

プレオネ星周円盤の歳差運動

平田龍幸 (京大理)

1. 偏光モニター観測

散乱起源の偏光現象から、星周ガスのおおまかな幾何 (球対称からのずれ) およびその変動を調べることができる。このことを踏まえ、1988年以來、B型輝線星の長期モニター観測を実施し、17星に対してその時間変動を検出している。一般にB型輝線星の場合、星周円盤による電子散乱がその偏光の原因とされ、多くの場合、その長期時間変動は、星周円盤の盛衰で説明できる。図1は岩松作成の、 π Aqr(B1Ve) のVバンドでの長期時間変動をのqu面上にプロットしたものである。観測点は、星間偏光を原点として直線上を行き来し、円盤盛衰に対応している。直線の位置は固定され、天空面上での星周円盤の向きは変わらないことを意味している。

プレオネ (B8IVe) は周期34年で分光・測光量が大きく変わり、shell phase から Be phase に変わる代表的B型輝線星である。この星の1967-2002年のVバンドにおける偏光変動を、qu面上で示す (図2)。shell phase(1971-1988) では、 $u > 0$ であったが、Be phase(1988-現在) にはいて、 $u < 0$ の領域にはいり、 u の値は減少し続けている。大きい白丸がMCP、大きい黒丸がHBSによる観測に対応する。また、右下の小さい白丸 (3点) は前のBe phaseの終わりの頃 (1967-1968) のSerkowski(1970) の観測値で、2002年1-2月の観測値とほぼ同じ位置にあり、再帰性が確認される。 π Aqrに較べて、変動量は約1/2程度と大きくないが、直線上にのっているというより、ゆるやかな弧状を移動しているようにみえる。プレオネが位置する、プレアデス星団中のHI holeと呼ばれる領域は、一様な星間偏光を示し、その平均値は $p_{IS} = 0.273 \pm 0.014\%$, $\theta_{IS} = 114^\circ \pm 6^\circ$ である (Breger 1986, 図中の矢印)。矢印の方向はプレオネの偏光移動パスの端あるいは外側ではなく、パスの方向を向いている (cf. π Aqr)。この点も、円盤盛衰と異なるふるまいである。星間偏光を移動パスの外側にとって、最小二乗法で最適解を求めてみると、結果としての円盤偏光成分の波長依存性はB型輝線星のそれとは著しく異なるものとなり、その可能性は否定される。かくして、プレオネの偏光変動は星間偏光の方向を横断し、このことは、星周円盤は天空上で、その向きを変えていることを意味する。換言すれば、円盤回転軸は、天空上を移動している。

2. プレオネの長期分光変動

図3に、分光量 (shell line の等価幅、 $H\alpha$ 輝線の等価幅、ダブルピークの間隔 (peak separation)、ピーク比 (V/R ratio)) の長期変動を、星間偏光を補正した円盤による偏光量 (p_d , θ_d) とともに、示す。shell line の等価幅がプロットされている時期が shell phase で、その後は Be phase である。shell line が弱くなると、星周円盤は減衰していると解釈するのが常識的であるが、この星の場合、 $H\alpha$ 輝線強度は弱くならず、困惑させられる。図4には $H\alpha$ 輝線輪郭の変化を適当な時間サンプリングで示す。時間とともに、輝線強度は増加しているが、これに伴いピークは減少、最近では、いわゆる pole-on star の輝線輪郭に近い形を示している。1999-2000年の線輪郭はダブルピークのすぐ外側でくぼむ、(pole-on star で見られる) いわゆる wine-bottle 型の輝線線輪郭の特徴を有している。なお、本2002年での岡山N分光器、美星天文台の観測で、ようやく輝線強度は弱まり始めたことが確認された。以上述べた長期分光変動も、円盤回転軸の天空上での移動で容易に説明できることが以下に示される。

3. 解析

最近のB型輝線星の研究で得られた最大の知見は、星周円盤はケプラー回転していることである。これは、ケプラー円盤では一本腕振動が生じること (Kato 1983; Okazaki

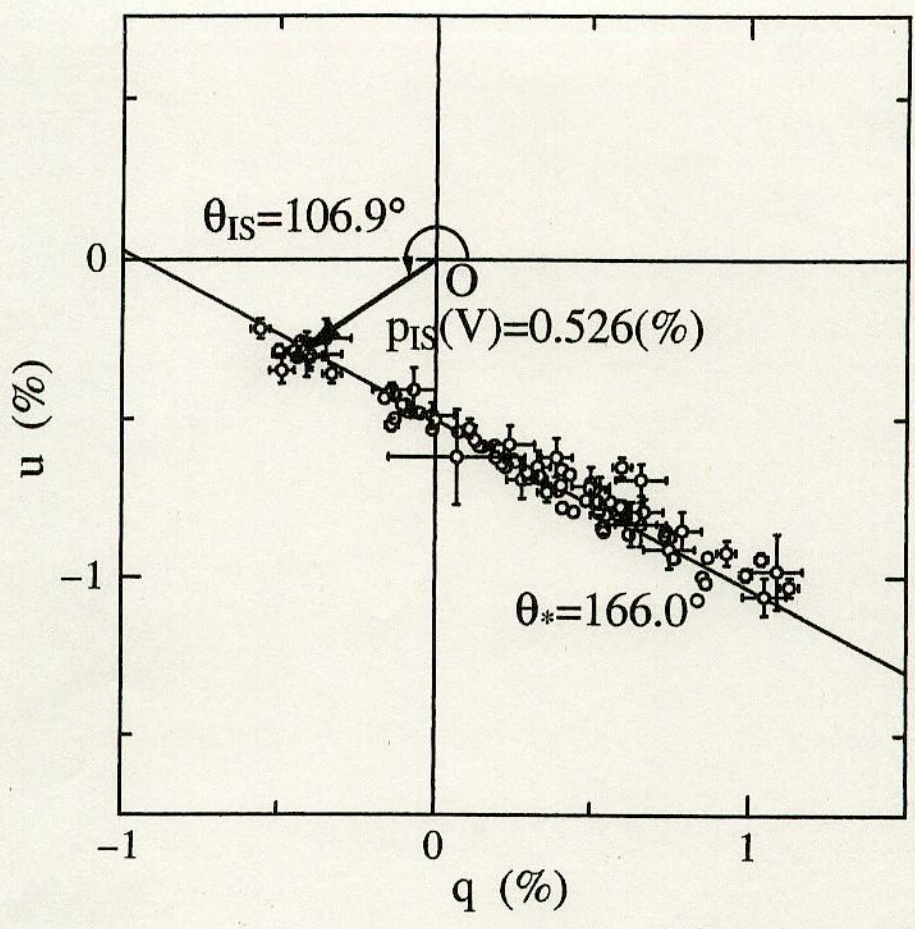


図 1. π Aqr の長期偏光変動

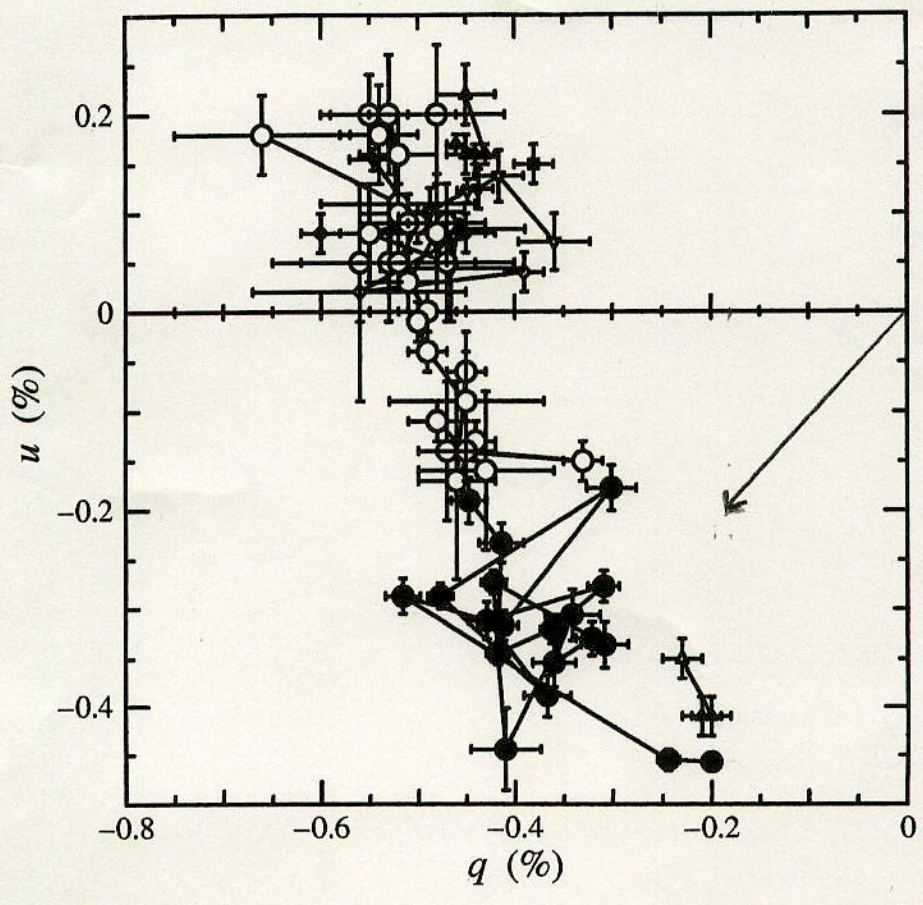


図 2. 28 Tau の長期偏光変動

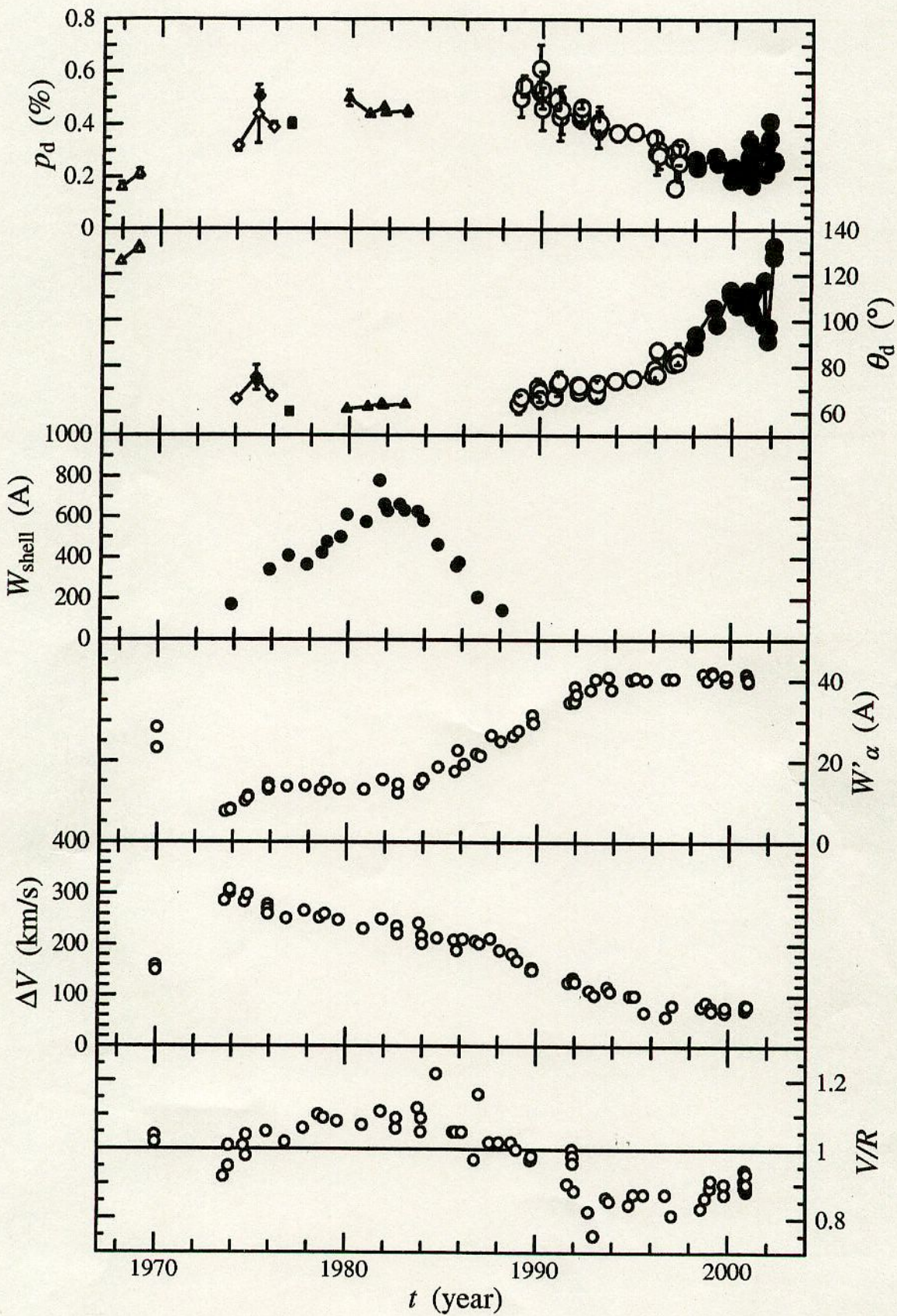


図3. 28 Tauの長期分光・偏光変動。上から、円盤の偏光成分 q, u 値 (%), 金属線 shell line の等価幅 W'_{shell} (mA), $H\alpha$ 輝線の等価幅 (A) とダブル・ピークの幅 ΔV ($km\ s^{-1}$), V/R 比。

1991), 一本腕振動により、以下の観測事実が説明できることによる。以前は楕円円盤で説明されていたことの、現代版となっている。

1. 可視干渉計による表面パターンの変動

筆者も参加したフランス CERGA 1.5m x 2 可視干渉計で、 γ Cas, ζ Tau の $H\alpha$ 輝線で、恒星中心からの円盤半径を南北両方向で求めたところ、(以下の2の) V/R 変化に対応して変化し、南北両方向の半径の変化は一本腕振動のイメージにぴったりあうこと (Vakilii et al. 1998; Berio et al. 1999)。

2. 輝線 V/R 変化

一本腕振動の応用は、まず長周期の V/R 変化に対してなされた (Okazaki 1991)。輝線全体が弱いピークの方に移動する特徴が説明できる。プレオネでも長周期 V/R 変化がきれいに見られる (図3最下部)。

3. ガス殻吸収線のバルマー・プログレッション

バルマー・プログレッションとは、shell star において、円盤による水素バルマー線吸収成分の視線速度が上の準位の主量子数が大きい程、大きく振れる現象で、 V/R 変化にともなって周期的にプラス・マイナスに大きく振れるのが一般である。プレオネにおいてはマイナスのプログレッションが shell phase 後期に発達し、見かけ上は一過性的のように観測される。Hirata, Okazaki (2000) のシミュレーションで周期的プログレッションも一本腕振動で説明できた。

かくして、円盤形成後は充分角運動量は輸送され、ケプラー円盤が実現すると考えてよい。以下では、観測量から、プレオネ星周円盤回転軸の天空上の移動を求める。このためには、観測量から二つの角度を導出する必要がある。

3.1 偏光量

星間偏光を補正した偏光角 θ_d は、円盤回転軸の天空面での方向を与える。さらに、偏光度 p_d は

$$p_d = f(\bar{\tau}) \sin^2 i_d \quad (1)$$

ここで、 i_d は円盤回転軸の天空面に対する傾斜角、 $f(\bar{\tau})$ は円盤の電子散乱に対する平均的な光学的厚さ $\bar{\tau}$ の関数で、光学的に薄い場合は $f(\bar{\tau}) = 2\bar{\tau}$ で与えられ、厚い場合は、多重散乱が効くが、いずれにしろ、 $\bar{\tau}$ の単調増加関数である。ここで、円盤で生成される連続光寄与は無視している。かくして、 $\bar{\tau}$ が評価できれば、偏光観測量のみから、二つの角度 (θ_d, i_d) を求めることができる。しかし、円盤は shell phase 初期から発達し、 $\bar{\tau}$ は i_d とともに時間変化すると考えられるのでモデリングが必要で、このままでは分離不能である。プレオネの場合、 V バンドでも、背景として、その明るさは大きく変化している (筆者は光球の変化と考えている)。円盤による吸収成分は V バンドでは大きくなく、従って、光学的厚さはそんなに厚くないと想定できるが、上記の事情から、偏光量のみから、二つの角度を導出するのは難しい。そこで、 i_d を求めるのに、分光量を用いることにする。

3.2 分光量 ($H\alpha$ 輝線)

分光量として $H\alpha$ 輝線輪郭を採用する。輝線ピーク間隔 ΔV は円盤半径 R_d 、傾斜角 i_d と

$$\Delta V = 2 \left(\frac{GM_*}{R_d} \right)^{1/2} \sin i_d \quad (2)$$

の関係がある。一方、円盤は $H\alpha$ に対して光学的に厚いので、edge-on ($i_d = 90^\circ$) に近い場合を除いて、輝線等価幅 W_α は表面輝度を積分することで与えられる。edge-on に近い場

合は円盤内部からドップラー効果により出射する断面成分が主となり複雑となる。いま、 $H\alpha$ 輝線の表面輝度は $S(R) = S_0(R_*/R)^{-n}$ とべき乗であらわせるとすると、

$$W'_\alpha = \frac{W_0}{2-n} \left(\frac{R_d}{R_*}\right)^{2-n} \cos i_d \quad (n \neq 2) \quad (3)$$

$$= W_0 \ln \left(\frac{R_d}{R_*}\right) \cos i_d \quad (n = 2) \quad (4)$$

と書ける。 W'_α は背景連続光の変動を補正した、 $H\alpha$ の輝線パワーに比例する量である。式(3)では $R_d/R_* \gg 1$ を仮定している。式(2)と式(3)または(4)から、半径 R_d を消去すれば、半径の時間変動に独立な、傾斜角 i_d と観測量との関係が得られる。1次元フィットで傾斜角が求まるわけだが、 n を指定する必要がある、さらに、表面輝度の比例定数 S_0 が円盤発達に伴い変化しないかが問題となる。

そこで、観測量のふるまいから、円盤が十分発達し、円盤半径が一定と期待される shell phase 後半から Be phase (1984-1995) に対して、解析を試みる。半径一定ならば、 ΔV は $\sin i_d$ に比例し、 W'_α は $\cos i_d$ に比例し、かつ、比例係数はその期間を通じて一定であるので、 $(\Delta V, W'_\alpha)$ 上で楕円の一部を占める筈であり、2次元フィットとなる。図5に結果を示す。点線がフィットした曲線で、点線に沿う数字は i_d (度) をあらわす。単純な仮定の割には、良くフィットできている。右下の点線からずれている観測点は shell max. までの時期で、 i_d が 90° に近く、上式で近似できないのである。 i_d は1984年で 70° 、その後、減少しつづけ、現在では 20° になっている。かくして、 $H\alpha$ 輝線からも、円盤回転軸が大きく移動していることが示された。また、式(2)から得られた円盤半径は、恒星質量を $M_* = 4M_\odot$ として、 $R_d = (58 \pm 6)R_\odot$ となる。

3.3 円盤回転軸の天球面での移動

観測から得られた偏光角と傾斜角の二つの角度から、円盤回転軸の天球面での位置を求めることができる。残念ながら、偏光量と $H\alpha$ 輝線がともに利用できるのは、堂平で偏光観測を始めた1988以降である。各々の角度に対して季節平均(年1点)をとり、天球面での円盤回転軸の位置をプロットしたのが図6である。外側の円上に回転軸が位置すれば、edge-on、原点にくれば pole-on である。観測点は時間的には左上から右下方向に 4.2° /年程度の早さで移動している。曲線は小円でフィットしたものである。カバーする角度範囲が狭いので少し強引だが、解析した時期外の値を追加した結果も併せて示してある。いずれにしろ、回転軸は原点近くを通過し、第4象限に向かうので、偏光角は非常に大きくなることが予想できる。

プレオネは周期218日の分光連星 (Katahira et al. 1996) であるとともにスペckル連星である (McAlister et al. 1989)。スペckル連星としての周期はまだ不明であるが、数十年のオーダーである。したがって、伴星による星周円盤の歳差運動が考えられる。伴星による星周円盤の歳差運動については Papaloizou, Terquem (1995), Larwood (1998) により定式化されている。これを用いて考えると、周期は分光連星伴星による歳差運動でオーダーとしてあう。

4 議論と結論

1. プレオネの偏光変動から、円盤回転軸の移動の直接証拠を得、分光データと組み合わせることで円盤回転軸の天球面での位置移動が求まった。
2. この移動は分光連星伴星による円盤の歳差運動と解釈される。
3. 円盤回転軸移動により、未解釈であった、以下の長期分光変動が説明できる。

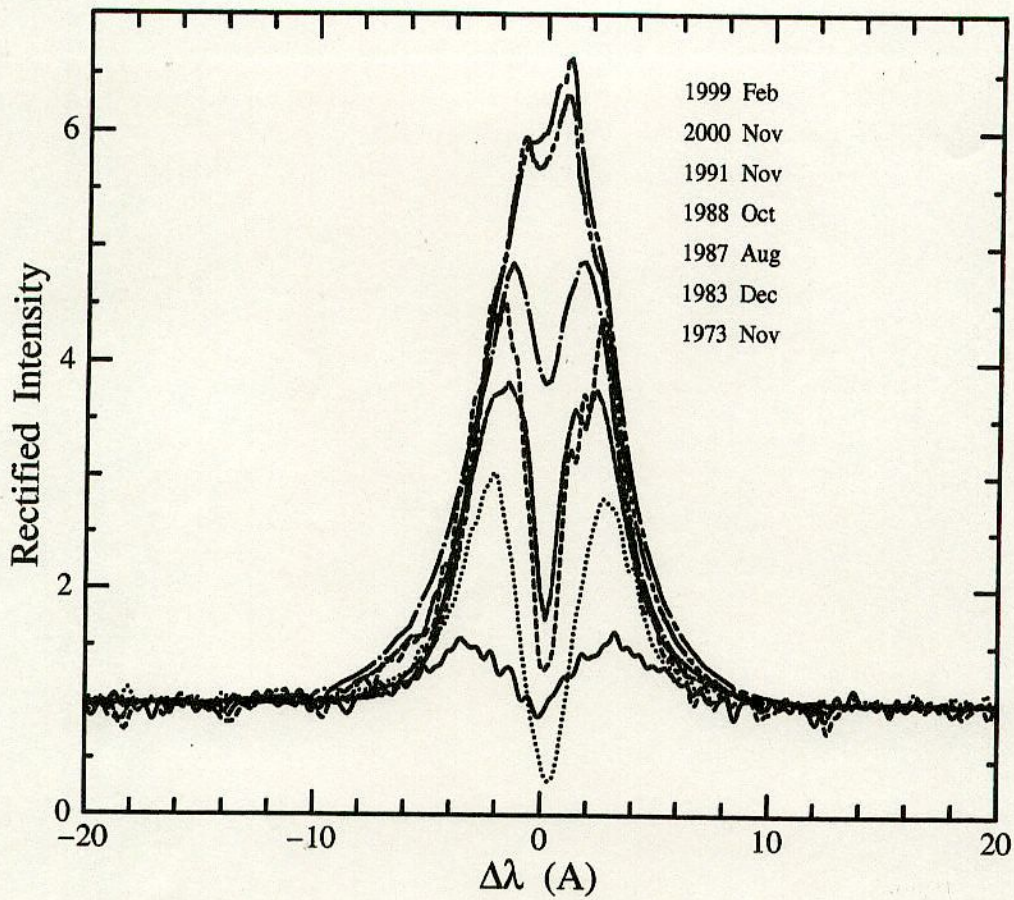


図4. 28 Tau の H α 輝線輪郭の長期変動

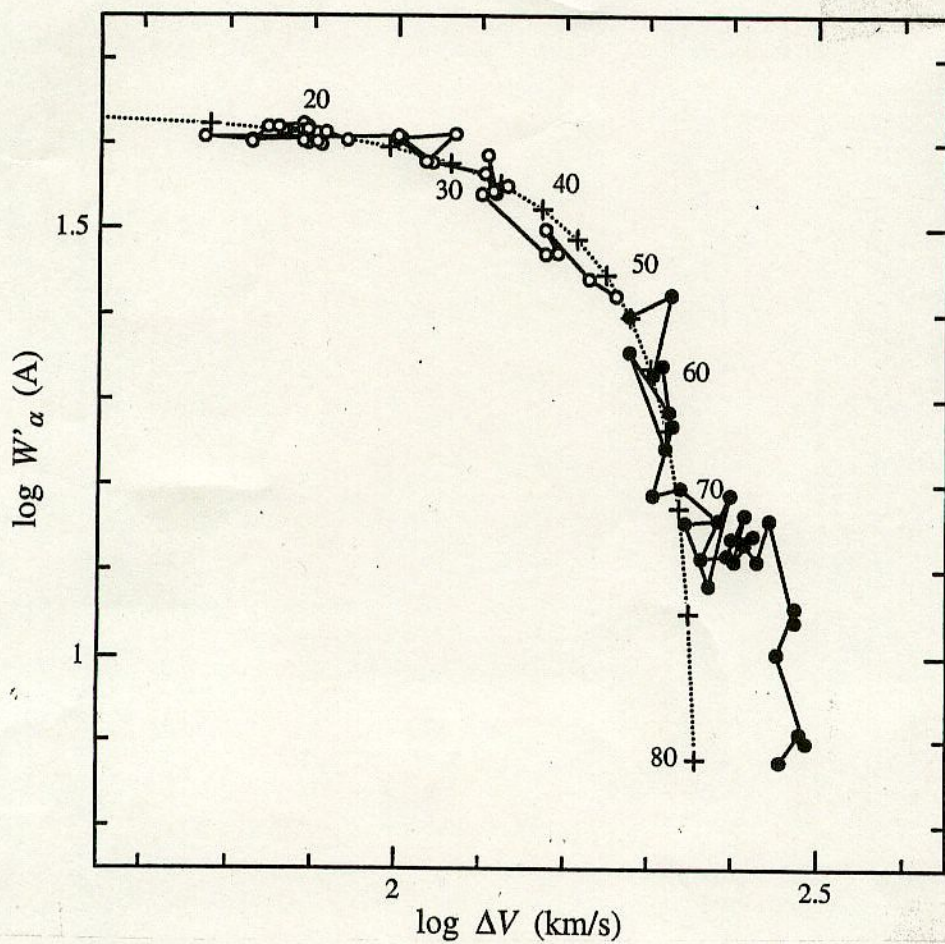


図5. 28 Tau の H α 輝線における、等価幅とダブル・ピークの幅との関係

(a) phase change

shell phase から Be phase への移行は視線方向から円盤面がはずれることで自然に解釈できる。これとともに $H\alpha$ 輝線が増加するのは円盤射影面積が増えることによる。

(b) transient Balmer progression

プレオネは図3最下段に示すように、長周期 V/R 変化を示している。常に円盤による吸収成分を有する shell star ではプラス・マイナスの Balmer progression を繰り返すもの (例く Tau, 48 Lib) があるが、プレオネの場合は一過性のマイナスの progression のみが観測される。これは、上記で述べたように円盤面が視線方向からはずれ、"shell star" でなくなるからである。細かくみると、 $H\alpha$ 輝線の V/R と progression は位相がずれているが、実は $H\alpha$ 輝線と $H\beta$ 輝線の V/R でもやはり位相がずれており、今後の検討が必要である。

(c) appearance of UV superionized lines in Be phase

Si IV, C IV などの紫外域共鳴吸収線は Be phase に移行した 1988 年から、検出された (Doazan et al. 1988)。これは円盤面が視線方向からはずれて、円盤上下方向に広がる、恒星表面からの恒星風が直接見えるようになったためである。IUE アルカイブ・データでその後の変化を追跡中しているが、徐々に強まり、上記イメージにあう。恒星風が円盤表面と相互作用しているかどうかは興味深い。

円盤回転軸の移動は、赤道円盤を色々の角度で立体スキャンしていることに対応し、詳細な情報が得られる。我々は、岡山で得られたプレオネの分光データの集大成を準備中である (Katahira et al. in prep.)。また、詳細な検討のためのモデル作り (Iwamatsu, Hirata, in prog.) を始めている。新しい偏光・分光データを加味した解析および偏光度変化と円盤半径の時間変化の組み込みむが残されているが、上記報告で、プレオネの長周期変動の解釈の基本が固められたと思っている。

References

- Breger M. 1986, ApJ 309, 311
 Doazan V., Thomas, R.N., Bourdonneau, B. 1988, A&A 205, L11
 Hirata R. 1995, PASJ 47, 195
 Hirata R., Okazaki A.T. 2000, in IAU Colloq. 175, The Be Phenomenon in Early-Type Stars, ed. M.A.Smith, H.F.Henrichs, J.Fabregat (ASP Conf.Ser. 214) 531
 Katahira J., Hirata R., Ito M., Katoh M., Ballereau D., Chauville J. 1996, PASJ 48, 317
 Kato, S. 1983, PASJ, 35,249
 Larwood J. 1998, MNRAS 299, L32
 McAlister H.A., Hartkopf W.I. Sowell J.R. 1989, AJ 97, 510
 Okazaki A.T. 1991, 43, 75
 Papaloizou J.C.B., Terquem C. 1995, MNRAS 274, 987
 Serkowski K. 1970, ApJ 160, 1083

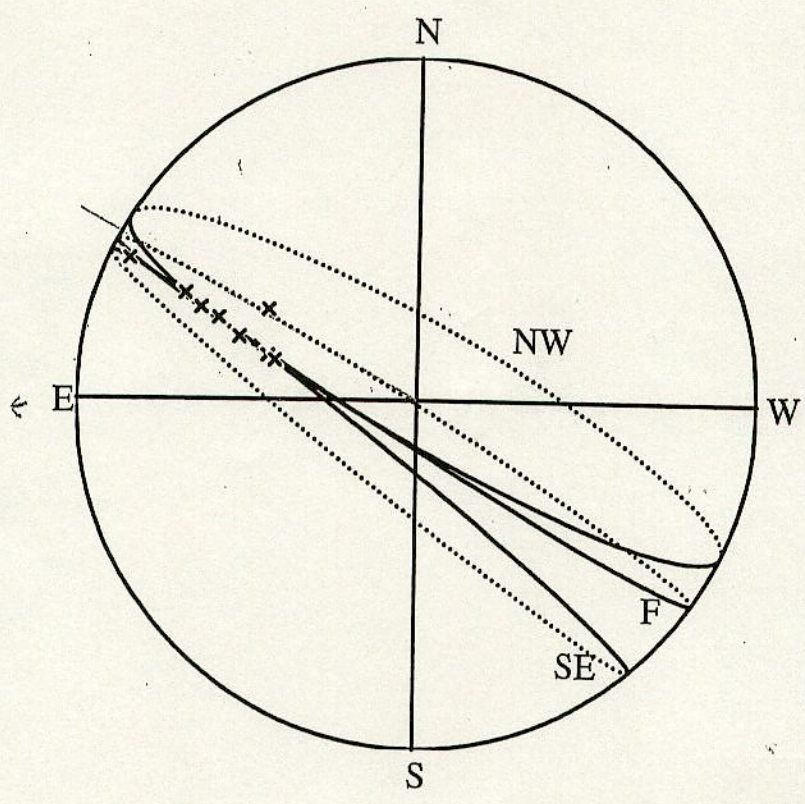


図 6. 28 Tau の星周円盤回転軸の天球面での移動