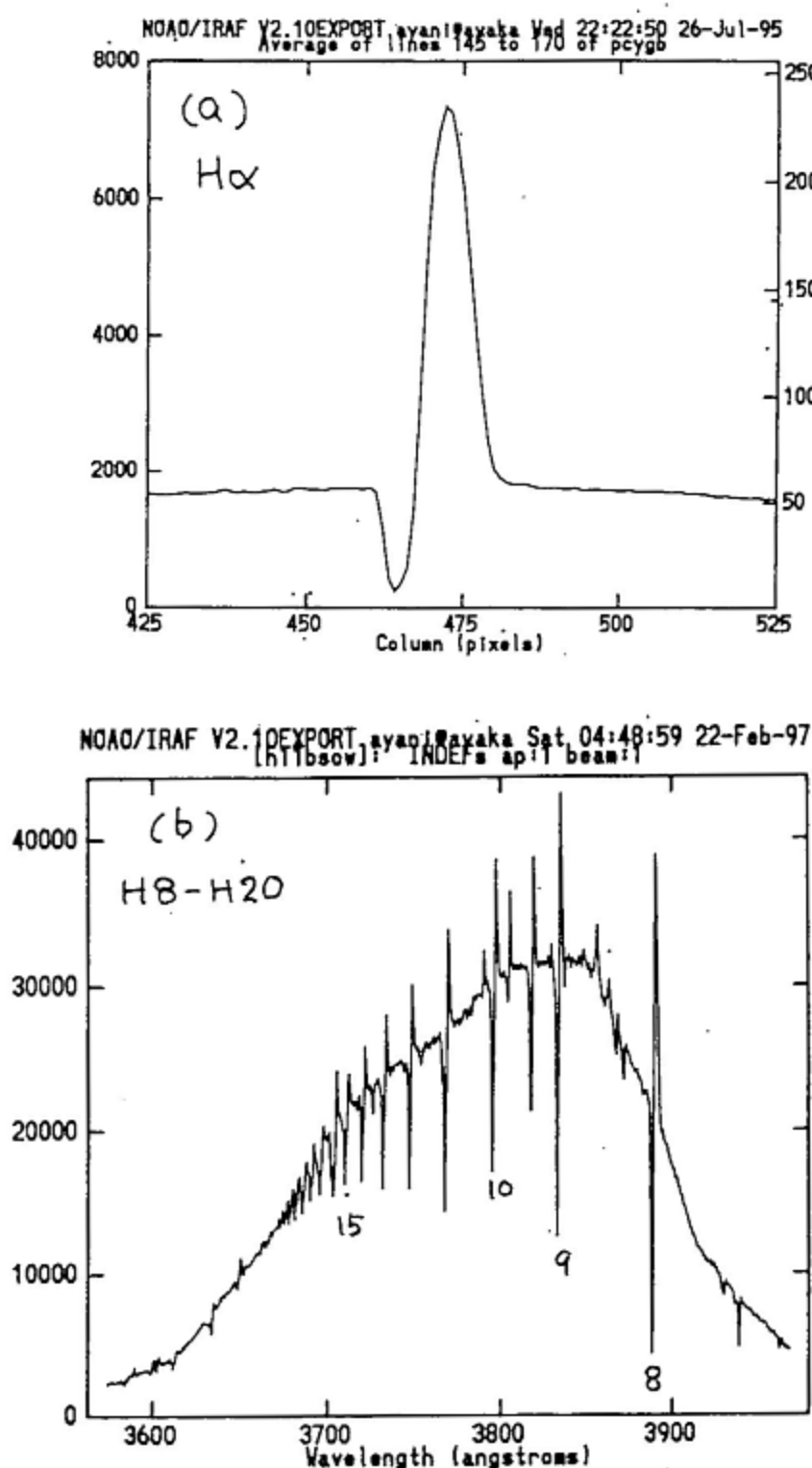


図3 P Cyg 星のスペクトル
(美星天文台における高分散
スペクトルの例, 未整約)
(a) H α 、(b) H8-H20

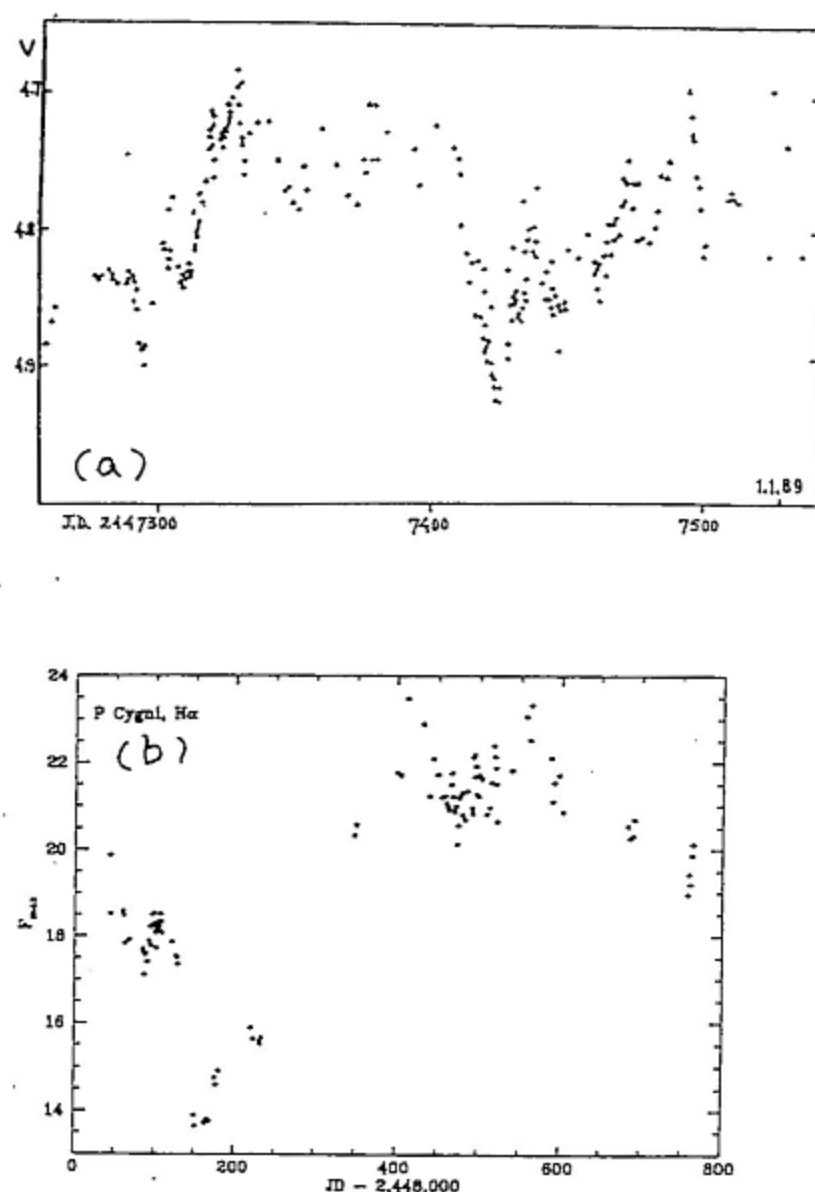


図4 P Cyg 星の変動観測
(a) V等級 (de Groot, 1990)
(b) H α 輝線ピークの強度
(Stahl & Kaufer 1994)

(3) 輝線B型星 (Be星) Be stars

主系列のB型星のうち高速自転の20%程がBe星として、バルマー線、電離金属線などに輝線を示す (あるいは過去に輝線を示した経歴を持つ)。明るい星のなかにBe

星がかなりあるのでその意味では観測しやすい星である。

B e 星はHR図上の星では最大の自転速度を持つ星で、赤道上の速度は平均で 250 km/s、なかには 450 km/s という高速自転のB e 星もある。こうした高速自転が一因となり赤道の周辺は円盤状またはドーナツ状の星周圏に取り巻かれる一方、高緯度帯からは高温の星風が流れ出ている。可視域の輝線は星周圏で形成される。星周圏も高速で回転しており、自転軸と視線との角度や星周圏の発達具合によって単一ピークやダブルピークが現れる。スペクトルの変動は自転周期（1日前後）の短期と、数ヶ月から数10年という長期スケールに分かれるが、前者は自転や非動径振動が原因と考えられている。長期では位相変化とよぶ $B \leftrightarrow Be \leftrightarrow Be-shell$ 間の変化が最も顕著である。ここで Be-shell というのはB e 星のうちほぼ中心に鋭い吸収線を伴う輝線輪郭（図1）の星で光球前面に厚い吸収層の存在を示す星である。このような位相変化は数10年に1度程度起こることが多いが、数年で起こることもある。例えば Pleione (B8Vpe) は図5のようになっている。1971年頃からBe-shell に入ったがその直前から直後に

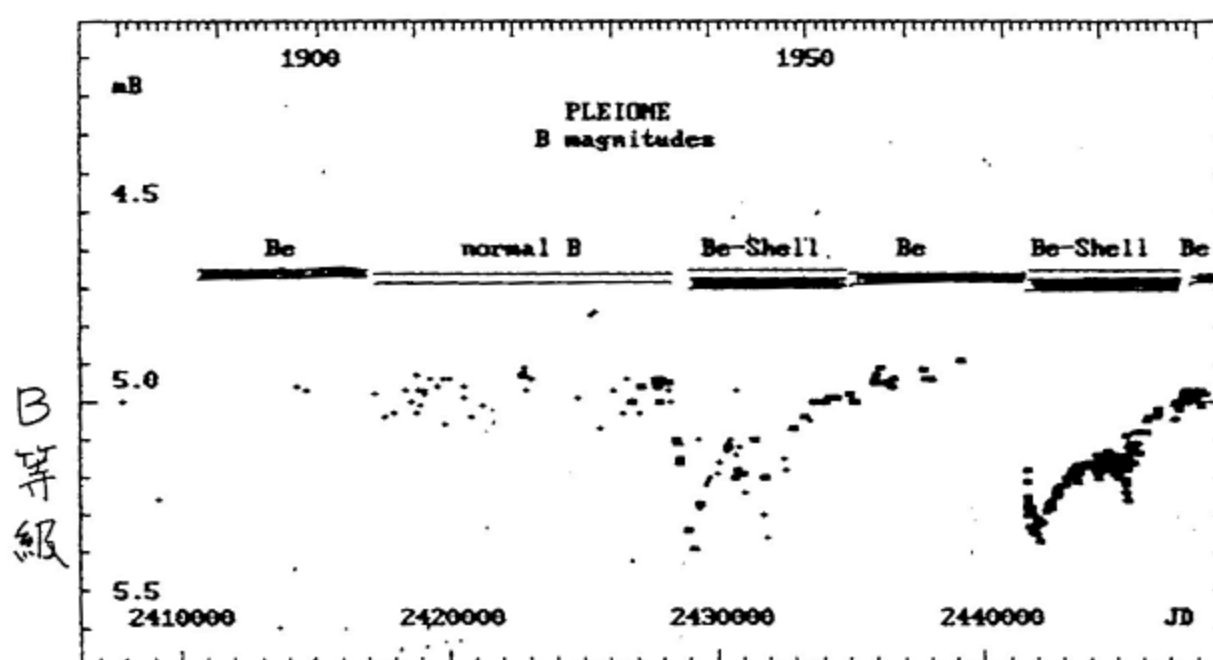


図5 Pleione (B 8 Vpe)の100年間の明るさ (B等級) と B-Be-Be, shell 間の位相変化 (Doazan et al. 1993)

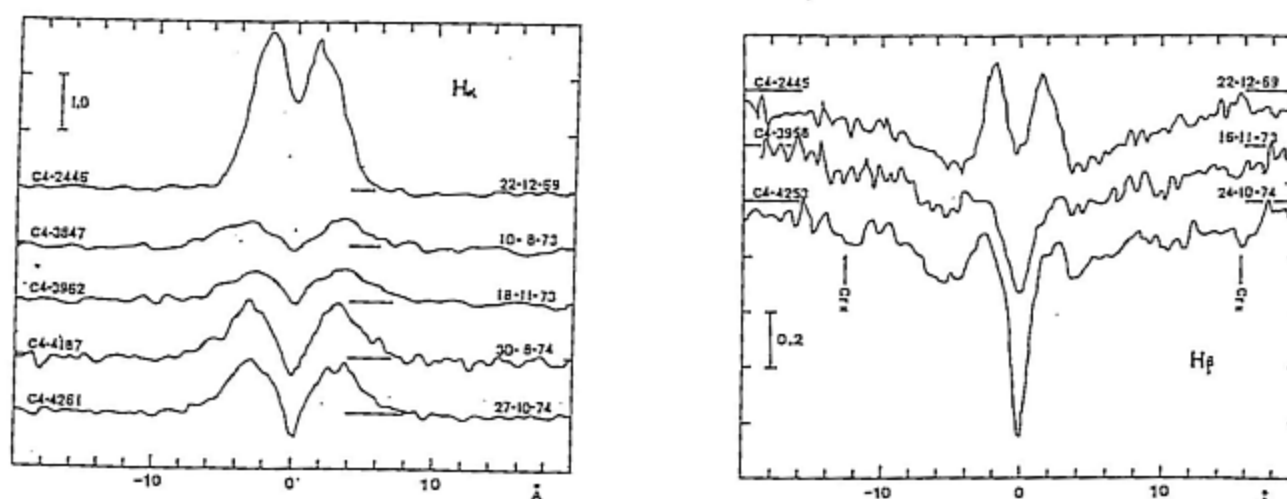


図6 Pleione の shell-phase 直前、直後の線輪郭 (Hirata & Kogure 1976)

かけての $H\alpha$ 、 $H\beta$ 線の線輪郭は図 6 のようである。位相変化は星周囲に構造的変化のあったことを示すが、光球本体の赤道帯での膨張が原因という示唆もある (Hirata 1995)。Pleione はプレアデス星団の一員であるが、この星団は表 1 に見られるように B 型星が多く、B e 星や変光星の割合も大きいので、この星団を長期間、集中的にパトロールすると面白いかもしれない。

(a plain-format table is available for those who can't parse HTML Tables)

Name	Bayer / Flamsteed	HD	SAO	V mag	Spectral Type	
Celæno	16 Tauri	23288	76126	5.46	B7 IV	variable
Electra	17 Tauri	23302	76131	3.70	B6 IIIe	emiss. line
	18 Tauri	23324	76137	5.64	B8 V	
Taygeta	19 Tauri	23338	76140	4.30	B6 IV	variable
Maia	20 Tauri	23408	76155	3.87	B8 III	variable
Asterope 1	21 Tauri	23432	76159	5.80	B8 V	variable
Asterope 2	22 Tauri	23441	76164	6.43	A0 Vn	
Merope	23 Tauri	23480	76172	4.18	B6 IVe	emiss. line
	24 Tauri	23629	76192	6.29	A0	
Alcyone	Eta / 25 Tauri	23630	76199	2.90	B7 III	emiss. line
	26 Tauri	23822	76255	6.47	F0	
Atlas	27 Tauri	23850	76228	3.62	B8 III	spect. binary
Pleione	28 Tauri	23862	76229	5.09	B8 IVe var	irreg. var

These data were taken from the SIMBAD database.

表 1 プレアデス星団の明るい星

(<http://www.astr.wisc.edu/~gibson/pleiades/> より転載)

6. 晩期型輝線星 Late-type emission-line stars

(1) フレア星、M 型輝線矮星 Flare stars, M-type emission dwarfs

フレア星は M 型の爆発的増光を示す星であるが、M 型矮星には輝線を示す星の割合が高く、それらは dMe と分類されているが、その中には良く知られたフレア星も多く含まれている。これらは非常に発達した彩層とフレア活動を示す。発達したコロナの存在も X 線観測から知られている。フレア星は静穏時にも $H\alpha$ 輝線を示すが、爆発時には輝線も強くなるようである。フレアは突発的な短時間の増光として現れ、継続時間は数秒から数時間の範囲にわたっている。太陽フレアと同じように爆発は可視光の他に電波、X 線などでも観測されるが、多波長での同時観測は例が少ない。ここでは AD Leo (dM3.5e) について Rodono たちが捉えた多波長での光度 (U、K、電波) とバルマー線、Ca II K 線などの輝線強度の時間変化を図 7 に示そう。爆発は紫外光 (U バンド) の顕著なフラッシュに始まり、バルマー線、He I 線の輝線に続いて Ca II K 線の輝線フレアがしばらく続く形になっている。これを見ると最初高温で爆発したガスが急速に冷え、拡散して行く様子がうかがわれる。

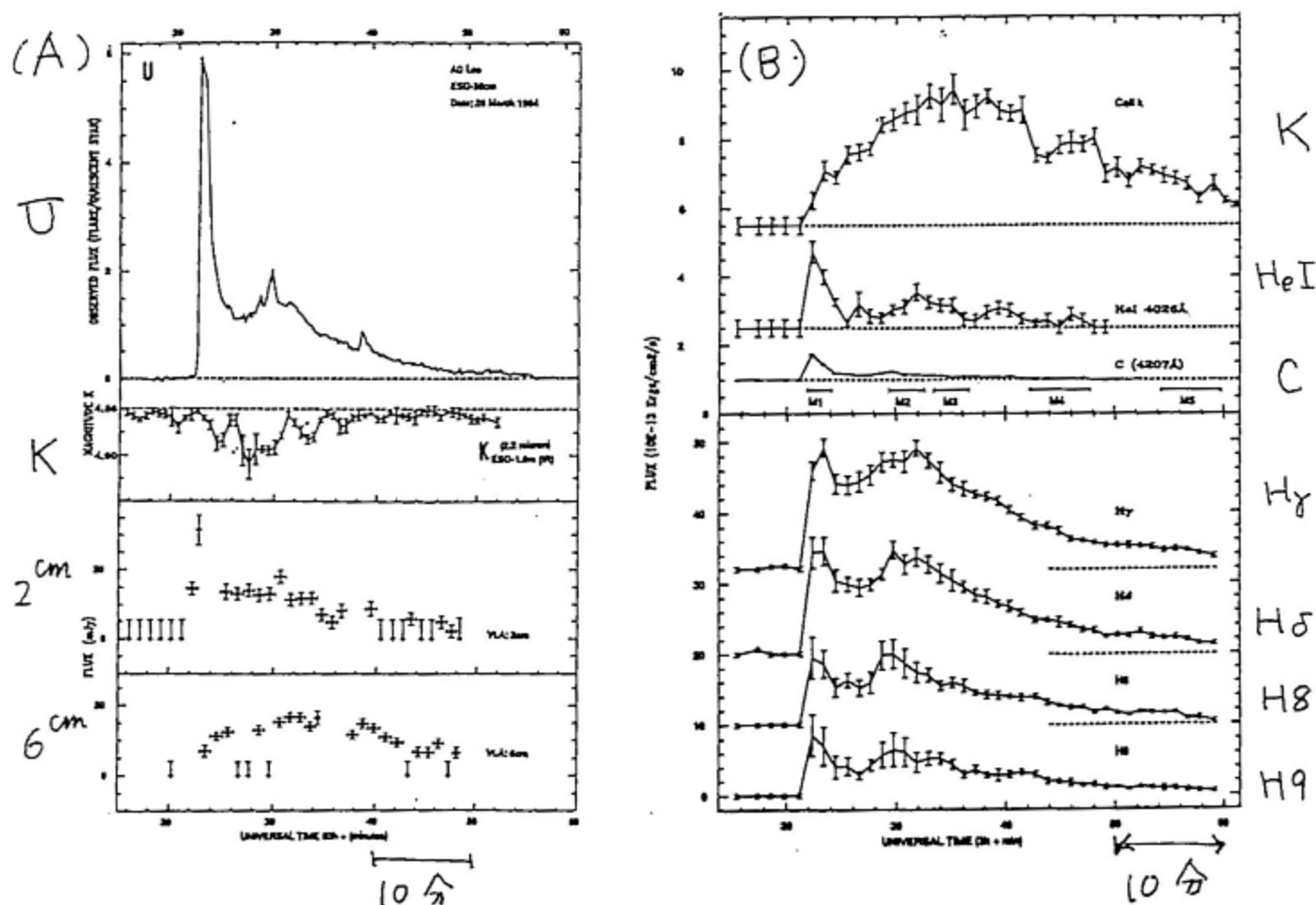


図7 AD Leo (dM3.5e) 星のフレア爆発時の
多波長光度と輝線強度の時間変化 (横軸は時間: 分単位)
(A) 光度変化: 上から順に U、Kバンド、電波 (2, 6cm)
(B) 輝線強度変化: 上から順に
CaII K, HeI 4026, 連続光 (4207 Å), H γ - H δ
(Rodono 1990, IAU Symp. 137, 371)

(2) T Tau型星と微光輝線星 TTS and Faint ELS's

星が誕生してから主系列に入るまでの前主系列星には早期型の HES (Herbig Be/Ae stars) と晚期型の TTS (T Tau-type stars) がある。共に輝線星の仲間では不規則な変光を伴う。HES は上述した Be 星と似たようなスペクトルを輝線輪郭の示す、やはり自転速度が速い。それに対し TTS は最初 100 日程度の不規則変光星として発見され、その後、スペクトルの特徴や、暗黒星雲、分子雲との共存などから主系列に入る前の幼年期の星であることが分かってきた。他の晚期型輝線星と同じように活発な彩層活動を示すが、星の周りに降着円盤や時にはジェットガス流を伴ったりしており、分光観測の面からも興味ある対象となっている。TTS はおうし座、オリオン座のような星生成領域に多数群れて、T-アソシエーションを作っている。

低分散で撮影されたスペクトルの例を図8に示そう。H α 輝線の強度は等価幅が 100 Å を越えるものから輝線消失まで広い範囲に涉っているので、強度の散らばりを図9に示そう。黒丸は Cohen-Kuhi による TTS、白丸はオリオン座の微光輝線星について MT. Stromolo 天文台での低分散分光に基づいてわれわれの測定した値 (Kogure et al. 1992) を示す。これらの輝線星は分光型、輝線の現れ方などから TTS の仲間とみなされた。しかも、これらの輝線強度はやはり数ヶ月のスケールで大きな変動を示すようで、われわれ

れの観測でも有意の輝線強度変化を示した星がオリオン座のベルト領域で15ヶ月間に3回の観測で62星、M42付近では22ヶ月に2回の観測で46星に達した。(Wiramihardja et al.1989,1991)。観測の頻度を増せばその数も増えるものと期待される。TTSについては輝線の起源は恐らく降着円盤へのガスの降り積もりであろうが、TTSにはガスジェットが存在を示しものもあり、星周囲の構造を解明するためにも変光と輝線強度などについて頻度の高いパトロール観測が望まれる。なお、TTSは輝線の強い古典的TTS(CTTS)と輝線の弱いTTS(WTTS)、周辺の分子ガスを失った裸のTTS(NTTS)を区別し、CTTSからWTTS, NTTSへと進化の道を辿るという説もあるが、図9に示したような輝線強度の分布やその変動を見ると、進化の道はもっと複雑かも知れない。

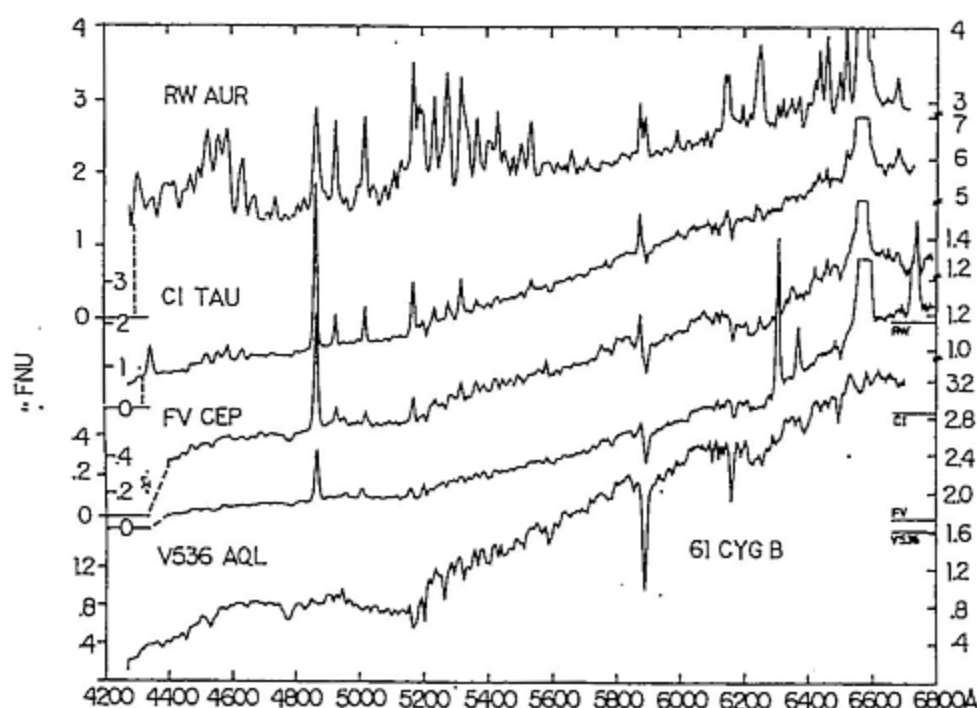


図8 TTSのスペクトル例 (Cohen & Kuhl, 1979)
一番下の非輝線星から上へ輝線の発達状況の順に例を示す。

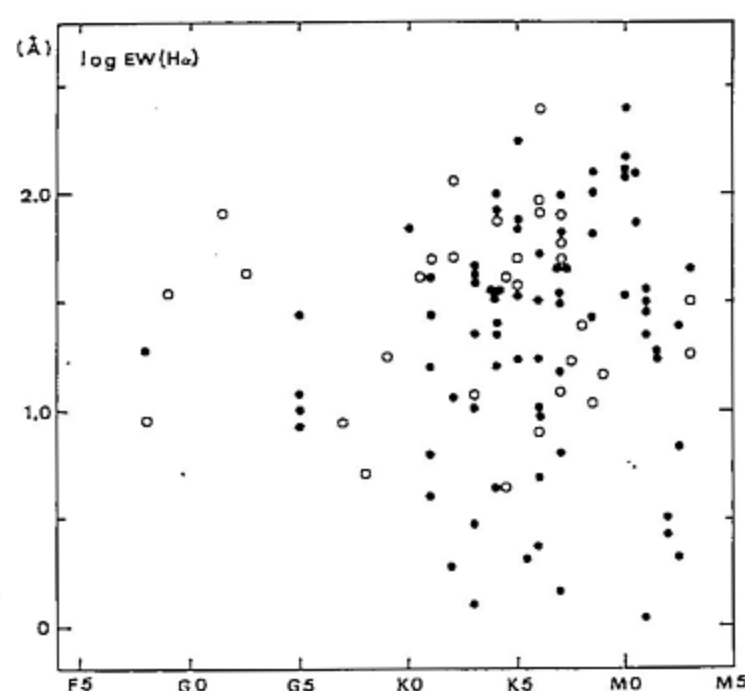


図9 TTSのH α 輝線強度と分光型
● は Cohen-Kuhl (1979), ○ はオリオン座の微光輝線星 (Kogure et al.1992)

7. その他 Other emission-line stars among binaries

はじめに述べたように輝線星はHR図上で広い範囲にわたって存在するが、連星系の中にも(1)アルゴール型連星、(2)RS CVn型 および BY Dra型星、(3)激変星 Cataclysmic variables、(4)共生星 Symbiotic stars、など種々の輝線星が見られるがここでは立ち入らない。

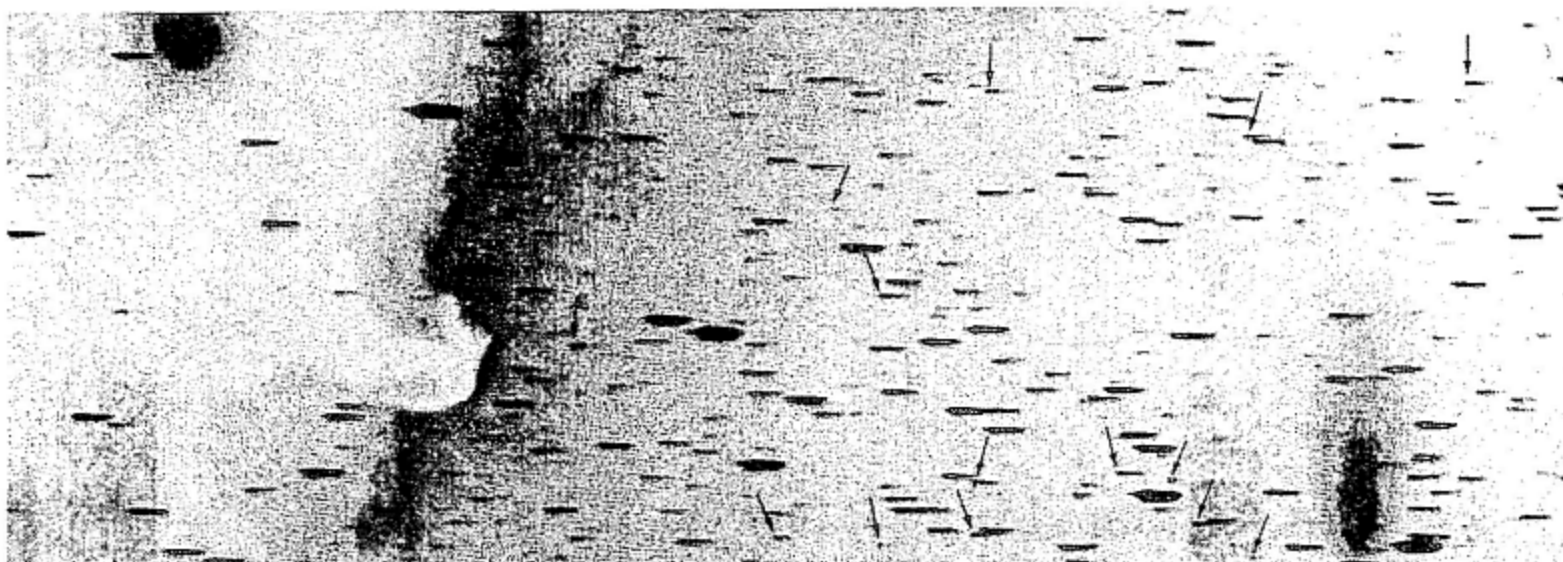
8. まとめ Summary

ここにあげた輝線星の観測例はほんの一部に過ぎない。中小望遠鏡でとなると星の明るさに制約されるが、探せば望遠鏡に適した星を見つけるのは難しくはない。WR星では7等から10等の間に10星位、Be星は6等以内に数10個、フレア星やTTS星は暗い星が多いが11~12等星まで延ばせば数10個は見つかる。適当な星を見つけて是非、輝線星分光を楽しんでいただけたらと思う。また、測光と分光の共同観測はまだまだ進んでいないので観測の価値も大きい。新しい結果が得られたらIBVSなどの国際誌への投稿もお願いしたい。

ここでは輝線の形成機構にはほとんど触れなかったが、そちらに興味ある方は現代天文学講座第6巻「恒星の世界」(恒星社厚生閣)など適当な参考書を参照されたい。

文献

- Cohen, M. & Kuhi, L. V. 1979, ApJS. 41, 743
de Groot, M., 1990, in Properties of Hot Luminous Stars, ASP Conf. Ser. 7, 164
Doazan et al. 1993, AA 269, 415
Hirata, R. 1995, PASJ, 47, 195
Hirata, R. & Kogure, T., 1976, PASJ. 28, 509
Horaguchi, T. 他 (Ohshima, Ito, Kogure を含む) 1994 PASJ, 46, 9-26
Kogure, T., Ogura, K., Nakano, M., Yoshida, S. 1992, PASJ, 44, 91
Rodono, M. 1990, in Flare Stars in Star Clusters, Associations and the Solar Vicinity, IAU Symp. 137, 371
Stahl & Kaufer 1994, in Impact of Long Term Monitoring on Variable Stars.
Torres & Massey, 1987, ApJ Suppl. 65, 459
Wiramihardja, S. D., Kogure, T. et al. 1989, PASJ, 41, 155 (下図)
Wiramihardja, S. D., Kogure, T. et al. 1991, PASJ. 43, 27



木曽観測所シュミット望遠鏡の対物プリズムで撮影した
馬頭星雲付近の輝線星(矢印)(1988年1月撮影)