

学位論文

強輻射場における星間偏光特性

～塵粒子整列機構の観測的検証～

Interstellar Polarization in Strongly Illuminated Regions:

An Observational Study of Grain Alignment Process

亀浦 陽子

平成 19 年度入学

香川大学大学院教育学研究室修士課程 教科教育専攻理科教育専修

指導教員 松村 雅文

要旨

遠方の恒星の光は直線偏光成分を含む。観測される直線偏光度は、観測者から恒星までの視線上の星間塵粒子の量の指標である色超過と良い相関を示す。このため、この直線偏光は、非等方の光学特性をもつ塵粒子が何らかの機構によって整列し、これらの塵粒子を含む空間を星の光が通過することによって生じると考えられている。このような偏光は星間偏光と呼ばれている。

星間塵粒子がどのように整列するかの問題は、現在十分に説明ができない。従来からガス粒子との衝突によるランダムな回転運動に起因する常磁性緩和による整列(Davis & Greestein 1951)が考えられてきたが、必要とされる磁場の強度が、観測される磁場の強度より一桁大きいなどの問題点がある。一方で輻射トルクが、整列機構において大きな役割を果たしている可能性が指摘されている。輻射トルクによる塵粒子の回転は、塵粒子の形状が不規則なため **Helicity** を持ち、これは塵粒子の形状が変わらない限り、変わらないと考えられるため、より長い期間にわたる回転の加速が可能であり、効率よく整列が行われると考えられている。また輻射トルクの効率は Lazarian & Hoang (2007) によると、輻射場の特性により、効率よく整列する塵のサイズが変わることが期待される。現在、輻射トルクによる塵粒子の整列機構の理論研究は精力的に進められているが、観測的な研究はあまり行われていない。本研究では、輻射トルクの効果が効きやすいと思う星周囲の塵粒子整列を検討するため、これらの星についての偏光観測を行い、考察した。

本研究では、岡山の天体物理観測所の低分散偏光分光測光装置(HBS)を用いて観測を行い、強い輻射場での星間偏光の特性を調べた。今回の観測では、2008年1月、2008年10月、2009年1月の3回にわたって星雲を伴った星を含む計24星についての観測を行い、最大偏光波長 λ_{\max} を $0.01\sim 0.05\ \mu\text{m}$ 程度の誤差で求めることができた。赤い輻射場の塵粒子が輻射トルクによって整列しているならば、 λ_{\max} は大きくなる可能性があるが、この可能性は確認できなかった。プレアデス星団の近くの2星を除いては、星雲を伴った星の λ_{\max} と伴わない星の λ_{\max} について $0.03\ \mu\text{m}$ 以上の有意な差はみとめられなかった。また、輻射強度が卓越している場所で塵粒子が整列しているならば、通常観測される偏光効率は上限値より大きくなる可能性があるため、色超過 E_{B-V} を導くことが可能な場合、偏光効率を検討した。しかし、偏光効率についても星周辺で大きくなる傾向は見られなかった。これらの事は赤色巨星周囲では、輻射によっては整列が生じていない可能性を示す。しかし、プレアデスの星である HD24118 と HD23985 においては周囲の星と比べて偏光度が小さく偏光効率も小さいという特徴が見出された。これら星の周囲では、比較的大きい塵粒子の整列の程度が低くなっているか、または塵のサイズが平均的に小さいなどの可能性を示すと解釈される。

目次

要旨

第1章 序章

1.1 星間物質と光	
1.1.1 星間物質	1
1.1.2 星間物質と星間減光	1
1.1.3 星間赤化	1
1.2 偏光	
1.2.1 偏光の定義	2
1.2.2 星間偏光	4
1.2.3 星間偏光と星間減光	4
1.2.4 Serkowski 曲線	5
1.3 塵粒子整列の解釈	
1.3.1 常磁性緩和	5
1.3.2 塵表面での水素分子の合成による高速回転化	6
1.3.3 輻射トルクを考慮した整列機構	6
1.4 整列機構からの予測	7
1.5 観測対象	7

第2章 観測

2.1 偏光観測	10
2.1.1 HBS 装置について	10
2.1.2 観測データの整約	11
2.2 HBS による観測状況	12

第3章 観測結果

観測結果の一覧 (表 4)	22
個々の観測対象星に対する分析 (図 15~図 59)	25

第4章 考察

4.1 全観測データの考察	71
4.1.1 最大偏光波長 λ_{\max}	71
4.1.2 赤色巨星の偏光と色超過	72
4.1.3 プレアデス星団およびその周辺の星の偏光と色超過	74
4.2 個々の観測対象星についての考察	77
4.2.1 偏光度の波長依存性	77
4.2.2 偏光度と色超過	78

第5章 結論

80

参考文献

81

謝辞

81

第1章 序章

1.1 星間物質と光

1.1.1 星間物質

宇宙は真空と言われている。しかし、星と星の間の空間は全く何も存在しない真空ではなく、希薄ではあるが、水素やヘリウムを主体とするさまざまな気体(星間ガス)や固体微粒子(星間塵)が存在している。これらを星間物質と呼ぶ。星間塵は主に C, N, O, Mg, Si, Fe などの重元素の塵の粒であり、恒星から来る光の減光と偏光の原因となる。

1.1.2 星間物質と星間減光

星間塵は星の光を散乱、吸収して星間減光の原因となる。遠方の星に対する波長 λ での星間減光は次のように表わされる。いま、

$I^0(\lambda)$: 減光を受けなかったときの観測点での星の放射強度

$I(\lambda)$: 減光されて観測される星の強度

とする。これらの放射強度に対応する等級をそれぞれ $m_0(\lambda)$ 、 $m(\lambda)$ とすると、その差が減光量 $A(\lambda)$ として次のように定義される。

$$A(\lambda) = m(\lambda) - m_0(\lambda) = -2.5[\log I(\lambda) - \log I^0(\lambda)]. \quad (1.1.1)$$

または減光を生ずる星間媒質の光学的厚さを $\tau(\lambda)$ として、

$$I(\lambda) = I^0(\lambda)e^{-\tau(\lambda)} \quad (1.1.2)$$

と表すと、

$$A(\lambda) = 1.0857\tau(\lambda) \quad (1.1.3)$$

と書ける。これは任意の波長で成り立つ関係であるが、標準的な星間減光量には V バンド(中心波長 5500 \AA , バンド幅 850 \AA)における値 A_V が減光量を表すために通常使われる。

1.1.3 星間赤化

星間減光は波長に依存し、減光量は一般に短波長ほどいちじるしい。そのため遠方の天体ほど連続スペクトルは赤方に移動する。これを星間赤化(interstellar reddening)と呼ぶ。いま、2つの波長 λ, λ' ($\lambda < \lambda'$)にたいする星の色指数(color index)を $m(\lambda) - m(\lambda')$ で定義される。星間減光を受けない場合の色指数を $m_0(\lambda) - m_0(\lambda')$ で表すと、星間赤化は色指数の増加分 $E(\lambda - \lambda')$ として次のように定義される。

$$E(\lambda - \lambda') = [m(\lambda) - m(\lambda')] - [m_0(\lambda) - m_0(\lambda')] = A(\lambda) - A(\lambda'). \quad (1.1.4)$$

この増加分を星の色超過(color excess)と呼んでいる。

標準的な色指数 B ($\lambda 4400 \text{ \AA}$, $\Delta\lambda = 730 \text{ \AA}$)、 V ($\lambda 5500 \text{ \AA}$, $\Delta\lambda = 850 \text{ \AA}$)にたいするもので、星間赤化($B - V$)の色指数で見ると色超過は

$$E(B - V) = (B - V) - (B - V)_0 \quad (1.1.5)$$

と表される。ここで $(B - V)_0$ は星の分光型で決まる星固有の色指数である。色超過はまた、各 B、V バンドでの星間減光量 A_B 、 A_V を用いて

$$E(B - V) = (B - B_0) - (V - V_0) = A_B - A_V \quad (1.1.6)$$

と表してもよい。星間赤化は通常青い星ほど大きいので、一般に $A_B > A_V$ 、したがって $E(B - V) > 0$ である。

任意の波長での星間赤化は通常規格化された赤化曲線(normalized reddening curve)として

$$F(\lambda) = \frac{E(\lambda - V)}{E(B - V)} \quad (1.1.7)$$

で表す。赤外から紫外域にわたる広い波長範囲で多くの星から得られたものを平均すると、平均的な赤化曲線は $\lambda \rightarrow \infty$ ともに $F(\lambda) \rightarrow -3$ へと漸近的に近づいている。これは $A(\lambda)$ が $\lambda \rightarrow \infty$ にたいして0に近づくことに対応する。したがって(1.1.4)、(1.1.7)式において $\lambda \rightarrow \infty$ 、 $\lambda' = V$ とすると、 $E(\lambda - V) \rightarrow -A_V$ であるから、

$$\frac{A_V}{E(B - V)} \sim 3 \quad (1.1.8)$$

が得られる。この漸近値の比を

$$R = \frac{A_V}{E(B - V)} \quad (1.1.9)$$

と書くことにすると、(1.1.8)式は $R=3$ を与える。通常この値が星間赤化にたいする標準的な値として採用されている。しかしこれはあくまで平均的な値であって、銀河系の方向によっては3からいちじるしく外れるところもある。ある星についての色超過 $E(B - V) = (B - V) - (B - V)_0$ が観測されると、その星の星間減光量 A_V は(1.1.9)式から R を仮定して導くことができる。通常は $R=3$ が仮定されている。

1.2 偏光

1.2.1 偏光の定義

光は電磁波の一種であり、横波の性質を持つ。光源から出た光波は、方向がランダムなためどの方向でも光の強さは同じである。しかし、光波の電気ベクトルが何らかの原因で無秩序な振動面の方向からある特定の方向へ偏りが生じる。これを偏光(polarization)という。

遠方の星の光を偏光板に通して観測すると、その強度が偏光版の回転とともに変化し、その偏光の状態を知ることができる。

電磁波は進行方向に垂直な面内で振動するので、その面内に直交する単位ベクトル e_1, e_2 をとり、電磁波の電気ベクトルを

$$\mathbf{E} = e_1 E_1 + e_2 E_2 \quad (1.2.1)$$

と表す。ここで、 E_1, E_2 はベクトル成分である。振動数 ν の単純な電磁波を考えると、これらの成分は

$$E_1 = E_{10} \sin(2\pi\nu t - \varepsilon_1) \quad (1.2.2)$$

$$E_2 = E_{20} \sin(2\pi\nu t - \varepsilon_2) \quad (1.2.3)$$

と書ける。ここに、4つの定数が現れる。 E_1, E_2 は各成分方向の振幅、 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ はそれぞれの位相である。上式の時間に依存している部分 ($2\pi\nu t$) を消去すると電気ベクトル \mathbf{E} は楕円を描き、この楕円は長軸、短軸半径の長ささと長軸の位置角で表される。この楕円の短軸と長軸の比を角度 β を用いて、 $\tan\beta$ と表すと、 $\beta=0^\circ$ では完全な直線偏光を表し、電気振動は方向 θ に固定される。 $\beta=45^\circ$ では円偏光を表す。

これらの4つのパラメータ ($E_1, E_2, \varepsilon_1, \varepsilon_2$) の代わりに、4つのパラメータ I, Q, U, V を使って表したものが Stokes パラメータである。それぞれのパラメータは以下のように表す。

$$I = E_{10}^2 + E_{20}^2 = Q^2 + U^2 + V^2, \quad (1.2.4)$$

$$Q = E_{10}^2 - E_{20}^2 = I \cos 2\beta \cos 2\theta, \quad (1.2.5)$$

$$U = -2E_{10}E_{20} \cos(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) = I \cos 2\beta \sin 2\theta, \quad (1.2.6)$$

$$V = 2E_{10}E_{20} \sin(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) = I \sin 2\beta, \quad (1.2.7)$$

ここでの θ とは偏光位置角のことで、楕円の長軸が北からどれだけ角度が傾いているかを表している (図1)。パラメータ I は光の強度を表し、偏光波については4つのパラメータが互いに独立でないことを示す。

自然光の個々の偏光波の集合を見ると、位相差 $\varepsilon_1 - \varepsilon_2$ と振幅比 E_{20}/E_{10} に自然はごとの相関がないことから、全体としての自然光では $I \neq 0, Q = U = V = 0$ となる。相互に相関があると一般に部分的に偏光した光となるが、その場合は Stokes パラメータの2つの部分から構成されていることになる。すなわち、一つは偏光されていない自然光の部分で、そのパラメータは $I_1 \neq 0, Q_1 = U_1 = V_1 = 0$ 、もう一つは完全偏光した部分で、0でない Stokes パラメータ I_2, Q_2, U_2, V_2 をもつ。

偏光の大きさを偏光度(p)とし、Stokes パラメータを用いて、

$$p = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2 + V^2}}{I} = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (1.2.8)$$

と表すこともできる。偏光位置角(θ)は

$$\theta = \frac{1}{2} \text{atan} \left(\frac{V}{Q} \right) \quad (1.2.9)$$

となる。このため、観測から Stokes パラメータを求めることにより、偏光度(p)、偏光位置角(θ)を求めることができる。

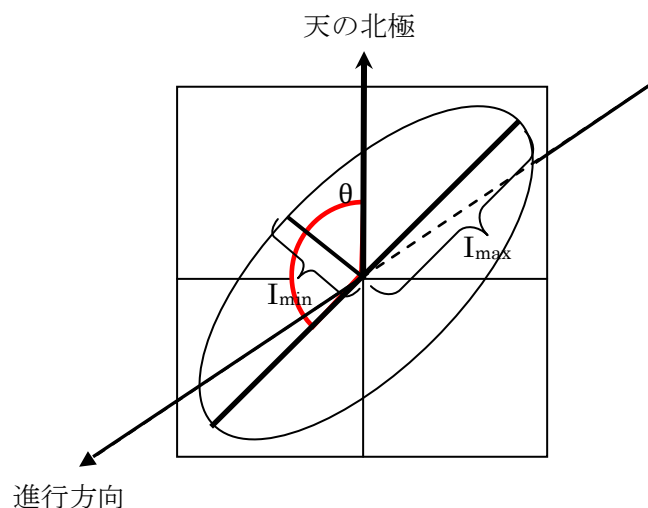


図 1：光の模式図

1.2.2 星間偏光

星間の偏光の発見は、Hall (1949)と Hiltner (1949)それぞれによってなされた。星間偏光の特徴として、遠方の恒星ほど偏光が大きくなることや、可視域での偏光度が大きくなる偏光度の波長依存性などが挙げられる。前者は、遠方の恒星の光が星間空間に存在する塵の中をより長く通ってくるため、偏光が大きくなると考えられる。そして後者は、塵の大きさによって偏光効率が決まることから、塵の形状と組成が同一ならば、塵の大きさと波長が同程度の時、最も偏光度が大きくなると考えられる。なお通常は星間偏光の直線偏光は比較的大きい(0~数%程度)が、円偏光は直線偏光より2桁程度小さい。そこで以下では直線偏光のみを考察する。

1.2.3 星間偏光と星間減光

星間偏光は星の光の偏光度 p と偏光位置角 θ によって記述できる。一般にはある天域に分布する星の偏光からその領域にわたる星間偏光の特性を推定する。星に観測される偏光度は通常 2%程度以下で、測定精度は星の明るさによる。星間偏光は非球対象のダスト粒子によって生じる。星間偏光で観測される偏光度 p と A_V 、 E_{B-V} には次のような相関があることが知られている：

$$p(\%) \leq 3A_V \quad (1.2.10)$$

$$p(\%) \leq 9E_{B-V} \quad (1.2.11)$$

1.2.4 Serkowski 曲線

星間偏光の波長による変化は、Serkowski et al.(1975)が数 100 個の星について可視域から近赤外域にかけて観測結果をまとめている。それによると波長 λ での偏光度 $P(\lambda)$ は星ごとに多少の変動はあるが、平均的には波長 5000Å から 7000Å あたりに極大偏光度 P_{\max} が現れ、 $P(\lambda)/P_{\max}$ はどの星についても似たような振る舞いを示す。Serkowski は、観測した結果から Serkowski 曲線と呼ばれる次の経験式を表した：

$$\frac{P(\lambda)}{P_{\max}} = \exp[-K\{\ln(\lambda_{\max}/\lambda)\}^2]. \quad (1.2.10)$$

ここで、 $K=1.15$ を Serkowski らは採用したが、可視域から赤外線域まで含めた経験式として Wilking et al.(1989)は

$$K = -0.10 + 1.84\lambda_{\max} \quad (1.2.11)$$

を与えた。ここで λ_{\max} は μm 単位で表す。

近赤外線における星間偏光について Jones(1989)は、Kバンド (2.2 μm) における星間偏光度 $P_K(\%)$ が K バンドの星間吸収に対する光学的深さ τ_K とよい相関を示すことを見出し、近似式として

$$P_K(\%) = 2.3\tau_K^{3/2} \quad (1.2.12)$$

を導いた。ここで τ_K については星間減光 A_V 、色超過 $E(B-V)$ との間に

$$\tau_K = 0.09A_V = 0.27E(B-V) \quad (1.2.13)$$

という関係が知られているので、赤外域の星間偏光度 P_K は星間減光 A_V と関数の関係で結ばれる。

1.3 塵粒子整列の通常解釈

1.3.1 常磁性緩和

星間塵は一般に非球状 (～楕円体) の誘電体物質で、鉄のような強磁性体成分を含むことによって、弱いながらも常磁性(paramagnetism)を保っている。常磁性とは磁場内に物質を置いたときに磁場と同じ向きに磁化する性質のことである。このような塵粒子は星間ガス粒子との衝突によって角運動量を獲得し、回転を始める。回転する粒

子が平行に走る銀河磁場の中に置かれている粒子から見たこの磁場は急速に振動する変動磁場となり、このため粒子は銀河磁場にたいし、粒子の長軸が銀河磁場と直交するようなトルクを受ける。他方、塵粒子の星間ガス粒子との衝突は塵粒子の回転軸の向きをランダムにさせるように働く。この2つの作用の釣り合いによって塵粒子の平均の整列状態が定まる。Davis & Greenstein (1951)はこのような立場に立って楕円体塵粒子の整列の度合を推定した。

しかし、このオリジナルな機構では微散雲において、通常観測される 10^{-6}gauss よりも 1桁強い磁場でないと説明ができず、またガスの温度と塵の温度差が小さい暗黒星雲でも整列の説明ができない。

1.3.2 塵表面での水素分子の高速回転化

Davis & Greenstein (1951)の常磁性緩和に改良を加えたものが、Purcell (1979)の塵表面での水素分子の合成による高速回転を考慮した整列機構である。塵の回転トルクを塵の表面に付着した水素原子同士が結合しようとするときに出す結合エネルギーを得て、角運動量を増加させていると考えられる。だが、高速になるためには、ある程度以上の加速状態の継続が必要であるが、塵表面の状況が変わると加速機構が維持されない。このため、加速継続時間が課題とされている。

1.3.3 輻射トルクを考慮した整列機構

以前から Dolginov & Mytrophanov (1976) によって、輻射により塵の回転のトルクを星からの光からエネルギーを吸収して角運動量に変え、不規則形状の塵粒子の回転が加速されること(輻射トルク)が知られていたが、最近、Draine & Weingartner (1997) によって、この輻射トルクが、整列機構において大きな役割を果たしている可能性が指摘された。

輻射トルクによる塵粒子の回転は、塵粒子の形状が不規則なため Helicity をもち、塵粒子による右回りと左回りの円偏光の散乱・吸収が異なる場合に生じる(図 2)。Helicity は塵粒子の形状が大きく変わらない限り変化しないため、Purcell (1979) の機構と比べると、長い期間にわたる回転の加速が可能である。また輻射トルクの効率は、Lazariann & Hoang (2007) によると波長 λ と塵の典型的なサイズ a との比 (λ/a) の関数になっているため、輻射場の特性により、効率よく整列する塵のサイズが変わることが期待される。

実際に Andersson & Potter (2007) は暗黒星雲周辺の星の偏光観測から、比較的減光が大きく、赤い輻射場の環境にある場合は、星間偏光度が最大になる波長 λ_{max} が大きくなることを示し、輻射トルクによって塵が整列している可能性を示唆した。しかし、この方法は、彼ら自身も指摘しているように、塵粒子のマクロな分布が不規則なため、観測される減光量 A_V が大きいことが必ずしも“赤い輻射場”を意味するとは限らない問題を含んでいる。

また、Whittet et al. (2008)は、暗黒星雲に YSO(Young stellar object)が含まれている場合、これらの YSO の偏光度が大きいことを示し、YSO からの輻射が整列に寄与していることを指摘した。しかし、一般的には YSO の光には偏光度が大きい散乱光が含まれている可能性がある。このため、輻射トルクが塵粒子の整列に関与していることを示すには、更に別の検証が必要である。

現在の輻射トルクによる塵粒子の整列機構の理論研究は、精力的に進められているも

の、観測的な研究はあまり行われていない。

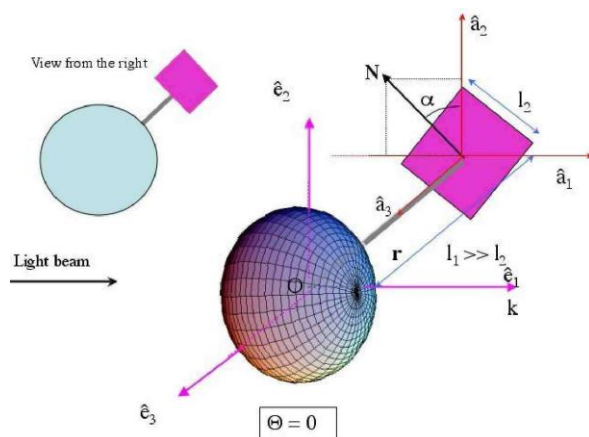


図 2 : Helicity がある塵粒子モデルの例

1.4 整列機構からの予測

本研究では HBS 観測装置を用いて星雲を伴った星の直線偏光観測を行い、次の 2 点について調べた。HBS 観測装置については次章でくわしく述べる。

1) 偏光度の波長依存性

M 型星の SED と星間輻射場の SED を比べると、 $\lambda = 0.5 \sim 2 \mu\text{m}$ あたりでは、星の SED は輻射場より赤い。つまり、このような空間の塵粒子が、輻射トルクによって整列しているのならば、通常の星間空間よりも、より大きな塵が整列しており、偏光度が最大になる波長 λ_{max} は大きくなっている可能性がある。また、高温の星の周囲では、 λ_{max} は小さくなっているはずである。よって、偏光度 p の波長 λ の依存性を経験的に表す Serkowski の式を用いて λ_{max} を求め、輻射トルクの効果を検討する。

2) 偏光度と色超過の関係

光度階級 III の巨星から $0.1 \sim 1 \text{pc}$ 以内の領域の輻射強度は、星間輻射場よりも卓越する。このため輻射トルクにより塵粒子が整列しているのならば、通常観測される偏光効率（偏光度と色超過の比）は、上限値よりも大きくなる可能性がある。よって、測光データと星固有の色指数のデータから色超過 E_{B-V} を導くことが可能な場合、偏光効率を検討する。

一方、常磁性緩和が有効に働いているのならば、塵とガスの温度差が重要である。星周囲では、輻射が強かつ、ガスと塵の密度が高いと、ガスと塵は熱平衡になり、温度差が小さいことが期待される。このため、星周囲では整列が期待されず、偏光効率は小さいと予測される。

1.5 観測対象

今回の観測の目的は輻射トルクによる整列機構が塵粒子に働いているかどうかを検証することである。今回の観測において、観測対象は以下のような基準で選択した。

低温の星の周囲では、赤い光が卓越するため、 λ_{\max} が大きいと考えられる。よって、視線上にたまたま星雲をもつ（と考えられる）低温（Late-type）の星は、観測対象となりうる。このような星は Magakian (2003) のリストから観測候補星を選んだ。

また、プレアデスの星のように青い星は高温であるため、 λ_{\max} は小さくなると推定される。Gibson & Nordsieck (2003) によると、プレアデス星団の星々は星の手前に星雲があると考えられている。よって、Be 型星（輝線をもつ星）をなるべく除き、過去のデータから偏光度が比較的高い星々を選択した。以下にその観測候補星の位置（赤経、赤緯）、等級、距離、スペクトル型を列挙する。距離に関しては SIMBAD に掲載されている年周視差から求めている。

表 1：観測した天体リスト (red)

Target Name	RA	Dec	V	Parallaxes mas [d]	Pc [d]	Sp
HD34454 (Neb)	05 18 04.1	+13 25 03.8	7.83	5.51 [1.32]	181.5 [32.9]	M5 III
HD34547	05 18 52.9	+13 34 01.8	7.44	7.97 [1.19]	125.5 [15.7]	B9 V
HD206509 (Neb)	21 40 43.3	+54 52 19.7	6.168	4.64 [0.58]	215.5 [46.4]	K0 III
HD 206823	21 42 56.1	+54 33 42.8	6.974	4.80 [0.66]	208.3 [43.4]	K2
HD 206348	21 39 41.6	+55 22 05.9	7.64			K0
HD37387 (Neb)	05 39 14.8	+23 19 24.1	7.53	0.88 [1.02]	1136.4 [1291.3]	K1 Ib
HD 245547	05 37 33.2	+22 58 05.0	8.64			M0
HD 37769	05 41 59.5	+22 33 07.0	7.72			K0
HD 39498	05 53 06.6	+02 49 54.4	8.47			K5
HD3037 (Neb)	00 34 37.3	+69 26 04.6	8.37	1.68 [0.84]	595.2 [354.3]	K0 III
HD3122	00 35 18.5	+69 44 14.2	8.63	0.58 [0.77]	1724.1 [2972.7]	B9
HD21110 (Neb)	03 25 23.9	+31 43 51.9	7.31	4.80 [0.97]	208.3 [43.4]	K4 III-IV
HD20844	03 22 31.1	+32 14 23.5	7.42	0.22 [0.99]	4545.5 [20661.2]	M3 III
HD196819 (Neb)	20 38 17.2	+42 04 25.3	7.55			K2.5 IIb
BD+41_3833	20 38 10.9	+42 10 25.6	8.32			B8
HD34033 (Neb)	05 14 59.4	+13 00 50.8	8.64			G8 II
HD34316	05 17 05.4	+12 33 55.8	7.07	5.68 [0.99]	176.9 [31.0]	K0

表 2 : 観測した天体のリスト (blue)

Target Name	RA	Dec	V	Parallaxes mas [d]	Pc [d]	Sp. Type
HD23850 (27 Tau)	03 49 09.7	+24 03 12.3	3.62	8.57 [1.03]	116.6 [13.6]	B8III
HD23338 (19Tau)	03 45 12.5	+24 28 02.2	4.29	8.75 [1.08]	114.3 [12.1]	B6IV
HD23480 (23 Tau)	03 46 19.6	+23 56 54.1	4.16	9.08 [1.04]	110.1 [13.1]	B6IV _e
HD23753	03 48 20.8	+23 25 16.5	5.44	9.64 [0.91]	103.7 [10.8]	B8V
HD24118	03 51 25.3	+25 09 46.5	6.79	4.78 [0.83]	210.1 [44.1]	A2
HD24368	03 53 34.5	+25 40 58.38	6.35	6.82 [0.97]	146.6 [21.5]	A2V
HD24178	03 51 57.2	+25 59 56.0	6.77	18.00 [1.90]	55.6 [3.1]	A0
HD23512	03 46 34.2	+23 37 26.5	8.15	18.40 [3.00]	54.3 [3.0]	A0V
HD23985	03 50 18.9	+25 34 45.7	5.23	16.96 [0.82]	59.0 [3.5]	A2V

第2章 観測

2.1 偏光観測

2008年1月から2009年1月までの間、国立天文台岡山天体物理観測所において本研究にかかわる偏光分光観測および、観測結果の整約に必要な各種校正データ取得のための観測を行った。

観測には主鏡直径188cm反射望遠鏡と観測装置にHBS（低分散偏光分光測光装置）を使用し、それぞれの観測対象に対し1回から3回繰り返して偏光観測を行った。

2.1.1 HBS 装置について

HBSは、可視全域にわたる偏光分光および分光測光を行なうことができる天体観測装置である。HBSの光学系は、校正系(calibrator)、偏光部(polarimeter)、分光部(spectrometer)、CCDカメラ(detector)に分けられる。下の図は、HBSの光学系の模式図である。

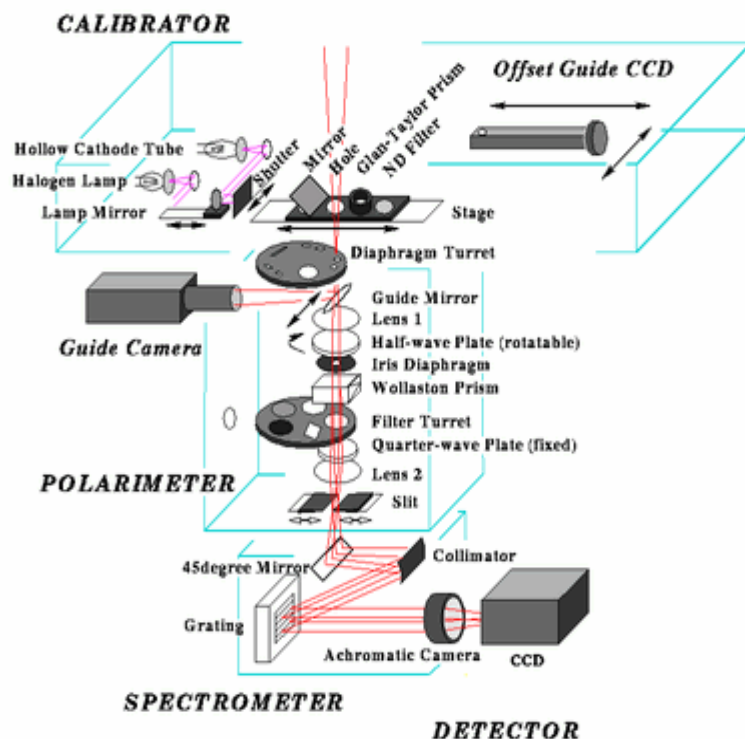


図3：HBSの構造

光学的な装置の概要は、望遠鏡を通過してきた光が焦点面に置かれたダイアフラムを通過し、レンズを通過して再び平行光になり、回転する1/2波長板を通過する。この1/2波長板は 0° ~ 360° の間を回転可能にしてある。通常の観測では 0° 、 22.5° 、 45.0° 、 67.5° に設定し、この4つの角度での撮影を1set、一組の観測とする。そして、整約ソフトを用いてそれら

ら一組の(Q,U)を求める。

$$Q = (I_{\max} - I_{\min})\cos 2(\theta - \theta_{\max}), \quad U = (I_{\max} - I_{\min})\sin 2(\theta - \theta_{\max}) \quad (2.1.1)$$

(Q,U)を求めるには2組の角度で方位を決定することができる。しかし、2つの方位だとグレーティングにおける常光と異常光の反射率の違いによる波長依存性が大きいために精度が落ちるため、4つの角度を撮影する。

1/2波長板を通過したウォラストンプリズムによって常光と異常光に分解され、その後、ウォラストンプリズムの主軸に対して45°回転した方向に光学軸をあわせた1/4波長板を通過し、常光・異常光ともに円偏光に近い楕円偏光に変換される。これは直線偏光が常光と異常光とでは光路が異なり、直線偏光のままではグレーティングなど反射過程を含む光学系を経る際に透過率の差が生じるので、この差をなくすために反射の前に円偏光への変換をおこなっておくのである。これは機械系によって起こる不必要な偏光を防ぐ効果になる。

その後、再びレンズによって収束光にされ、焦点を結んだ後、分光器に入る。分光器の中では45°鏡、コリメーター（反射鏡）、グレーティング、カメラレンズの順に通過・反射して受光部に常光、異常光それぞれのスペクトル像を結ぶ。

今回の観測では、0.02mmダイヤフラムと2.00mm分光器スリットを用いて観測した。

2.1.2 観測データの整約

今回、観測で得たデータはHBS用にHBS開発グループによって配布されている整約ソフトを用いて整約を行った。整約に必要な無偏光標準星、強偏光標準星、スカイフラット等の較正データも配布されているものを使用した。これらのデータは各観測期にHBSグループと筆者を含め観測者が岡山天体物理観測所において共同に取得し、その期間ごとに較正データとしてまとめられる。観測で取得したデータは上記の専用ソフトと較正データを用いて整約を行った。

そのデータ整約ソフトの中でどのような処理が行われているかを簡単に説明する。

1. ディレクトリの中に入っているデータで、同じ天体、同じ積分時間、同じダイヤフラムごとにグルーピングを行う。
2. 各グループのダークフレームのグルーピングを行い、ダークの平均を行う。この際、宇宙線の除去も行っている。宇宙線が入っている場合、そこが異常にカウントが高くなってしまふ、データ自身に悪影響が及んでしまふからである。そのあと、バイアスレベルの短時間変動補正を行う。
3. 光の届いていない領域をカットし、ディスクサイズを減らす。
4. あらかじめ登録されている異常な特性をもったピクセル領域のカウントを周囲のピクセルカウントから求める。
5. 像のゆがみや常光と異常光とのスケールの違いを補正する画像変換を行う。
6. Sky backgroundを差し引く。これにより、天体だけのカウントにする。それからピクセルごとの感度ムラをフラットフィールドフレームで割ることで、感度のムラを補正する。
7. ガイドエラーの影響で各画像で像の位置が異なっているので、大気吸収のスペクトル

を目印にして波長を合わせる。

8. スペクトルをスリット長方向に積分を行い、1次元のスペクトル画像にする。
9. 波長方向に適当なピクセル幅で **binning** を行い、**S/N** を稼ぐ。
10. **Q/I,U/I** を求めるためグルーピングを行い、**q,u** を求める。
11. 無偏光標準星を用いた原点補正、無偏光標準星に **Glan-Taylor** プリズムを挿入し100%の偏光を得たものによる消偏光補正、半波長板透過率の波長依存補正、強偏光標準星による天球上の偏光位置角との合わせを行う。

2.2 HBS による観測状況

観測は、2008年1月16日～1月23日、2008年10月28日～11月13日、2009年1月13日～20日に国立天文台岡山天体物理観測所において実施した。表3に観測候補星ごとに観測日、天候などの観測状況と撮影露出時間などを記した。

表3：観測状況

Object	Date	exp time	sets	seeing	comments
HD3037	08/01/16	50	5		hazy
	08/11/11	100	9	2.5	Fair
	08/11/12	60	9	2.5	Clear
HD21110	08/01/16	60	9		clear
	08/11/10	60	0	-	Cloudy
	08/11/11	60	9	1.9	Fair
HD288309	08/01/16	120	0		cloudy
HD20844	08/01/17	60	8	2	cloudy
	08/11/11	40	9	1.4	Fair
HD34316	08/01/19	120	1	2.6	※ローテータ61.9°、Cloudy、ガイド星位置ずれ大
HD23850 (27 Tau)	08/10/29	25	0.5	2.1	cloudy
	08/10/30	10	6	1.3	Clear
	08/10/31	20	6	1.5	Fair
	08/11/05	8	7	1.2	Clear
HD211073	08/10/30	20	1		試し取り、binary (2重星の可能性あり)
HD206509	08/10/30	35	6	1.5	Clear
	08/11/05	30	6	1.8	Cloudy
HD206823	08/10/30	50	6	1.4	Clear
	08/11/05	50	9	1	Cloudy
HD206348	08/10/30	80	6	1.9	Clear
	08/11/05	50	7	1.5	Fair

HD23480 (23 Tau)	08/10/30	20	6	1.4	Clear
	08/11/05	10	6	1.5	Clear
HD23338 (19 Tau)	08/10/30	18	6	1.7	Clear
	08/11/05	20	9	1.5	Clear
HD23753	08/10/30	30	6	2.2	Clear
	08/11/05	20	9	1.8	Fair
HD24118	08/10/30	100	6	1.8	fair
	08/11/05	40	9	1.9	Clear
	09/01/13	40	6	1.7	Clear
HD24368	08/10/30	100	0	1.4	Cloudy
	08/11/05	35	9	1.5	Clear
	09/01/16	60	6		Fair
HD37387	08/10/30	100	5	1.5	Fair
	08/11/05	60	7	1.3	Fair
	09/01/13	60	6	1.6	Clear
HD3122	08/11/11	100	9	2.2	Fair
	08/11/12	60	9	1.7	Clear
HD37769	08/10/31	40	10	1.7	Clear
HD245547	08/11/11	50	15	2.1	Clear
	08/11/12	80	9	1.6	Clear
HD196819	08/11/12	60	9	1.7	Clear
BD+41 3833	08/11/13	80	9	2.2	Fair
HD245547	08/11/12	80	9	1.6	Clear
HD34454	08/11/12	60	9	1.4	Clear
	08/11/13	120	9	1.5	Hazy
	09/01/17	100	5		Hazy
HD34547	09/11/13	100	9	1.2	Hazy
	09/01/14	100	5	2.7	Fair
HD39498	08/11/13	100	4	1.7	Hazy
HD23985	09/01/13	20	8	2.2	Cloudy
	09/01/14	40	6	2.9	Clear
HD24178	09/01/13	100	6	1.7	Clear
	09/01/14	100	4	3.4	Fair
	09/01/15	200	6		Clear
HD23512	09/01/17	200	6		Fair

HD34033	09/01/19	120	7		Cloudy, binary (2 重星の可能性あり)
HD34316	09/01/19	80	6		Cloudy

※ 望遠鏡と HBS 装置を結合する部分が、基準とされている角度(66.3°)よりずれていることが判明した。観測途中でずれた場合、較正用のデータがずれる前とずれた後では差が出てしまい使用できない恐れがある。しかし、調査の結果、初めからこの角度で取り付けられていたことが判明したため、較正用のデータは使用可能ということがわかった。

第3章 観測結果

この章では、観測によって得られたデータの解析結果を報告する。

得られたデータは2つの方法で偏光度(p_{\max})と最大偏光波長(λ_{\max})を求めている。これは、fittingの結果だけでは、可視域の端の波長の誤差が大きい場合、求めたい p_{\max} や λ_{\max} の値に誤差が影響を及ぼすため、 $p(0.4\sim 0.6\mu\text{m})$ と $p(0.6\sim 0.8\mu\text{m})$ の2つの領域に分けて誤差の影響を少なくするためである。

方法(1)

HBSの整約ソフトを使って解析によって作られた~0.xyファイルから $p(\lambda)$ に対して、パラメータ k (式 1.2.10)をフリーパラメータした場合と、 $k=1.15$ に固定した場合の fitting、 $\theta(\lambda)$ に対する一次関数 fitting を行い、各パラメータの値を求め、偏光度(p_{\max})、偏光度の誤差(dp_{\max})、最大偏光波長(λ_{\max})、最大偏光波長の誤差($d\lambda_{\max}$)、偏光位置角(θ)、偏光位置角の誤差($d\theta$)の値を求めた。

方法(2)

Serkowskiの経験式を仮定し、 $p(0.4\sim 0.6\mu\text{m})$ の偏光度の平均と $p(0.6\sim 0.8\mu\text{m})$ の偏光度の平均を求め、2つの偏光の平均の比から Vバンドでの偏光度(p_V)、偏光度の誤差(dp_V)、最大偏光波長(λ_{\max})、最大偏光波長の誤差($d\lambda_{\max}$)、偏光位置角(θ)、偏光位置角の誤差($d\theta$)を求めた。

また、方法(2)では ADSにおいて測光データがある星については、光度階級を仮定し、スペクトルタイプから固有の色指数を推定したものの差をとり、色超過(E_{B-V})も求めた。

また、距離については SIMBAD に掲載されている年周視差から計算した。

観測結果の視線ごとのまとめを pp.16~21 の 図 4-14 に示す。

表 4 は偏光度と最大偏光波長 λ_{\max} のデータ一覧である。2009年1月のデータについては、2009年1月の最終的な較正データを使うより 2008年10月・11月での較正データを使用した方が、より妥当な結果となるためここでは 2008年10月・11月の較正データを使った解析結果を掲載している。

個々の星の偏光度および偏光位置角の波長依存性を図 15-59 に示す。ここでの 2009年1月のデータは 2009年1月の較正データを使って解析したものである。図 48 については 2009年1月の較正データでの解析結果(図 48-1)、2008年10月・11月の較正データを使って解析した結果(図 48-2)を掲載している。

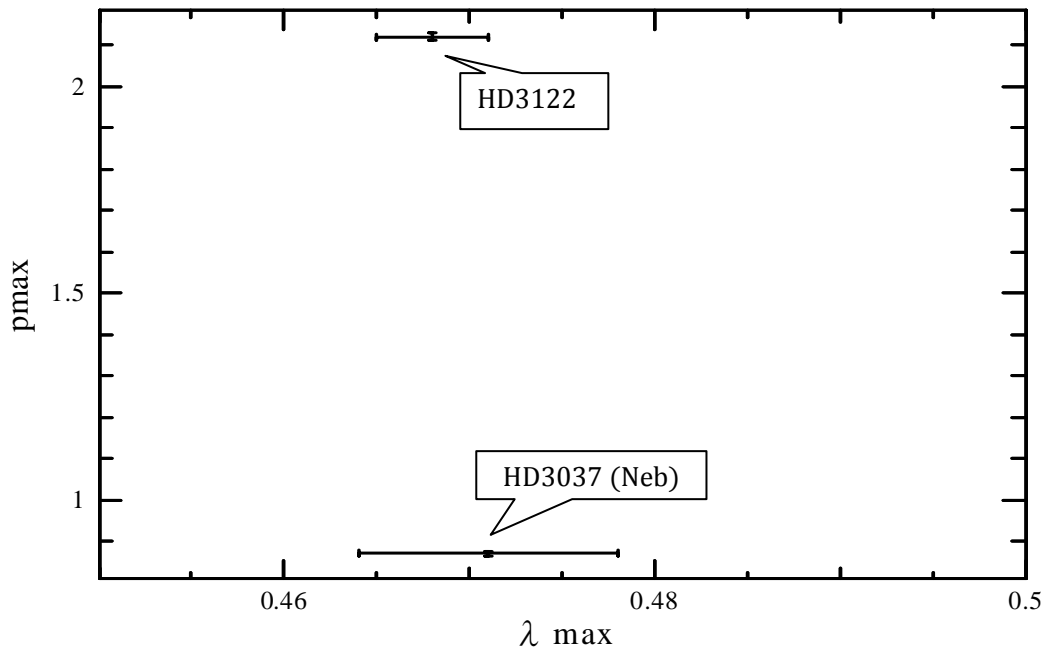


図 4 : HD3037(Neb)と HD3122 の λ_{\max} と p_{\max} の比較

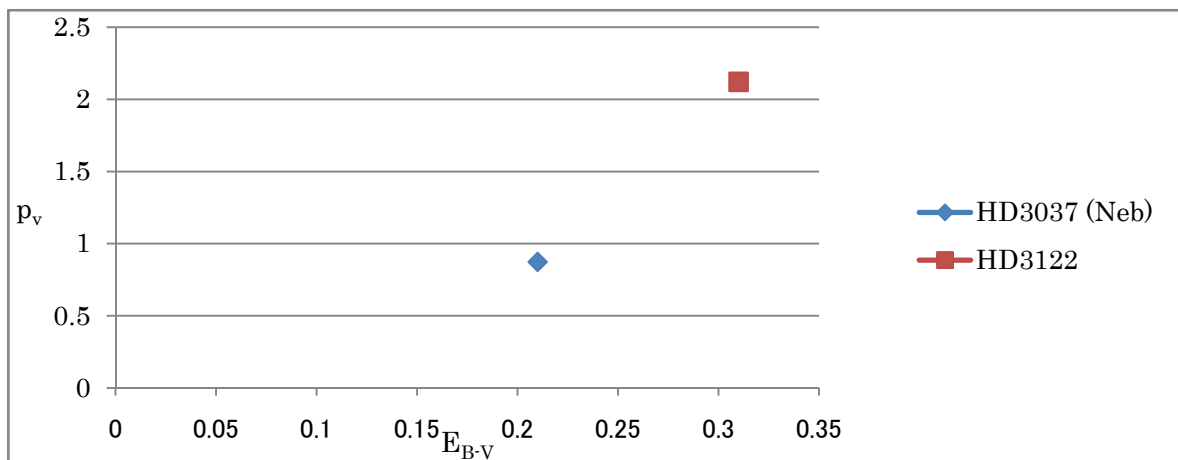


図 5 : HD3037(Neb)と HD3122 の E_{B-V} と p_v の比較

この2つの星を比べると、 λ_{\max} はどちらも有意な差は見られない。

偏光位置角については、HD3037 が約 175° 、HD3122 が約 95° で HD3037 の方が大きな値となっている。

偏光効率は星雲を伴う HD3037 は $4.16\%/mag$ 、伴わない HD3122 は $6.84\%/mag$ と星雲を通していない HD3122 の方が高い。

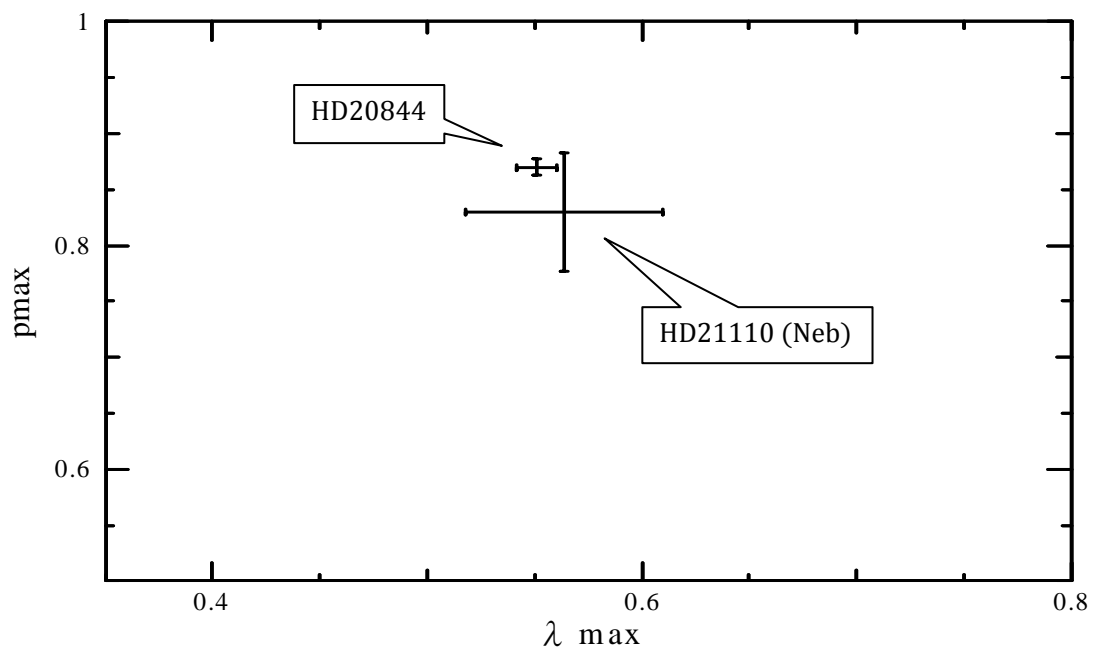


図 6 : HD21110(Neb)と HD20844 の λ_{\max} と p_{\max} の比較

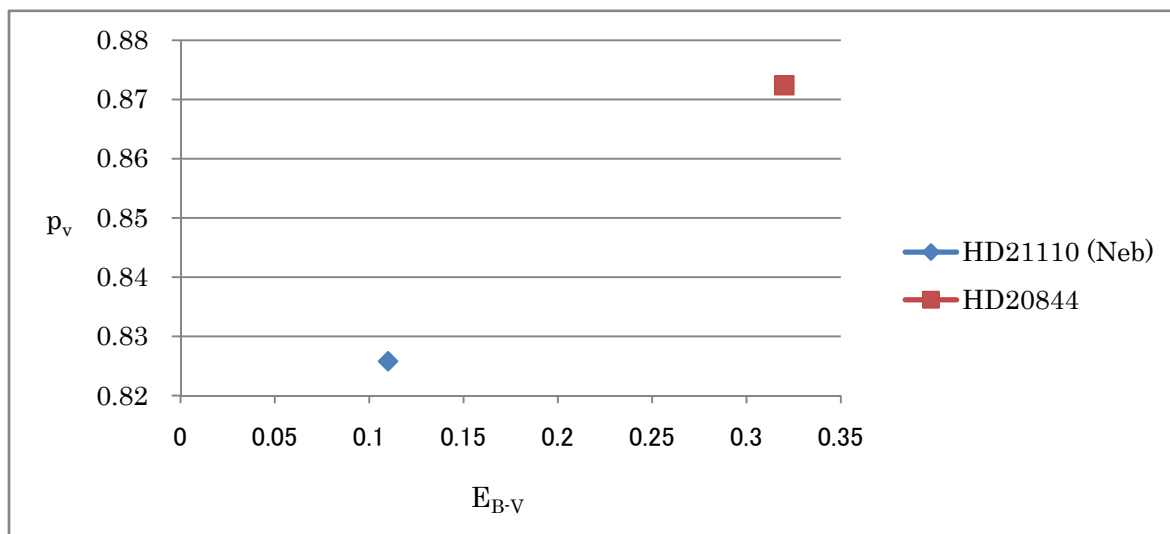


図 7 : HD21110(Neb)と HD20844 の E_{B-V} と p_v の比較

この2つの星を比較すると、 λ_{\max} は有意な差は見られない。

また、偏光効率を比べると星雲を伴う HD21110 は 7.51%/mag、星雲を伴わない HD20844 は 2.73%/mag で星雲を通して星の方が高い。

HD21110(Neb)と HD20844 の p_{\max} も有意な差は見られない。

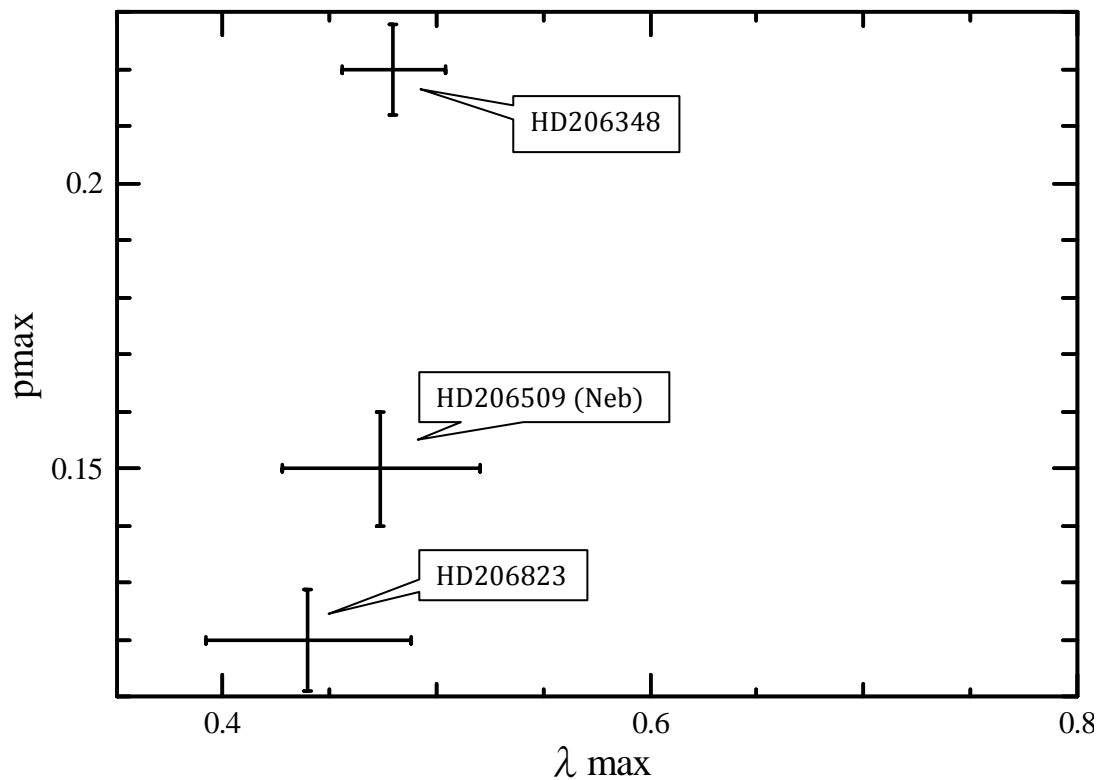


図 8 : HD206509(Neb),HD206823,HD206348 の λ_{\max} と p_{\max} の比較

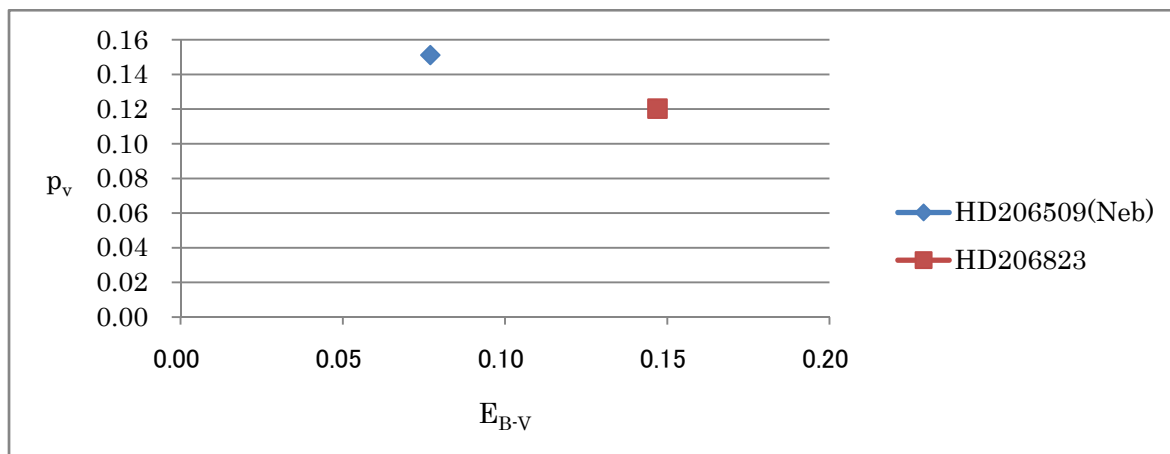


図 9 : HD206509(Neb)HD206823,HD206348 の E_{B-V} と p_v の比較

この3つの星を比較すると、 λ_{\max} の値を比較してみると、有意な差は見られない。また、結果が分かっている HD206509 と HD206823 の偏光効率を比較すると、星雲を伴う HD206509 の偏光効率は 1.96%/mag、伴わない HD206823 は 0.82%/mag と星雲を伴う HD206509 の方が高い。

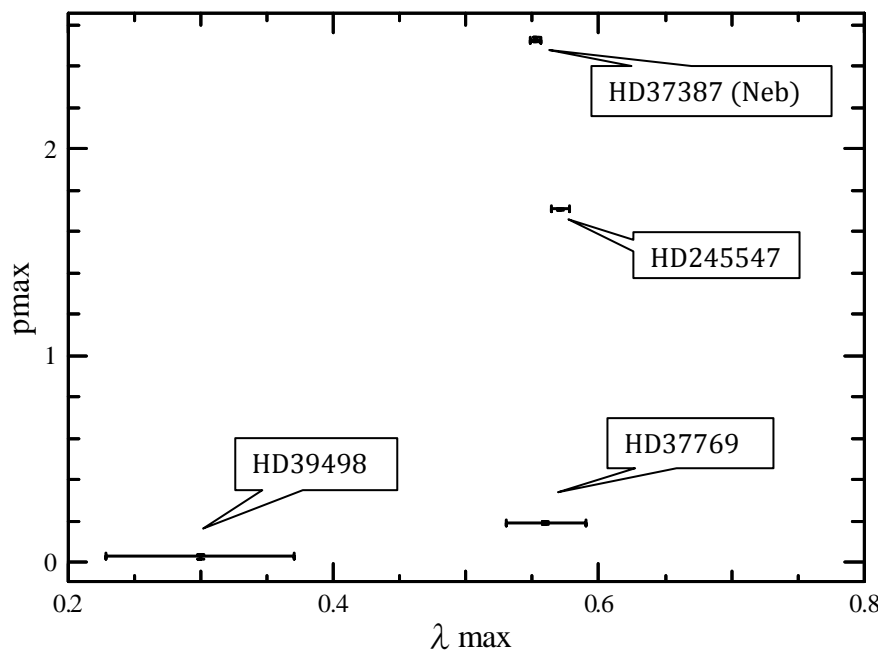


図 10 : HD37387(Neb),HD245547,HD37769,HD39498 の λ_{\max} と p_{\max} の比較

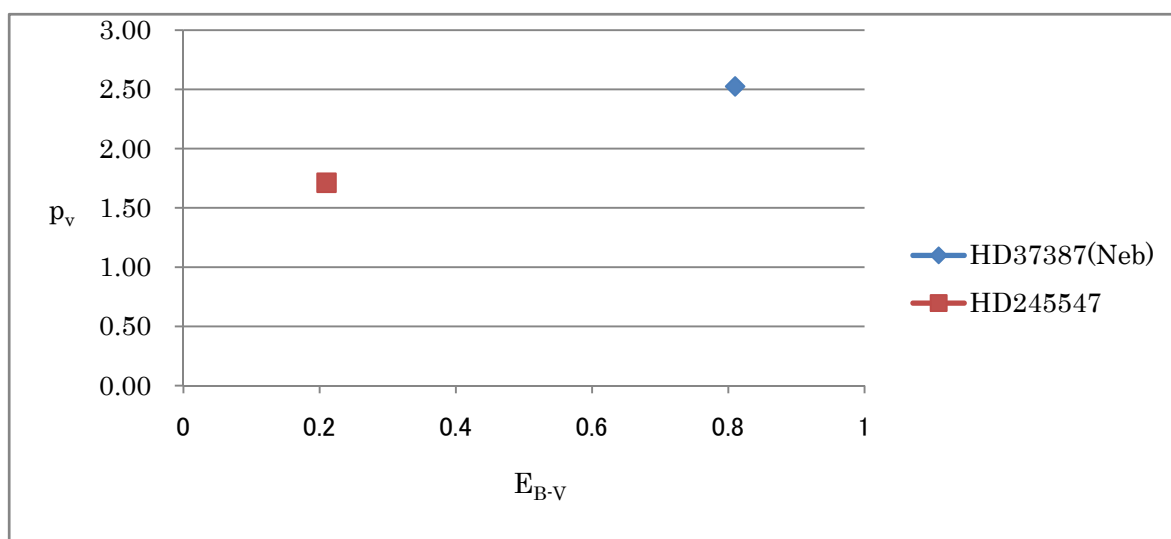


図 11 : HD37387(Neb),HD245547,HD37769,HD39498 の E_{B-V} と p_v の比較

この4つの星の λ_{\max} を比較すると、HD39498 以外の星には有意な差は見られない。HD39498 については観測時に取得したデータ数が少ないことが原因と考えられる。

偏光効率については、星雲を伴う HD37387 は 3.12%/mag、星雲と伴わない HD245547 は 8.15%/mag と星雲を伴わない HD245547 の方が高い。

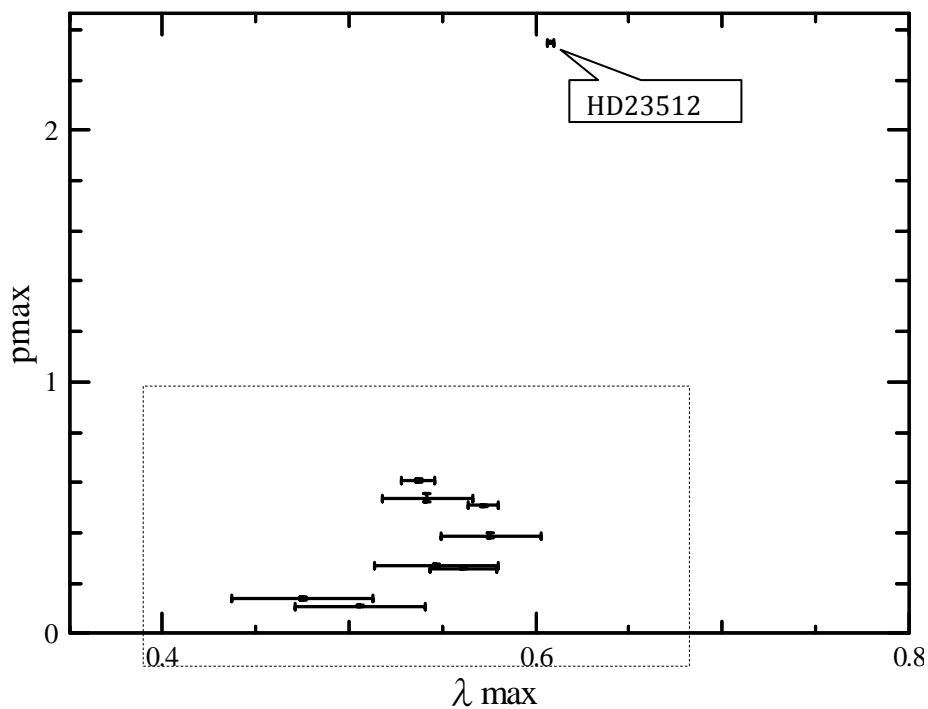


図 12 : プレアデスの星の λ_{\max} と p_{\max} の比較

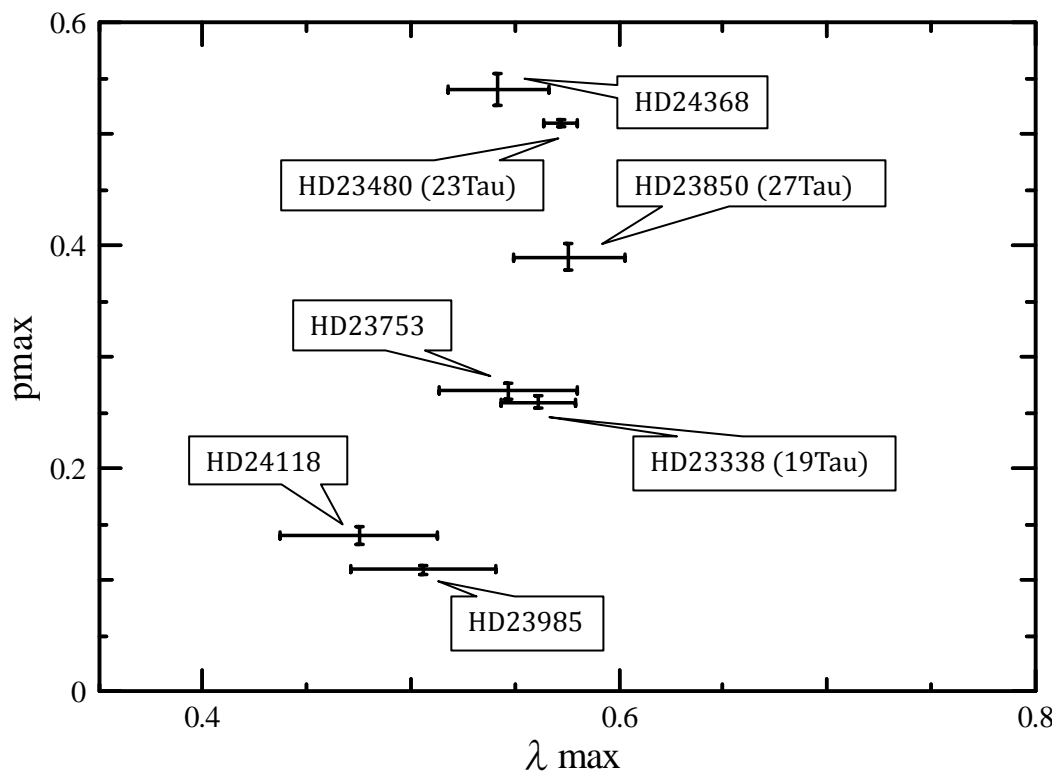


図 13 : プレアデスの星の λ_{\max} と p_{\max} の比較 (図 12 の破線部の拡大)

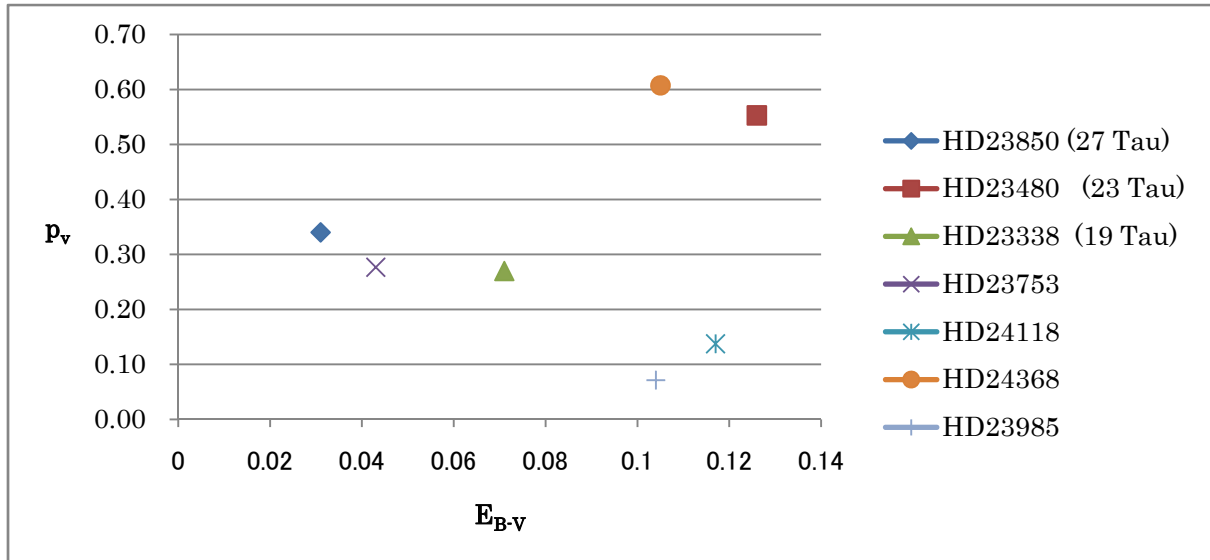


図 14 : プレアデスの星の E_{B-V} と p_v の比較

この 6 つの星はプレアデス星団の星である。27Tau、23Tau、19Tau の周辺は星間物質が多いところと考えられている(Gibson & Nordsieck,2003)。6 つの星を比較すると、HD24118 と HD23985 の λ_{\max} の値が小さい。また、この 2 つの星の偏光位置角 θ も他の星とは小さい値となっている。

また、偏光効率は 27Tau が最も大きく、HD23985 が最も小さな値となっている。

表 4 : 偏光度 p_{\max} と最大偏光波長 λ_{\max} のデータ一覧

Object	Parallaxes mas [d]	pc [d]	date	方法(1)						方法(2)							
				p_{\max}	dp_{\max}	λ_{\max}	$d\lambda_{\max}$	θ	$d\theta$	p_v	dp_v	E_{B-V}	p/E_{B-V}	λ_{\max}	$d\lambda_{\max}$	θ_v	$d\theta_v$
HD3037 (Neb)	1.68 [0.84]	595.2 [±354.3]	08/1/16	0.90	0.003	0.550	0.004	69.09	0.13			0.21					
			08/11/11	0.90	0.007	0.476	0.005	175.24	0.20	0.87	0.006		4.16	0.471	0.007	175.31	0.21
			08/11/12	0.89	0.010	0.468	0.008	175.46	0.20	0.85	0.009		4.06	0.466	0.008	175.19	0.13
HD3122	0.58 [0.77]	1724.1 [±2972.7]	08/11/11	2.18	0.008	0.469	0.002	95.53	0.09	2.12	0.010	0.31	6.84	0.468	0.003	95.66	0.29
			08/11/12	2.22	0.008	0.469	0.003	95.2	0.09	2.15	0.011		6.93	0.469	0.004	95.35	0.05
HD21110 (Neb)	4.80 [0.97]	208.3 [±43.4]	08/1/16	0.90	0.003	0.550	0.003	69.09	0.13			0.11					
			08/11/11	0.84	0.008	0.571	0.010	69.89	0.29	0.83	0.053		7.51	0.564	0.046	69.97	1.85
HD20844	0.22 [0.99]	4545.5 [±1010.1]	08/1/17	0.83	0.006	0.545	0.008	178.57	0.20			0.32					
			08/11/11	0.87	0.006	0.572	0.008	82.15	0.30	0.87	0.007		2.73	0.551	0.009	82.32	0.24
HD206509 (Neb)	4.64 [0.58]	215.5 [±46.4]	08/10/30	0.16	0.007	0.458	0.025	92.22	1.33	0.15	0.010	0.08	1.96	0.474	0.046	93.85	1.91
			08/11/5	0.20	0.014	0.359	0.023	99.75	1.27	0.16	0.014		2.05	0.386	0.048	101.78	2.6
HD206823	4.80 [0.66]	208.3 [±43.4]	08/10/30	0.13	0.007	0.439	0.027	78.51	1.31	0.12	0.009	0.15	0.82	0.440	0.048	79.01	2.18
			08/11/5	0.15	0.012	0.368	0.026	84.06	1.85	0.12	0.011		10.91	0.369	0.044	85.93	2.63
HD206348			08/10/30	0.23	0.004	0.475	0.015	69.35	0.60	0.22	0.008			0.480	0.024	69.62	1.03
			08/11/5	0.19	0.005	0.458	0.019	72.92	0.87	0.18	0.006			0.506	0.029	73.5	0.97
HD37387 (Neb)	0.88 [1.02]	1136.4 [±1291.3]	08/10/31	2.54	0.008	0.558	0.004	129.42	0.05	2.53	0.008	0.81	3.12	0.553	0.004	129.46	0.09
			08/11/5	2.59	0.007	0.556	0.003	129.29	0.09	2.58	0.012		3.19	0.561	0.010	129.42	0.13

			09/1/13	2.54	0.003	0.543	0.001	129.28	0.03	2.53	0.004		3.13	0.528	0.002	129.38	0.04
HD37769			08/11/11	0.20	0.005	0.550	0.028	44.07	0.38	0.19	0.007			0.560	0.030		
HD245547			08/11/11	1.71	0.007	0.569	0.005	141.35	0.19	1.71	0.010	0.21	8.15	0.571	0.007	141.34	0.06
			08/11/12	1.71	0.006	0.566	0.005	141.54	0.17	1.71	0.004		8.12	0.575	0.006	141.31	0.22
HD39498			08/11/13	0.04	0.005	0.550	0.018	217.73	8.80	0.03	0.009			0.300	0.071	66.21	8.56
HD23850 (27 Tau)	8.57 [1.03]	116.6 [±16.6]	08/10/30	0.41	0.01	0.550	0.013	113.35	0.41	0.39	0.012	0.031	12.64	0.576	0.027	112.37	0.85
			08/10/31	0.39	0.005	0.694	0.015	113.7	0.34	0.34	0.006		10.97	0.708	0.024	113.66	0.53
			08/11/5	0.32	0.007	0.536	0.023	112.89	0.38	0.32	0.010		10.41	0.533	0.024	114.12	0.88
HD23480 (23 Tau)	9.08 [1.04]	110.1 [±12.1]	08/10/30	0.55	0.007	0.531	0.012	139.69	0.25	0.54	0.014	0.126	4.31	0.542	0.018	139.91	0.72
			08/11/5	0.56	0.008	0.640	0.016	139.03	0.36	0.55	0.012		4.39	0.662	0.021	139.24	0.61
HD23338 (19 Tau)	8.75 [1.08]	114.3 [±13.1]	08/10/30	0.27	0.004	0.550	0.017	140.87	0.72	0.26	0.006	0.071	3.64	0.561	0.018	139.54	0.65
			08/11/5	0.29	0.005	0.550	0.019	143.09	0.67	0.27	0.011		3.80	0.583	0.026	140.8	1.16
HD24178	18.00 [1.90]	55.1 [±3.1]	09/1/13	0.51	0.002	0.585	0.006	126.99	0.14	0.51	0.003	0.151	3.35	0.572	0.008	126.92	0.19
			09/1/14	0.53	0.003	0.570	0.008	129.6	0.19	0.51	0.005		3.37	0.572	0.011	129.37	0.28
			09/1/15	0.50	0.002	0.618	0.005	128.96	0.10	0.49	0.002		3.24	0.611	0.007	96.8	0.16
HD23753	9.64 [0.91]	103.7 [±10.8]	08/10/30	0.28	0.003	0.539	0.013	106.91	0.44	0.27	0.007	0.043	6.36	0.547	0.021	106.95	0.74
			08/11/5	0.29	0.004	0.561	0.016	104.72	0.36	0.28	0.010		6.43	0.542	0.033	104.72	1
HD24118	4.76 [0.83]	210.1 [±44.1]	08/10/30	0.14	0.005	0.550	0.037	71.55	1.04	0.14	0.008	0.117	1.18	0.475	0.038	70.3	1.64
			08/11/5	0.14	0.007	0.461	0.034	67.06	1.03	0.12	0.006		1.06	0.43	0.031	69.09	1.39
			09/1/13	0.18	0.003	0.460	0.015	77.2	1.04	0.15	0.003		1.27	0.435	0.023	74.75	0.64
HD24368	6.82 [0.97]	146.6 [±21.5]	08/11/5	0.62	0.004	0.542	0.007	95.25	0.19	0.61	0.007	0.105	5.78	0.537	0.009	95.41	0.34
			09/1/16	0.42	0.001	0.535	0.047	96.52	0.10	0.41	0.002		3.95	0.522	0.006	96.8	0.16
HD23985	16.98 [0.82]	59.0 [±3.8]	09/1/13	0.09	0.002	0.460	0.018	1.27	0.59	0.07	0.002	0.104	0.69	0.77	0.470	1.43	0.85
			09/1/14	0.12	0.003	0.460	0.018			0.11	0.004		1.03	0.506	0.035	167.42	0.99
HD23512	18.40 [3.00]	54.3 [±3.0]	09/1/17	2.38	0.002	0.605	0.001	27.45	0.03	2.35	0.004			0.608	0.002	27.36	0.05

OLIVE 香川大学学術情報リポジトリ

HD34454 (Neb)	5.51	181.5	08/11/13	1.95	0.021	0.542	0.008	88.98	0.39								
	[1.32]	[±32.9]	09/1/17							1.644	0.0101			0.41	0.022	87.79	0.18
HD34574	7.97	125.5	08/11/13	0.41	0.004	0.510	0.010	72.78	0.58								
	[1.19]	[±15.7]	09/1/14	0.39	0.003	0.460	0.007	71.23	0.18	0.366	0.0038			0.463	0.009	71.25	0.3
HD34033 (Neb)			09/1/19	0.50	0.003	0.549	0.008	85.63	0.19	0.474	0.0047			0.557	0.01	84.73	0.28
HD34316	5.68	176.1	08/1/19	0.97	0.008	0.508	0.006	71.06	0.25								
	[0.99]	[±31.0]	09/1/19	0.92	0.003	0.535	0.004	71.51	0.10	0.904	0.0044			0.536	0.005	70.94	0.14

HD3037 (Neb)
2008/1/16

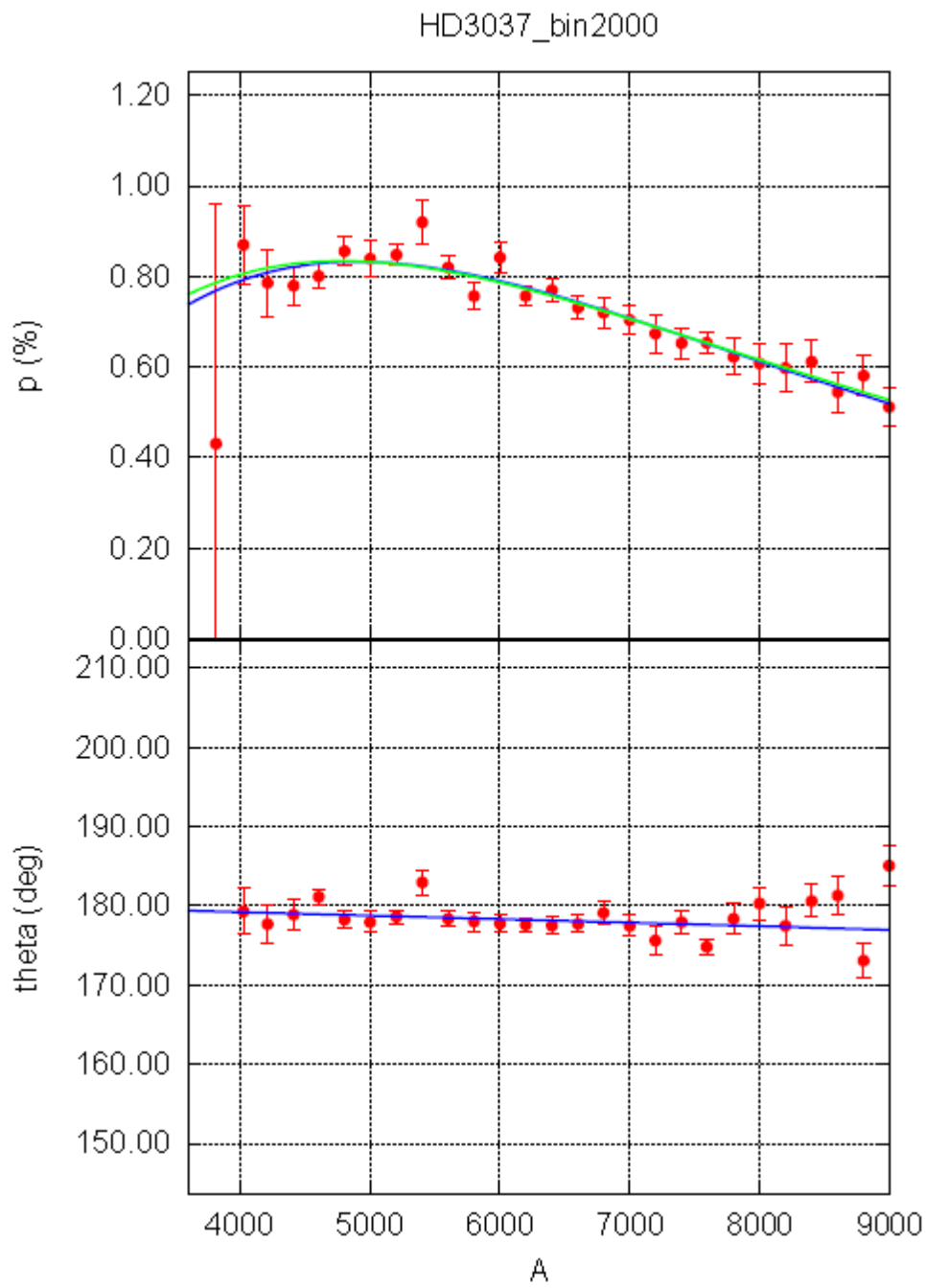


図 15 : HD3037(Neb)の偏光度、最大位置角

HD3037 (Neb)

2008/11/11

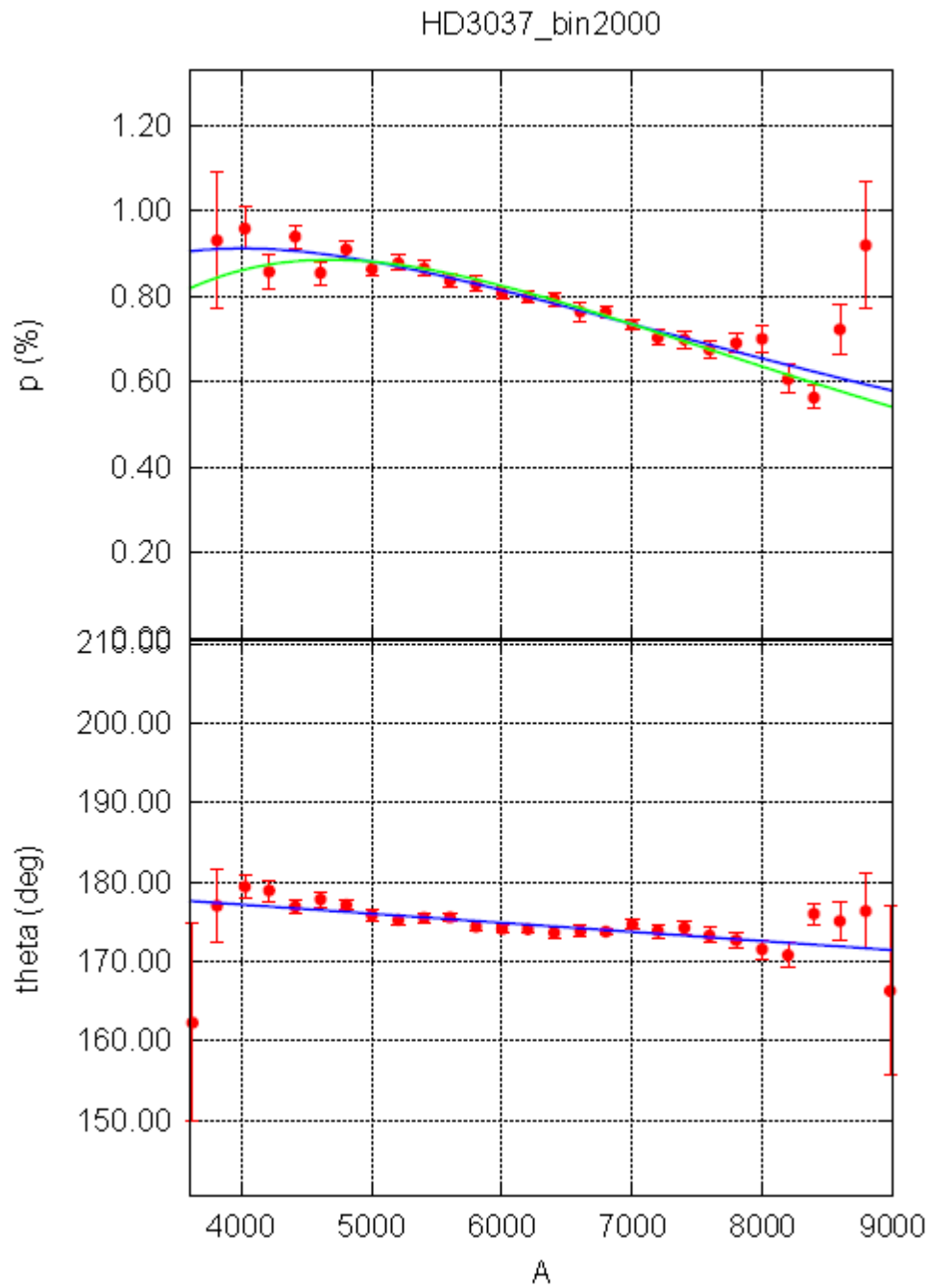


図 16 : HD3037(Neb)の偏光度、最大位置角

HD3037 (Neb)
2008/11/12

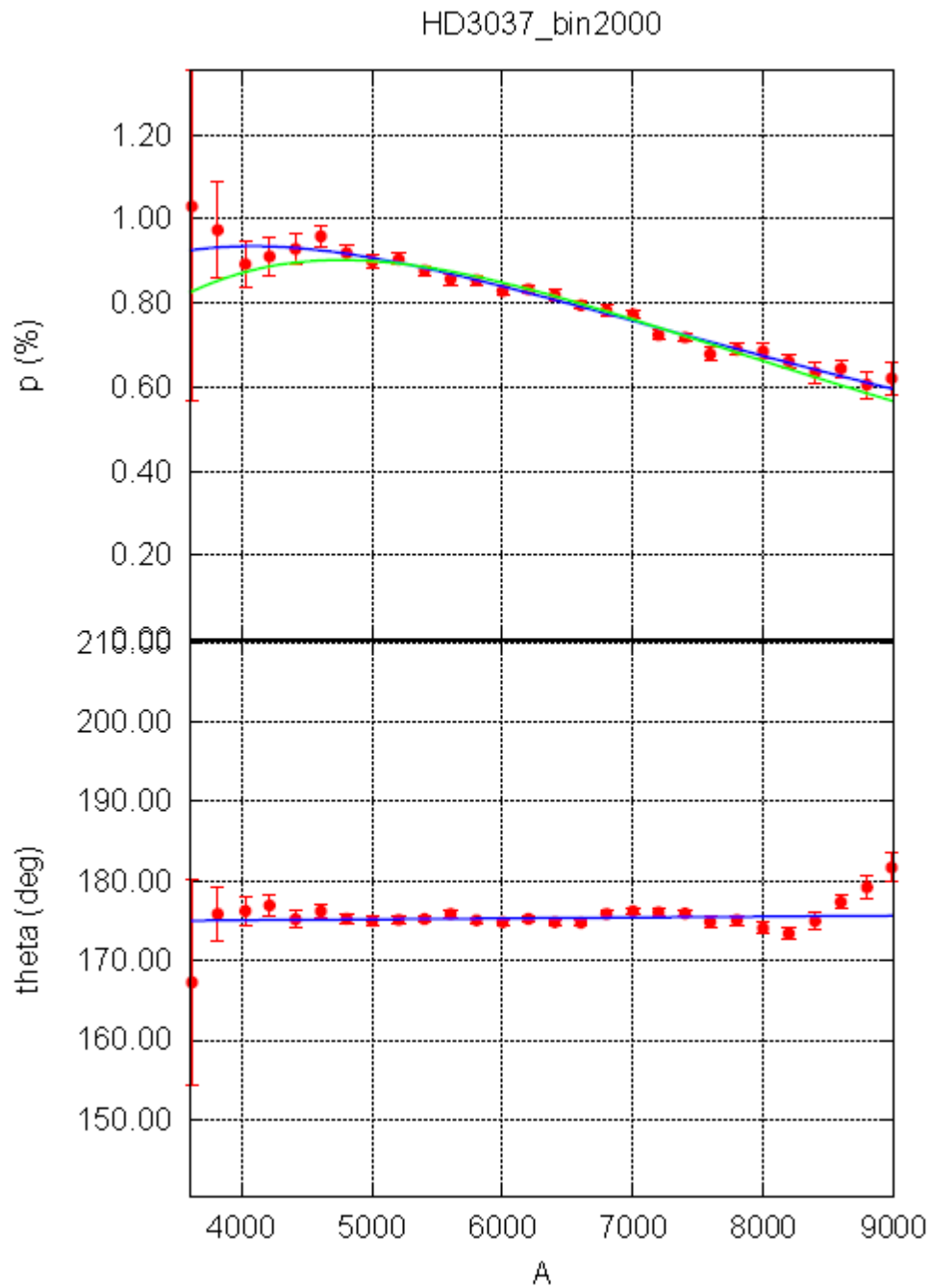


図 17 : HD3037(Neb)の偏光度、最大位置角

HD3122
2008/11/11

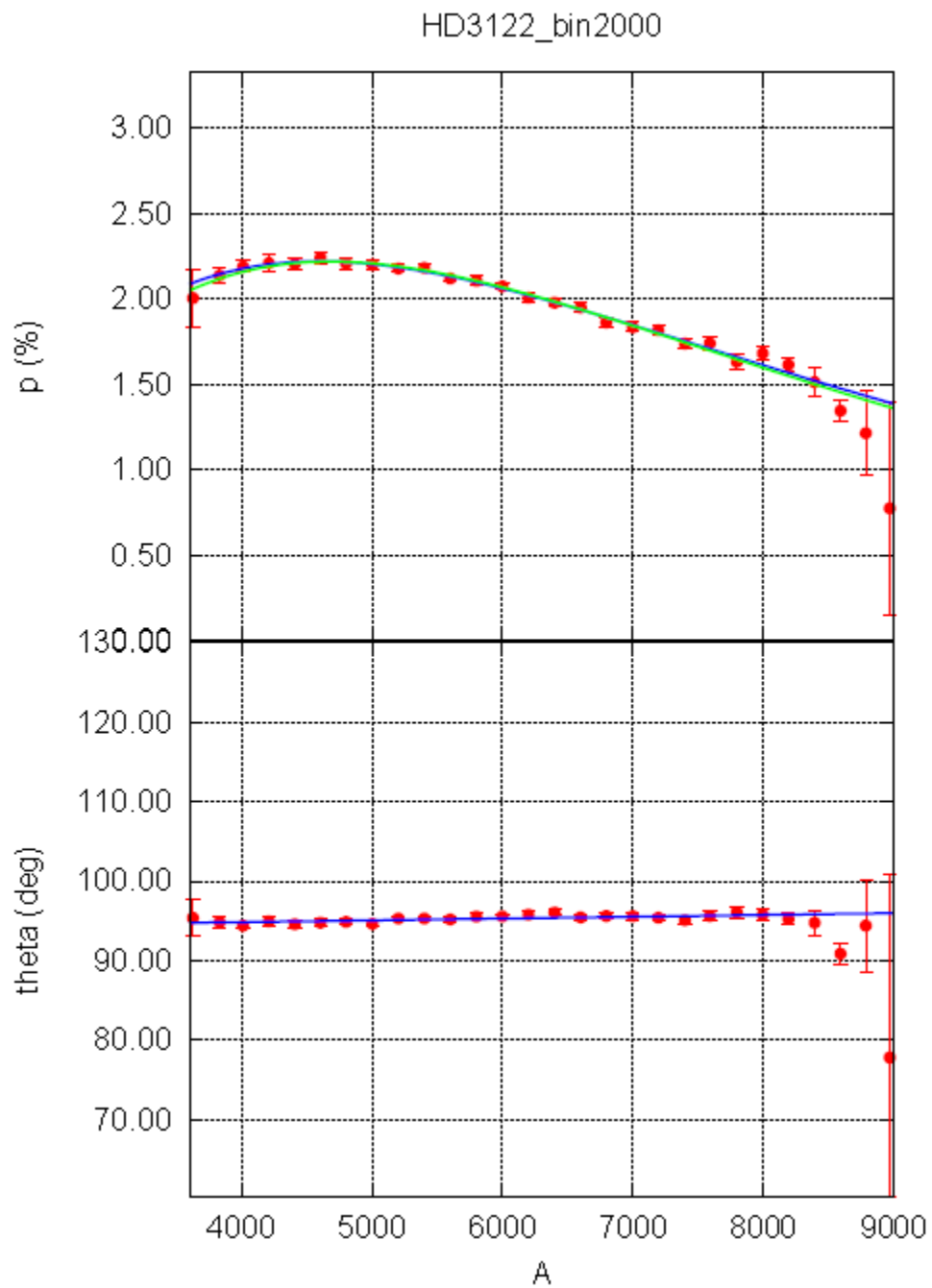


図 18 : HD3122 の偏光度、最大位置角

HD3122
2008/11/12

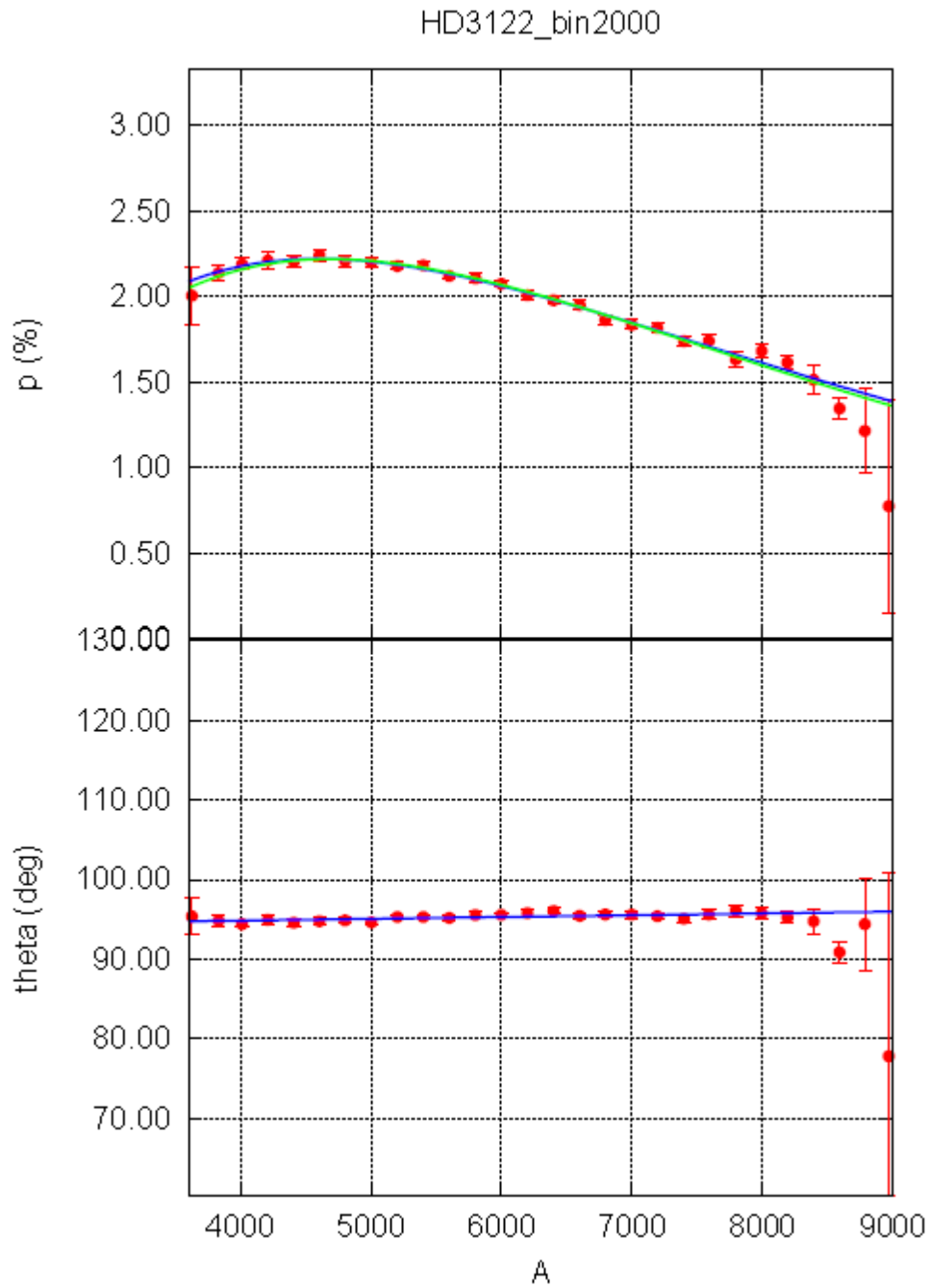


図 19 : HD3122 の偏光度、最大位置角

HD21110
2008/1/16

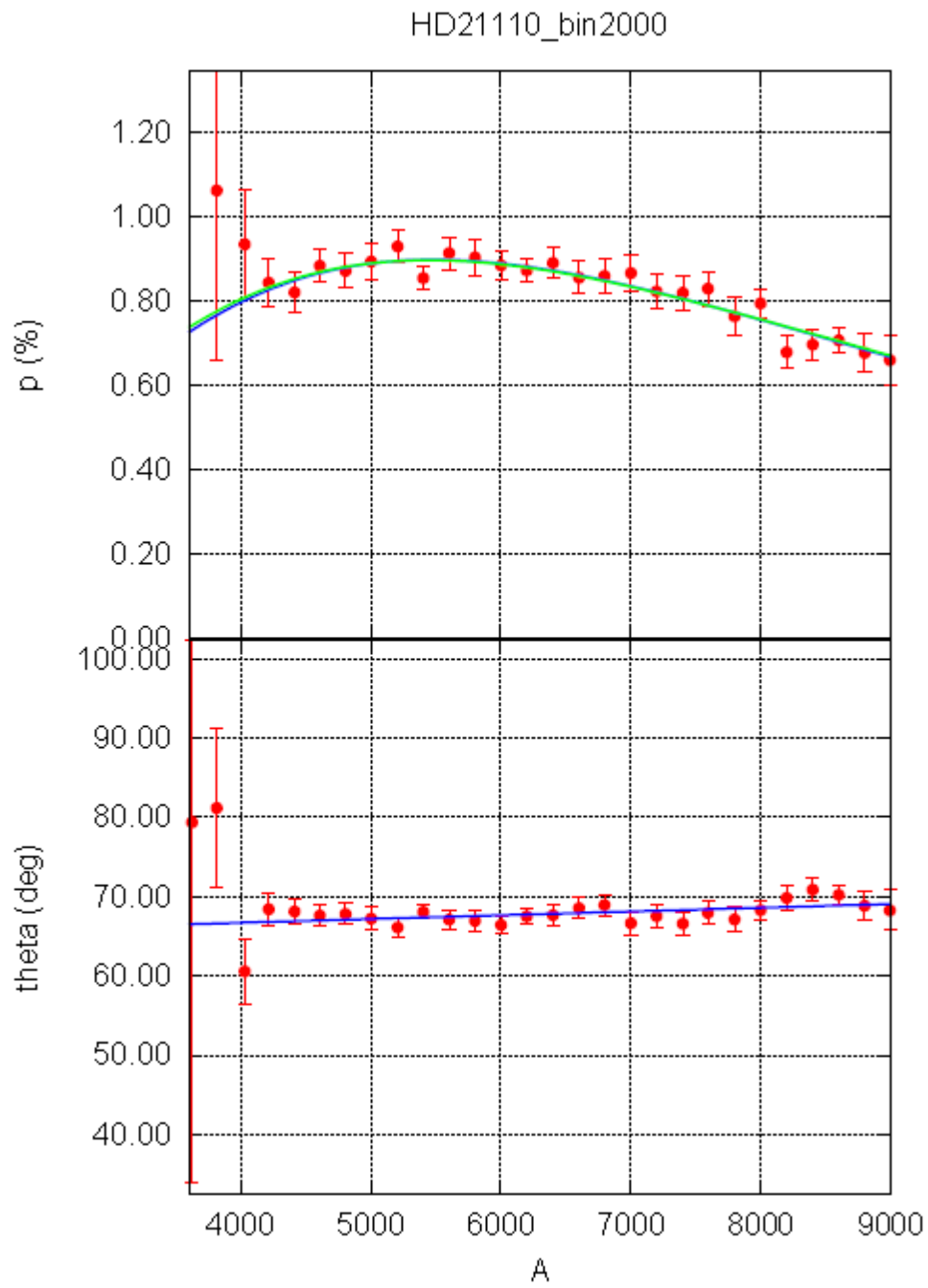


図 20 : HD21110(Neb)の偏光度、最大位置角

HD21110 (Neb)
2008/11/11

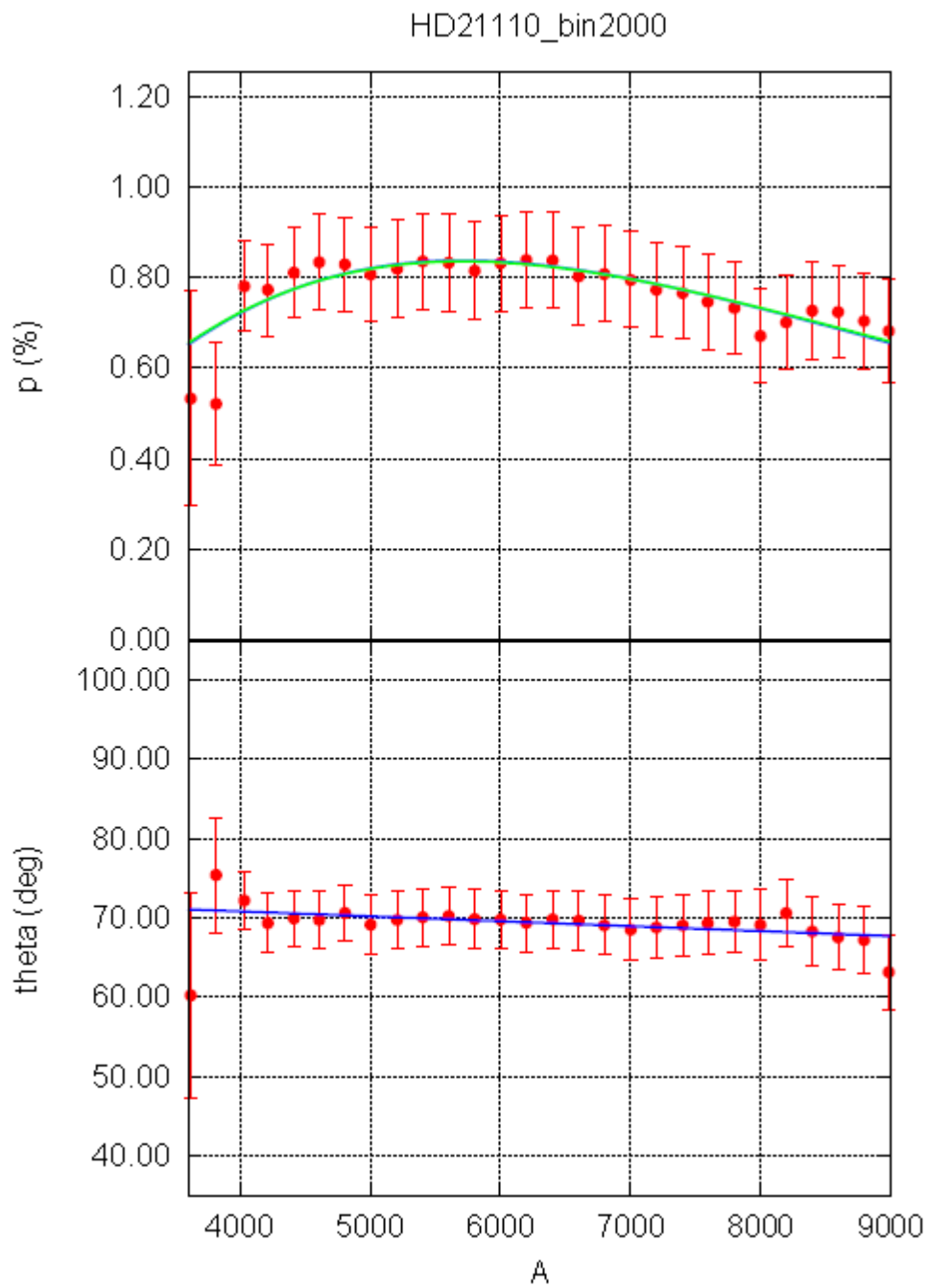


図 21 : HD21110(Neb)の偏光度、最大位置角

HD20844
2008/1/17

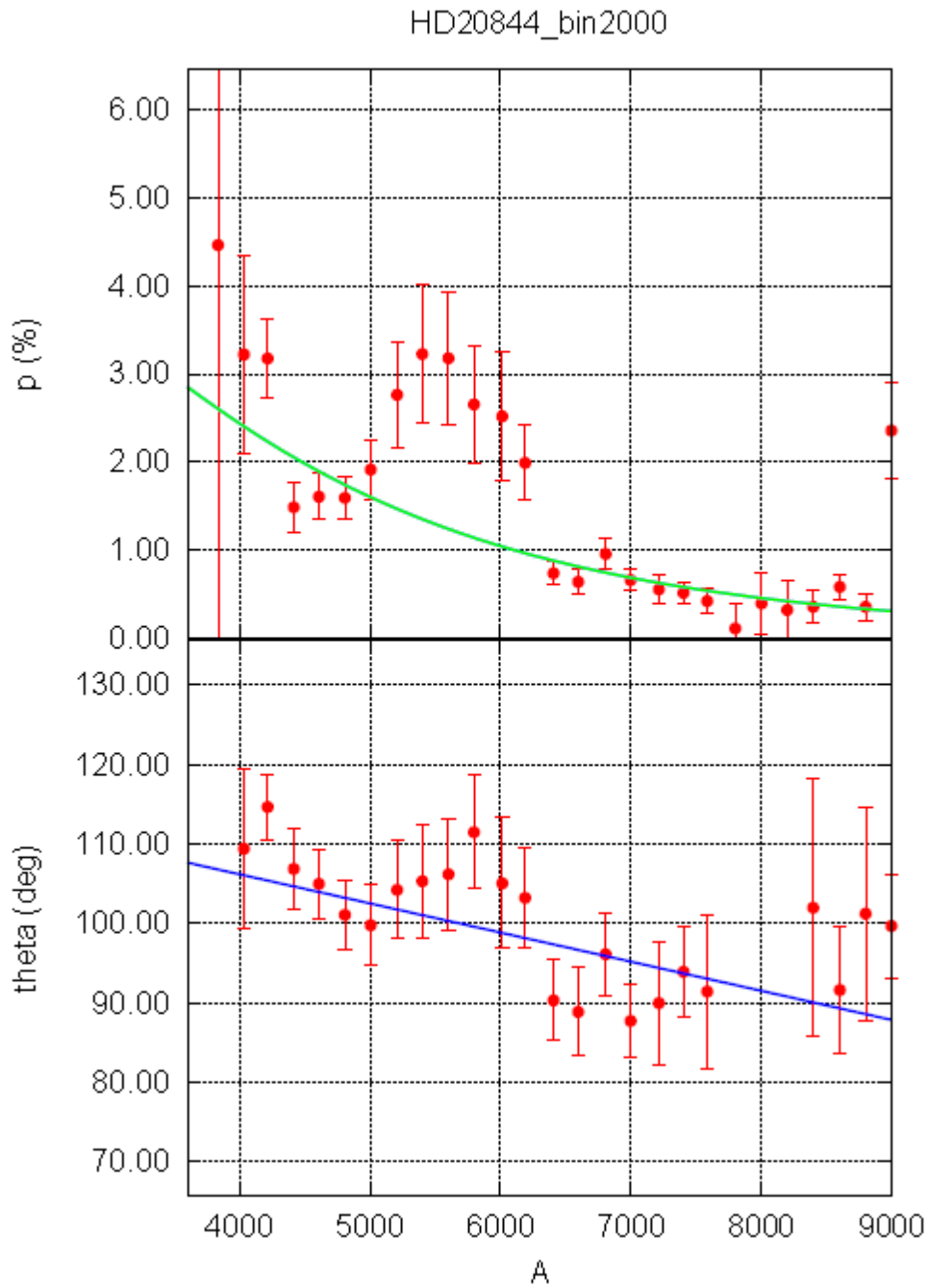


図 22 : HD20844 の偏光度、最大位置角

HD20844
2008/11/11

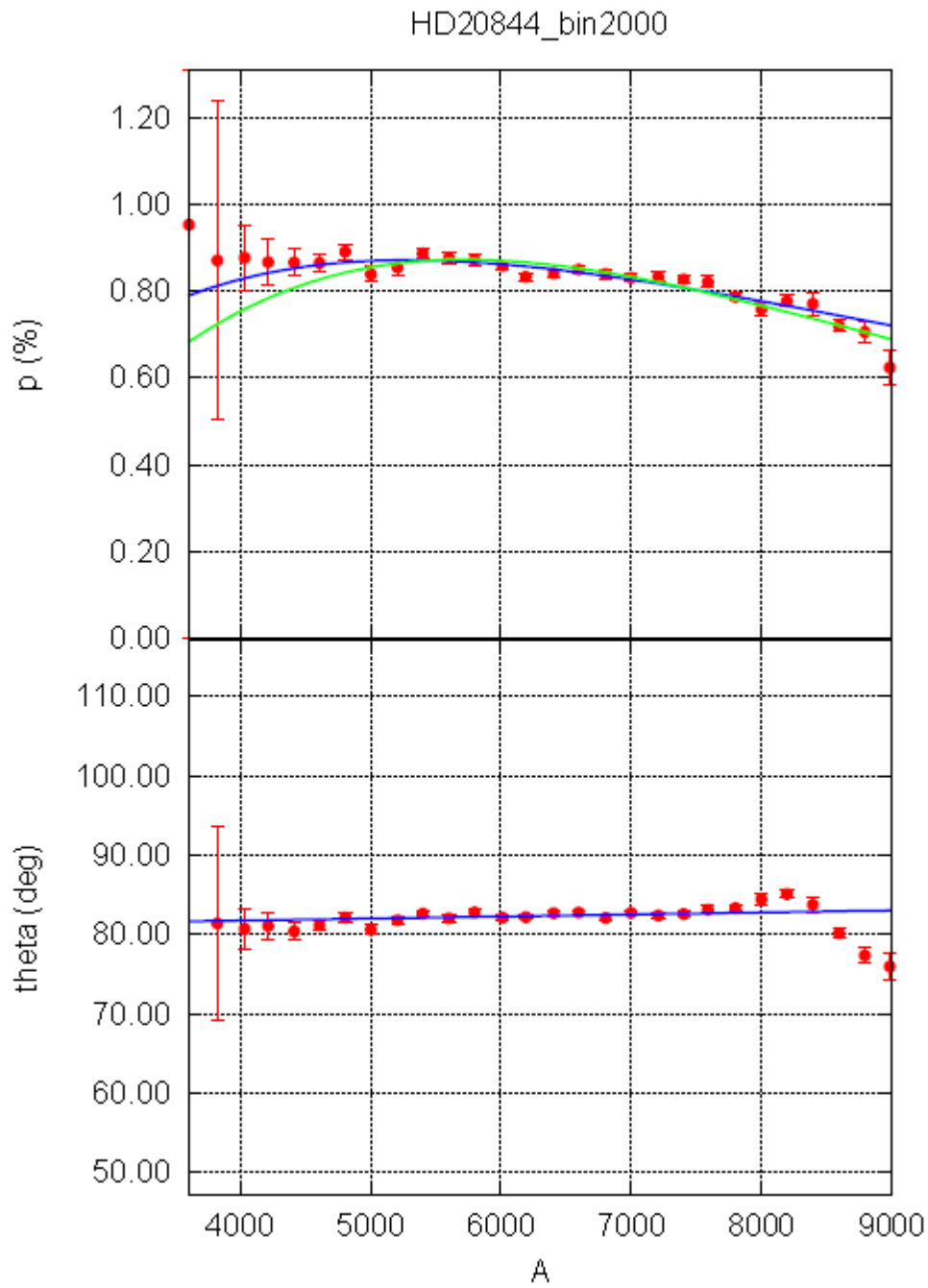


図 23 : HD20844 の偏光度、最大位置角

HD206509 (Neb)
2008/10/30

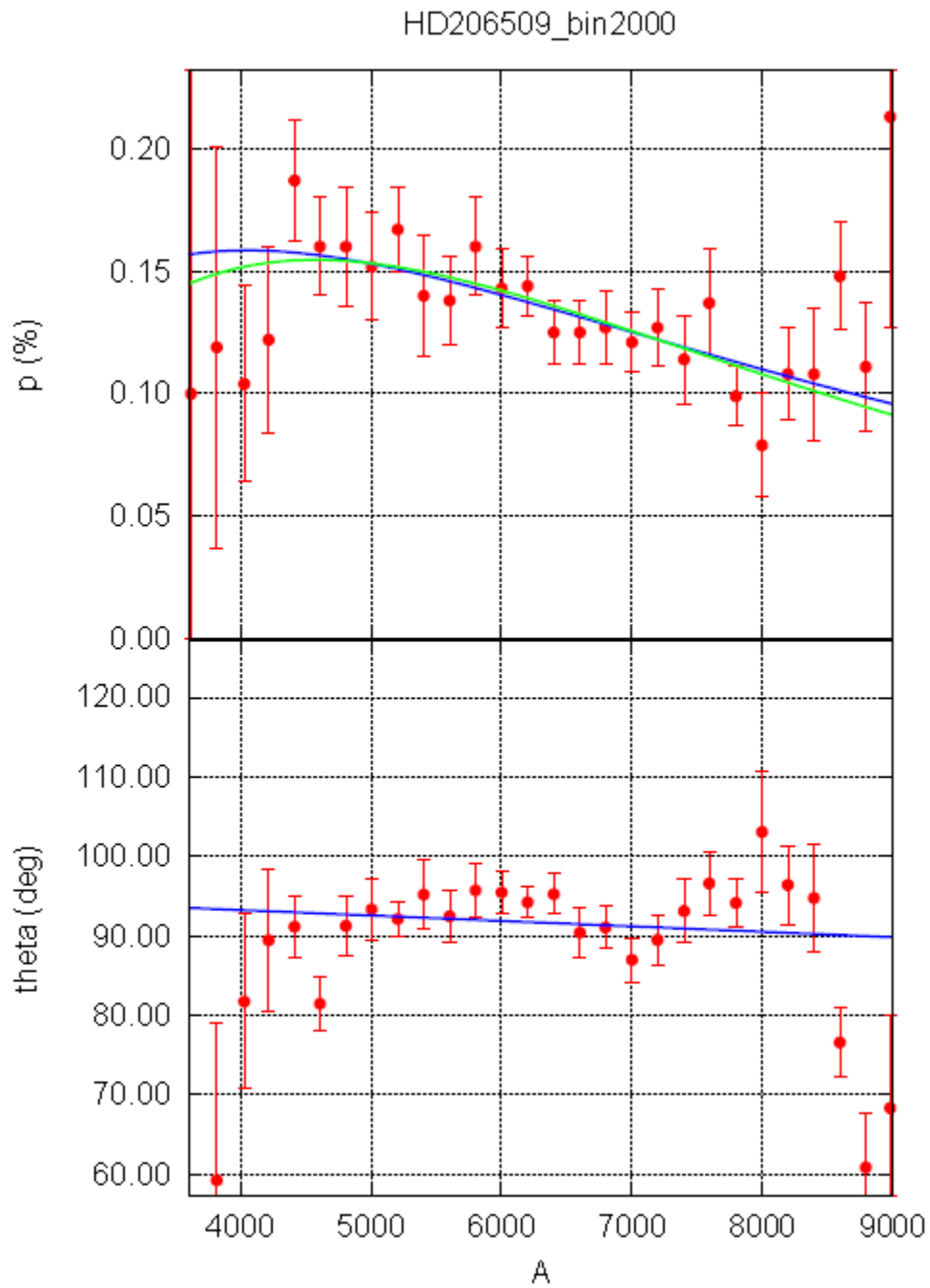


図 24 : HD206509(Neb)の偏光度、最大位置角

HD206509 (Neb)
2008/11/5

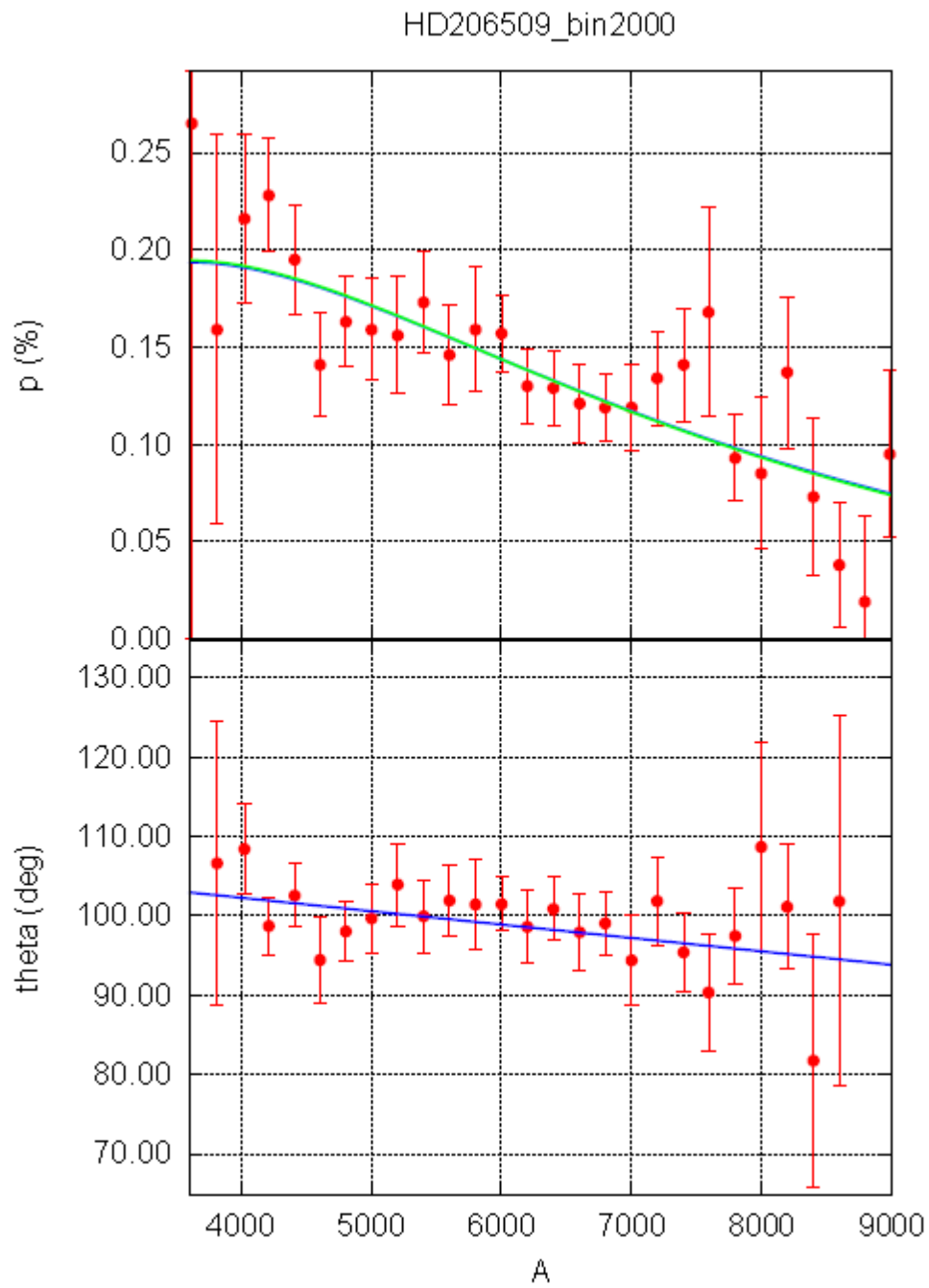


図 25 : HD206509(Neb)の偏光度、最大位置角

HD206823
2008/10/30

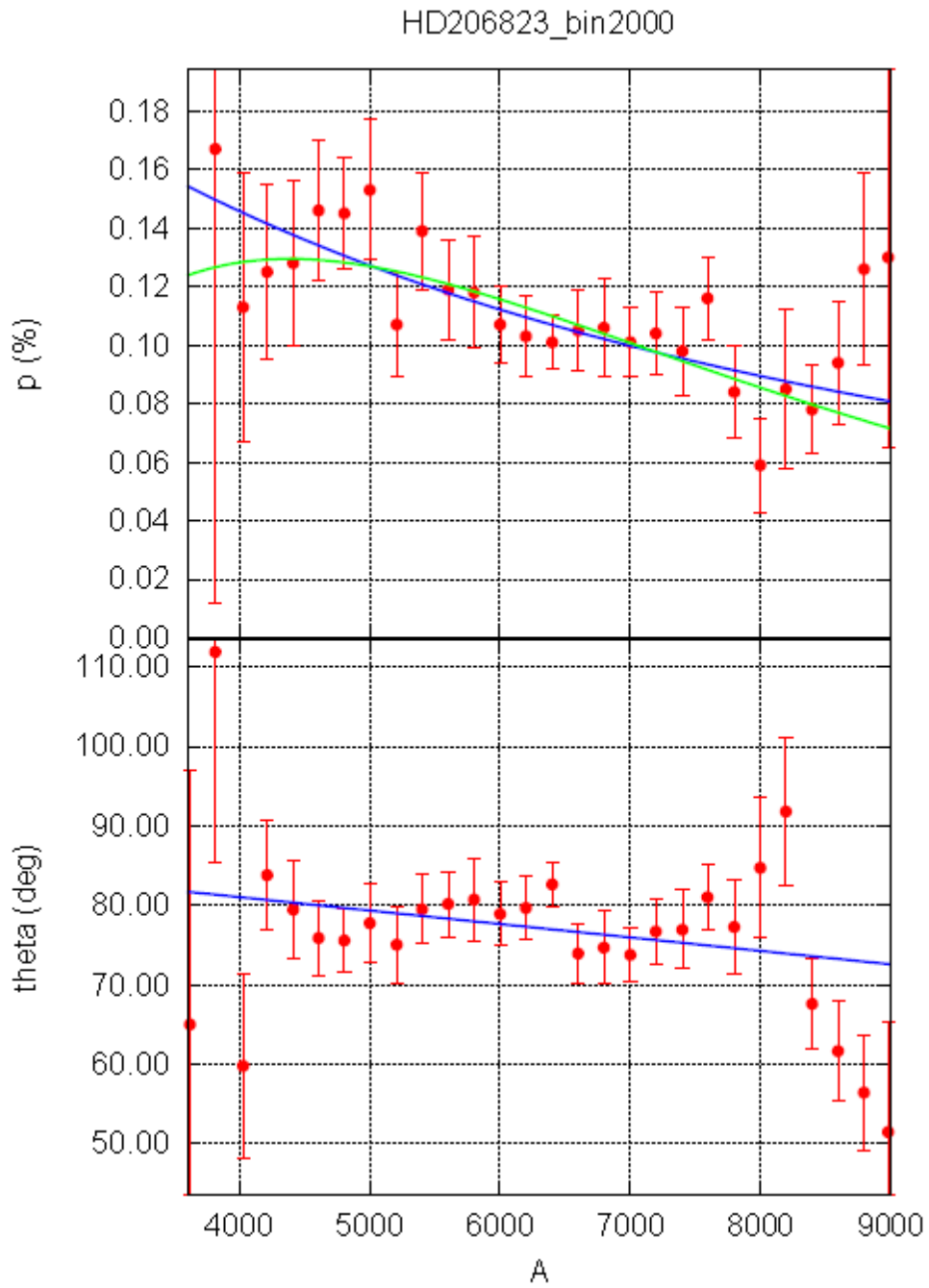


図 26 : HD206832 の偏光度、最大位置角

HD206823
2008/11/5

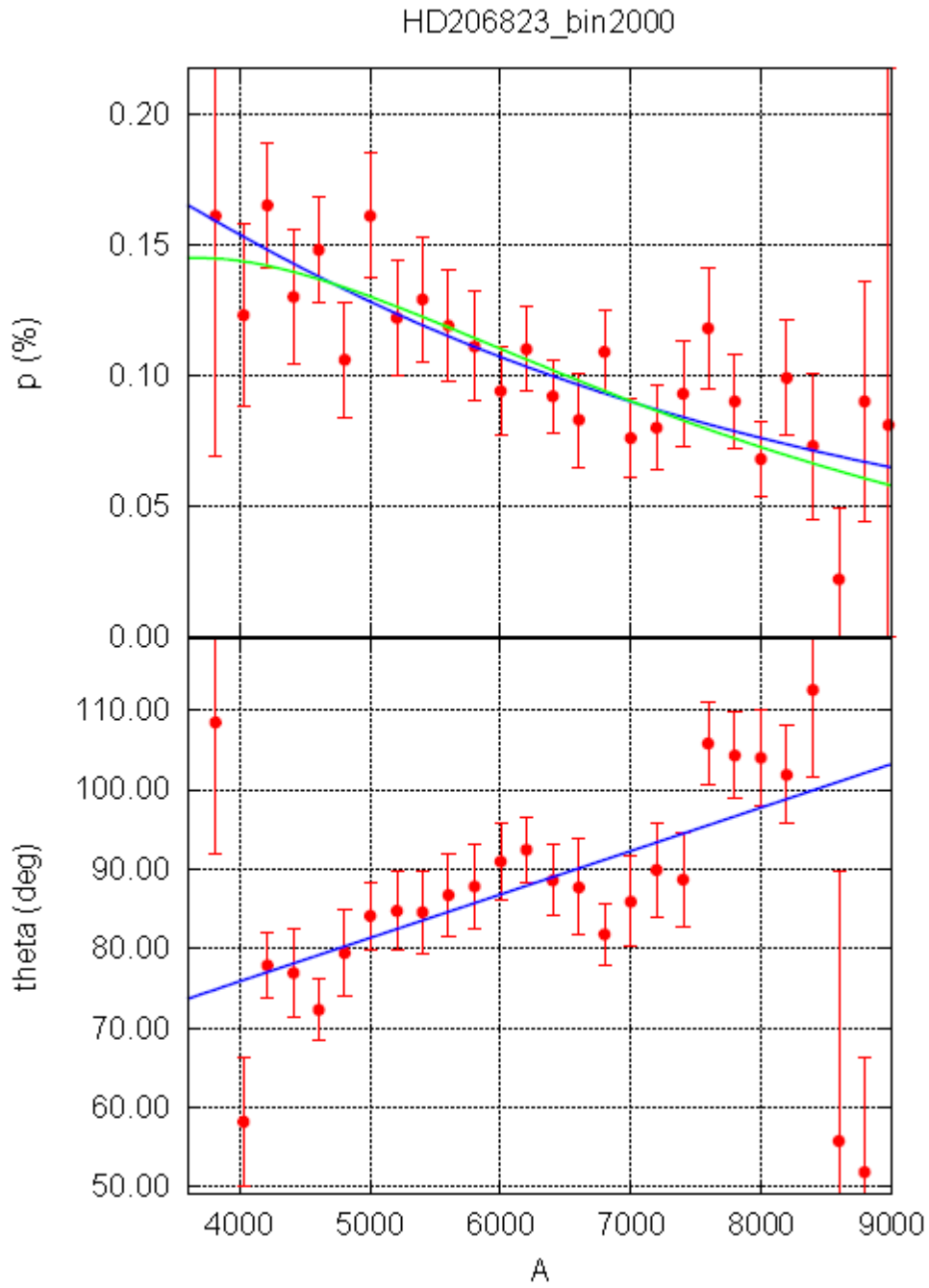


図 27 : HD206823 の偏光度、最大位置角

HD206348
2008/10/30

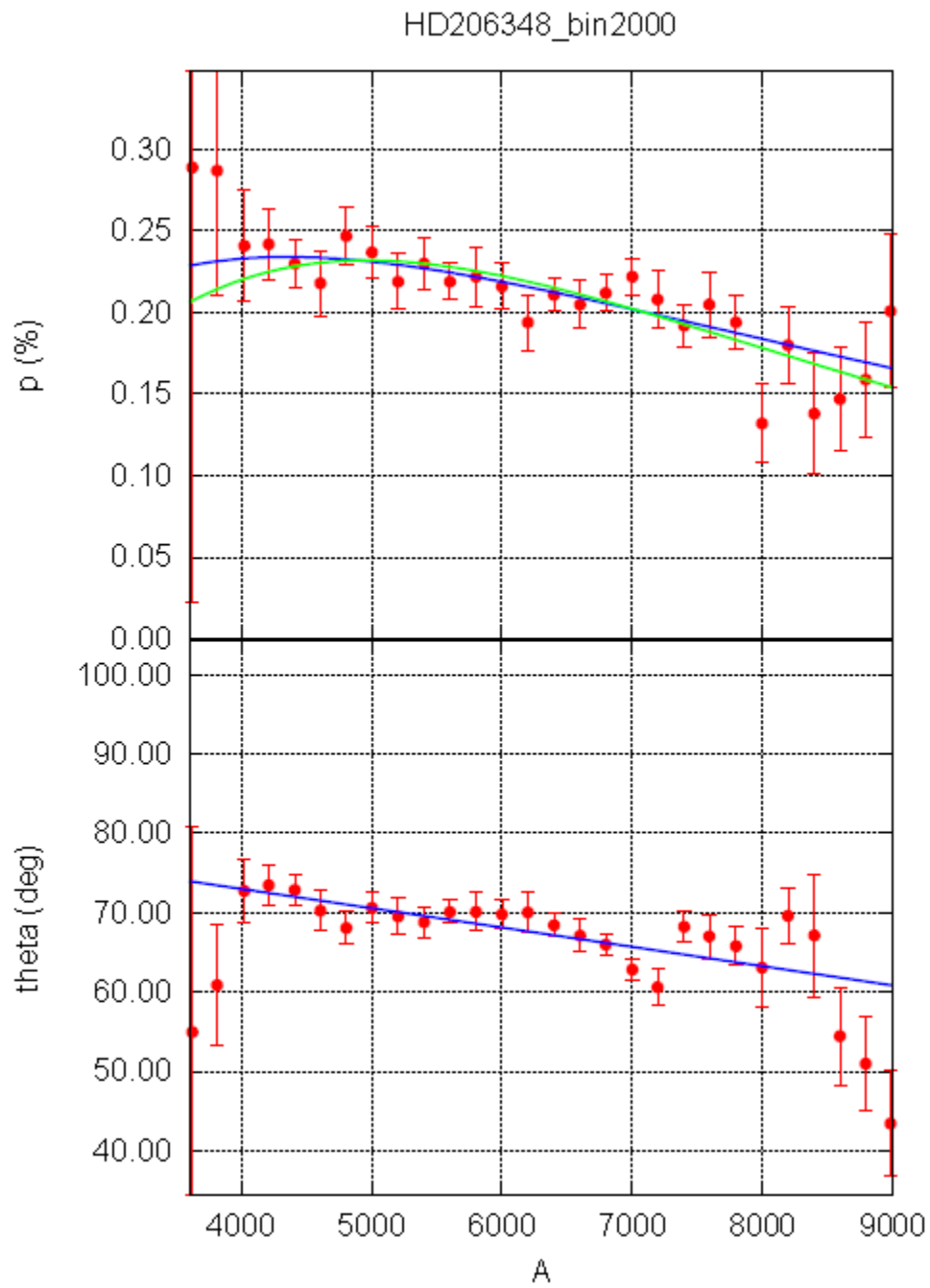


図 28 : HD206348 の偏光度、最大位置角

HD206348
2008/11/5

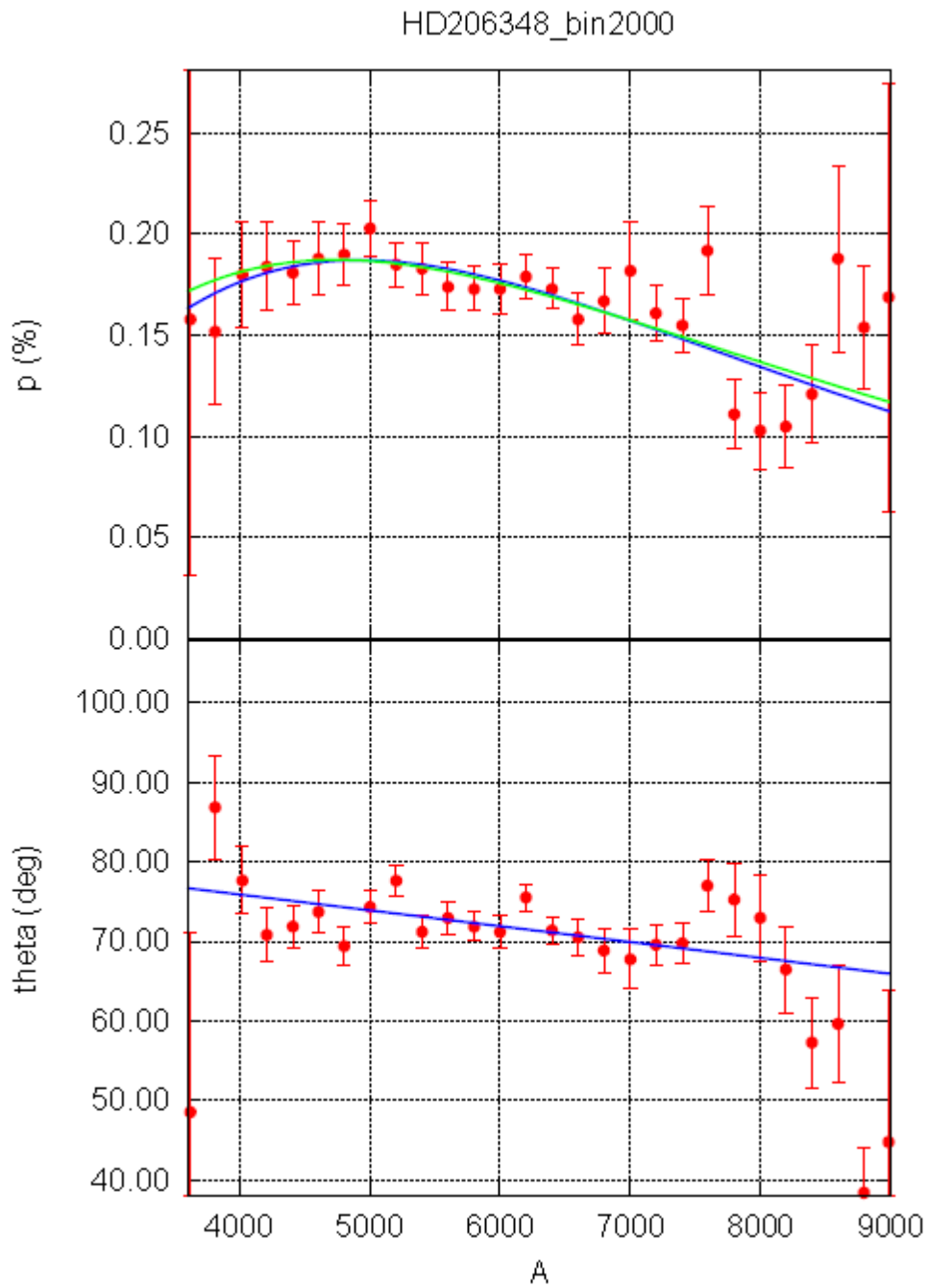


図 29 : HD206348 の偏光度、最大位置角

HD37387 (Neb)
2008/10/31

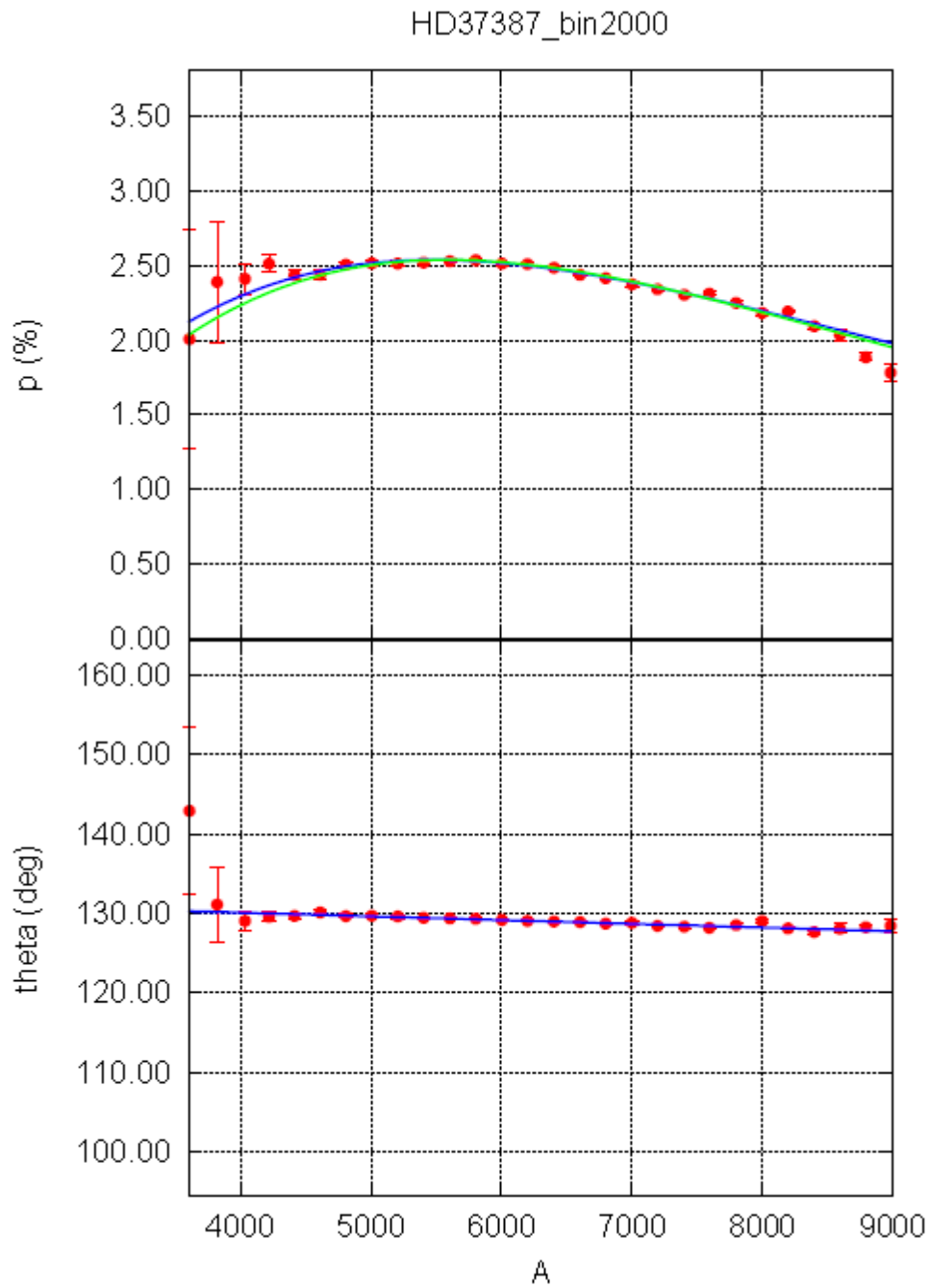


図 30 : HD37387(Neb)の偏光度、最大位置角

HD37387 (Neb)
2008/11/5

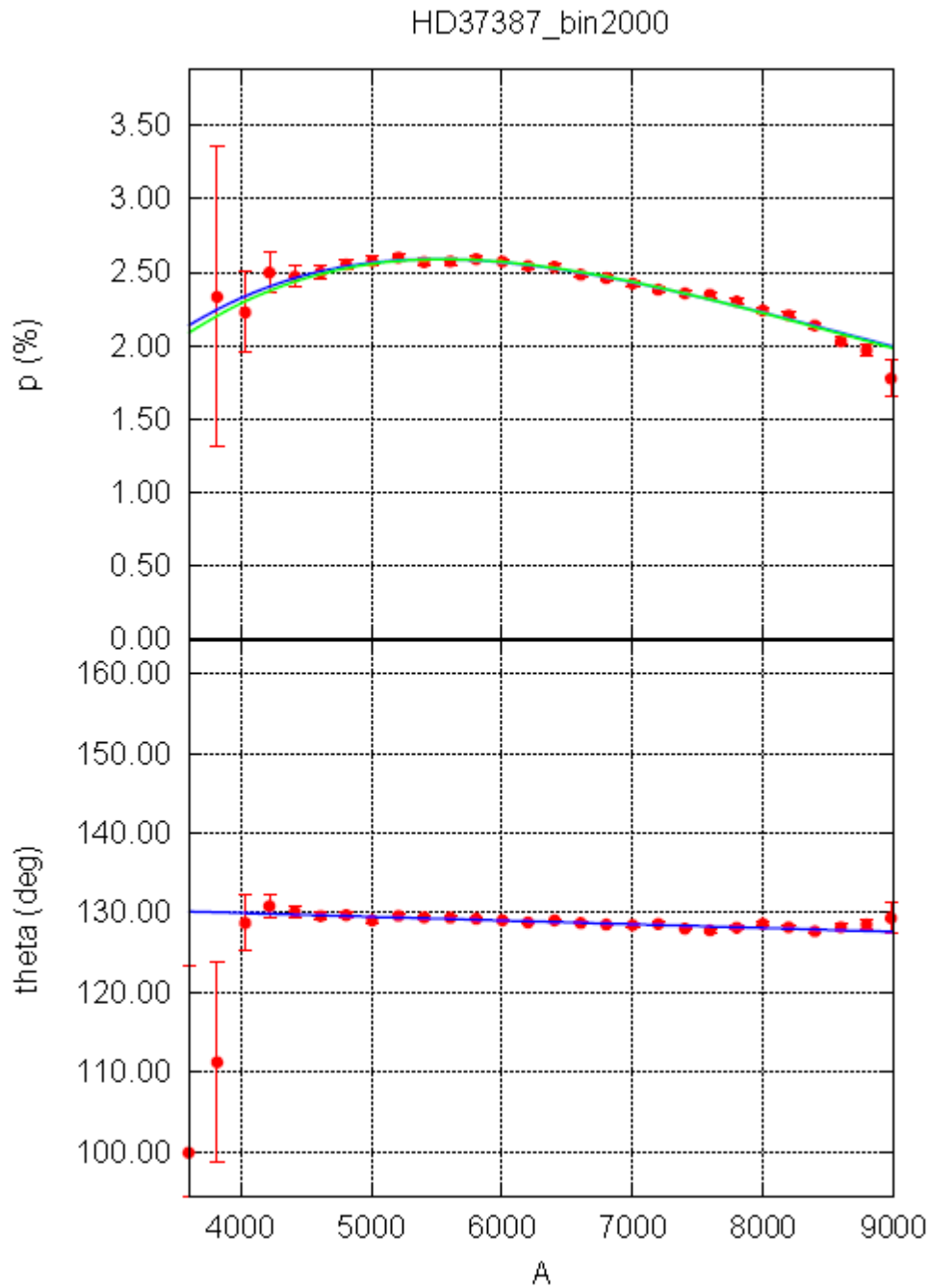


図 31 : HD37387(Neb)の偏光度、最大位置角

HD37387(Neb)

2009/1/13

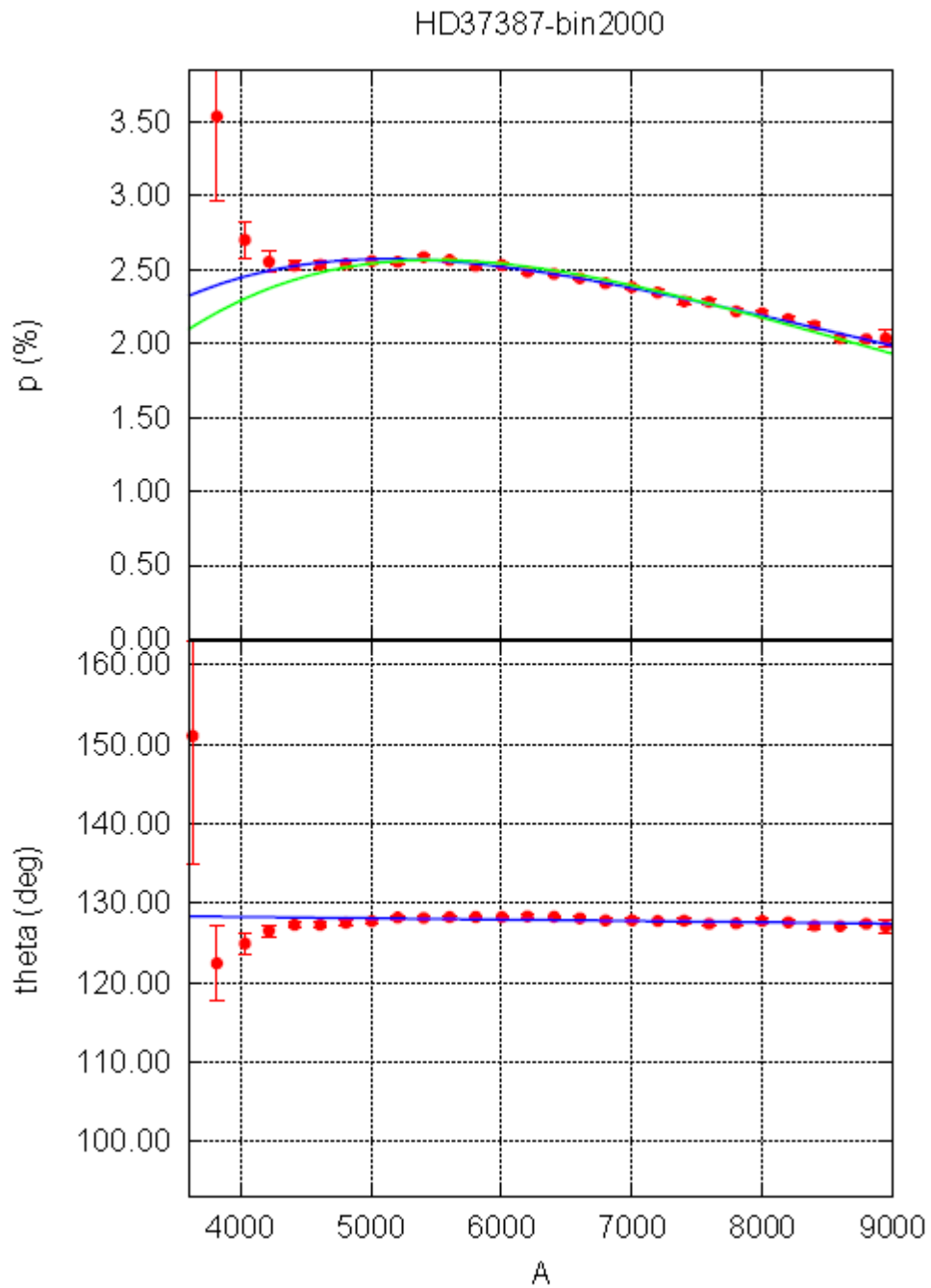


図 32 : HD37387(Neb)の偏光度、最大位置角

HD37769
2008/11/11

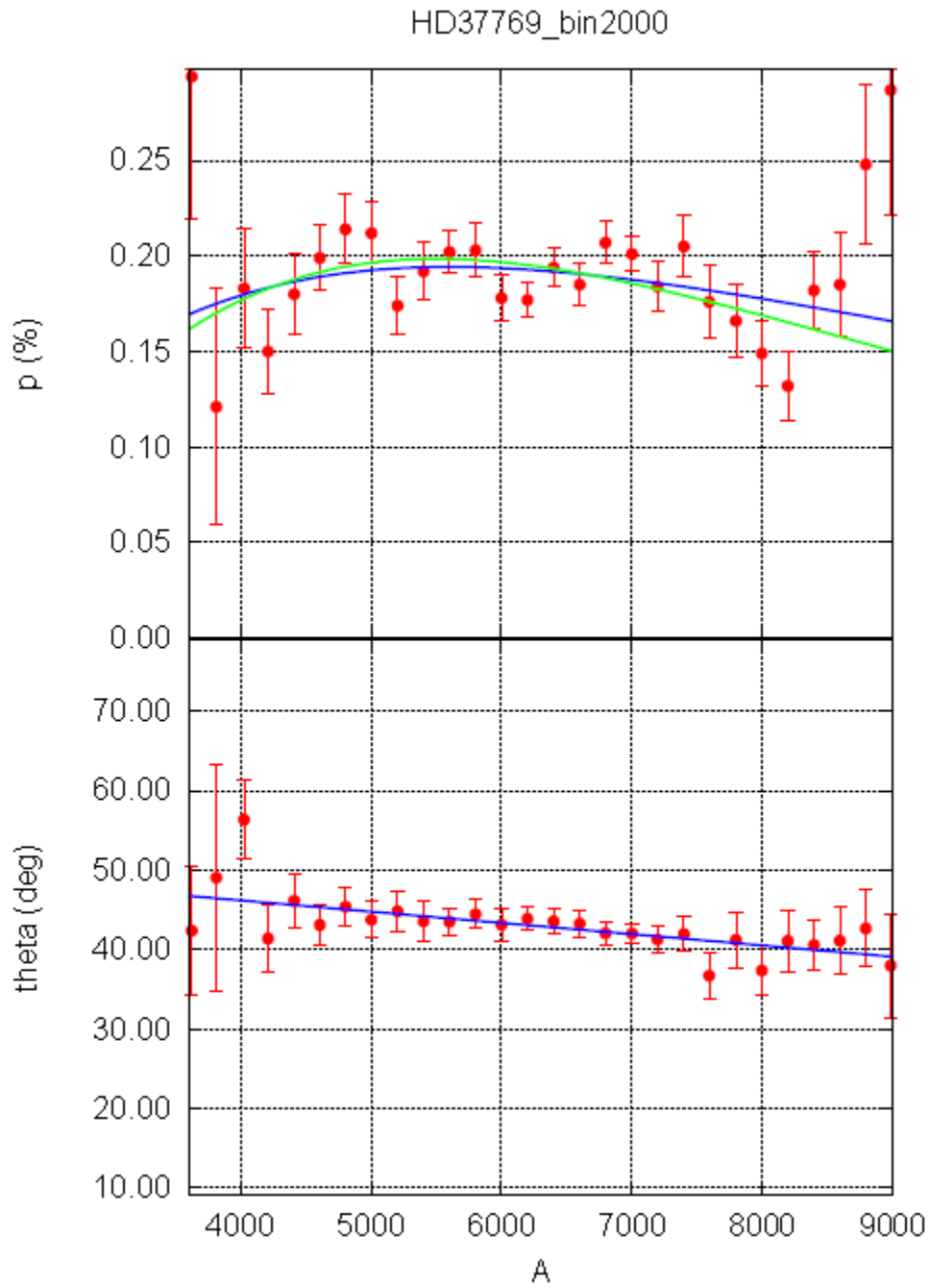


図 33 : HD37769 の偏光度、最大位置角

HD245547
2008/11/11

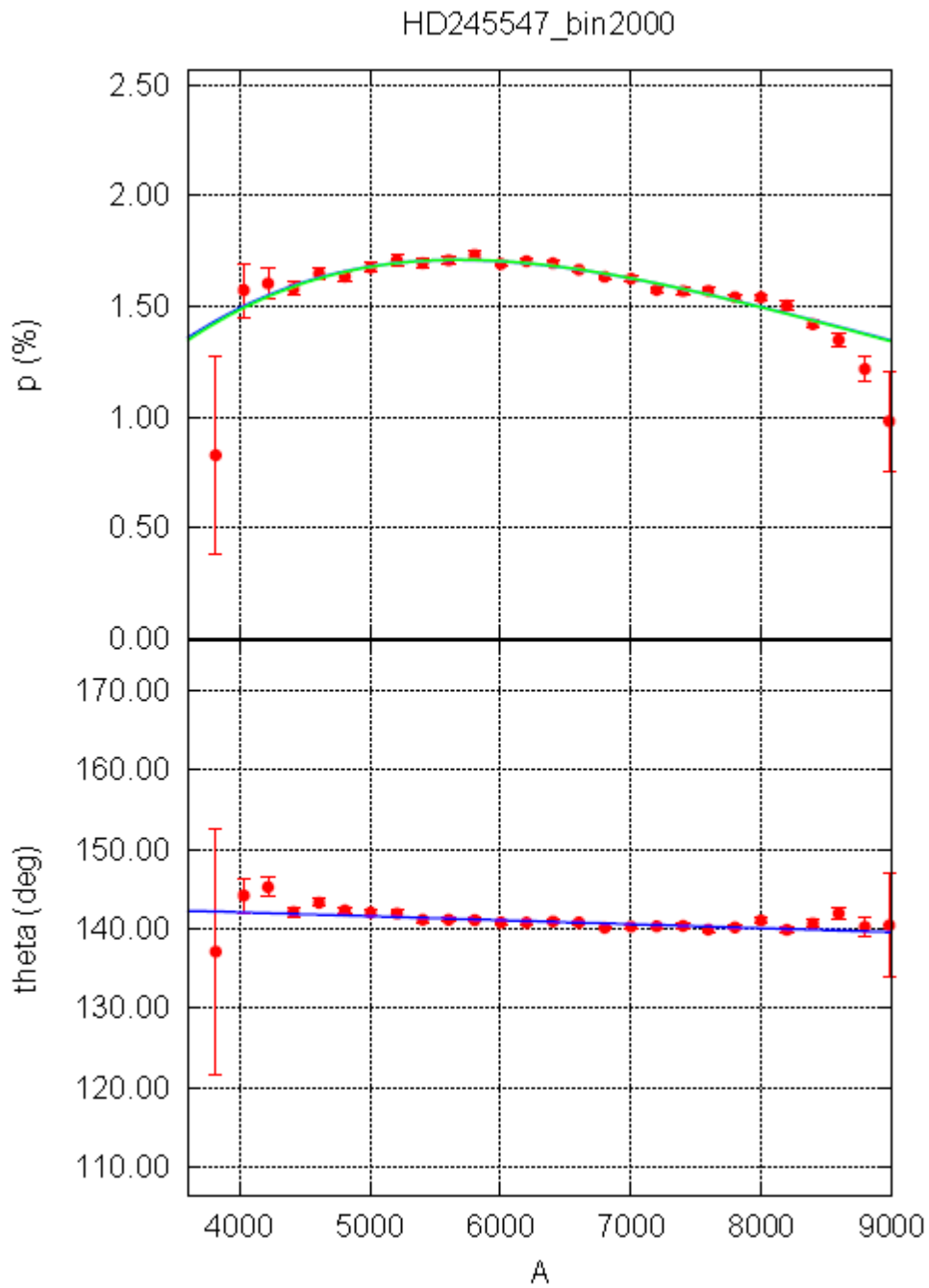


図 34 : HD245547 の偏光度、最大位置角

HD245547
2008/11/12

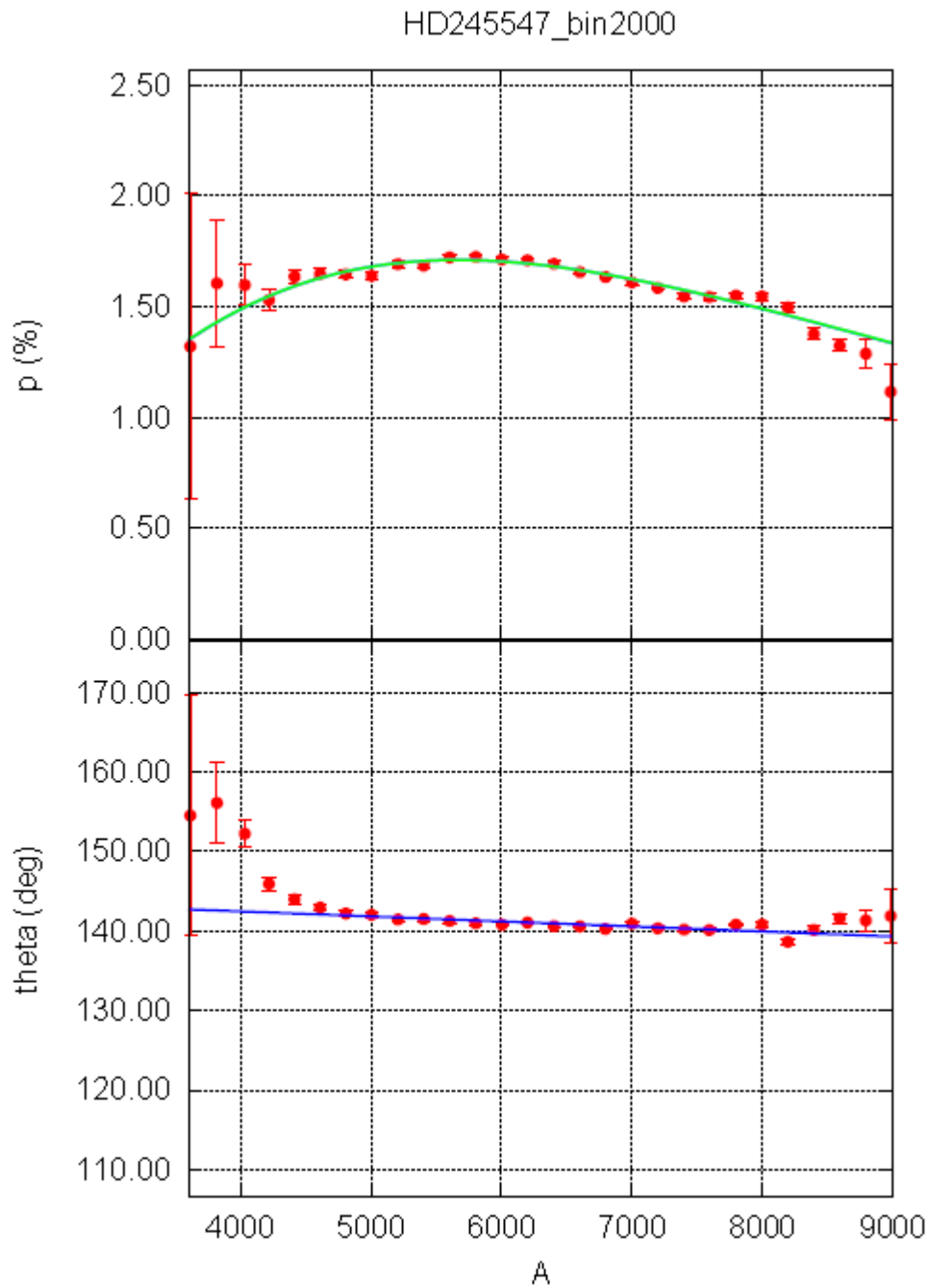


図 35 : HD245547 の偏光度、最大位置角

HD 39498
2008/11/13

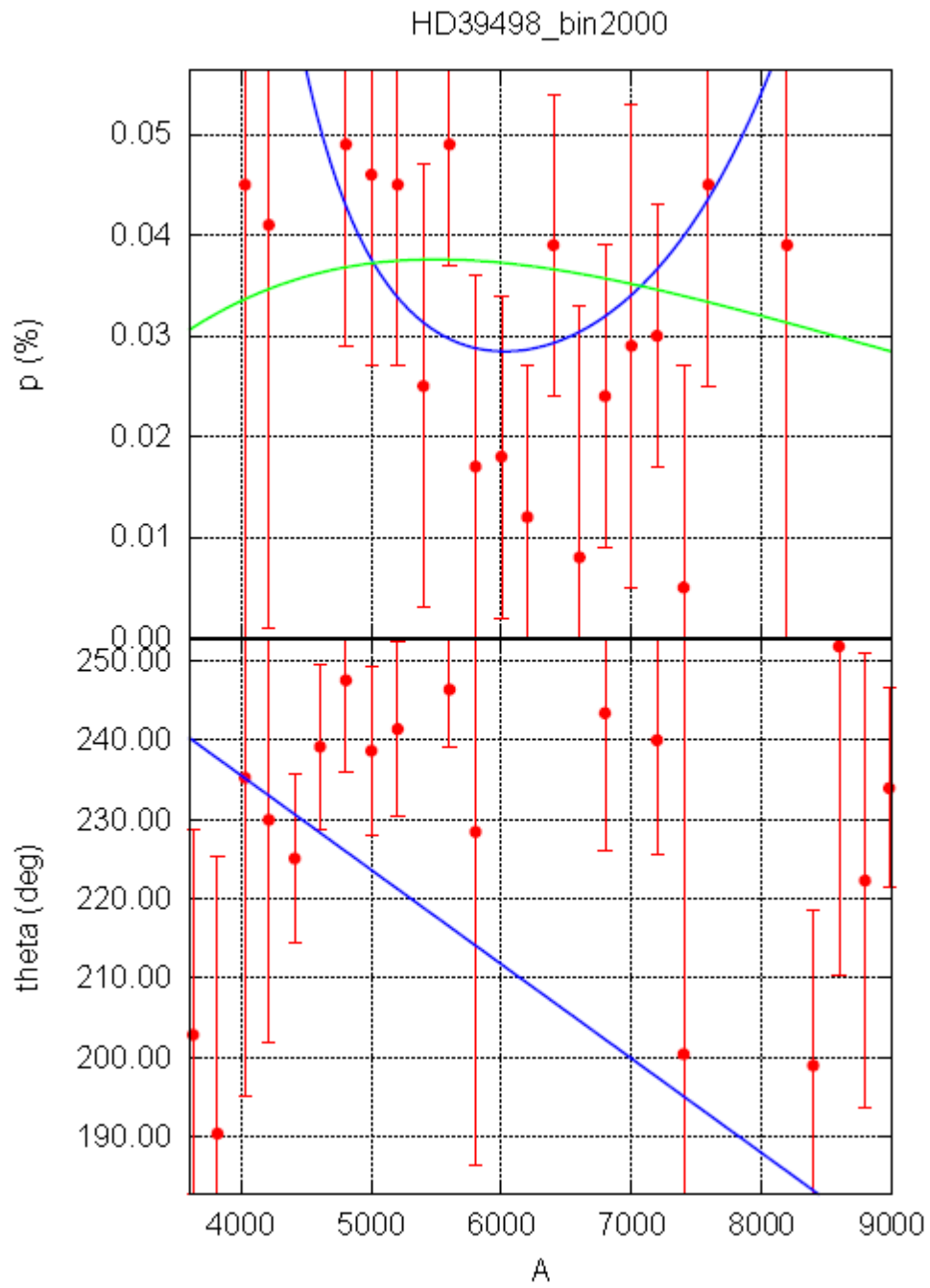


図 36 : HD39498 の偏光度、最大位置角

HD23850 (27Tau)
2008/10/30

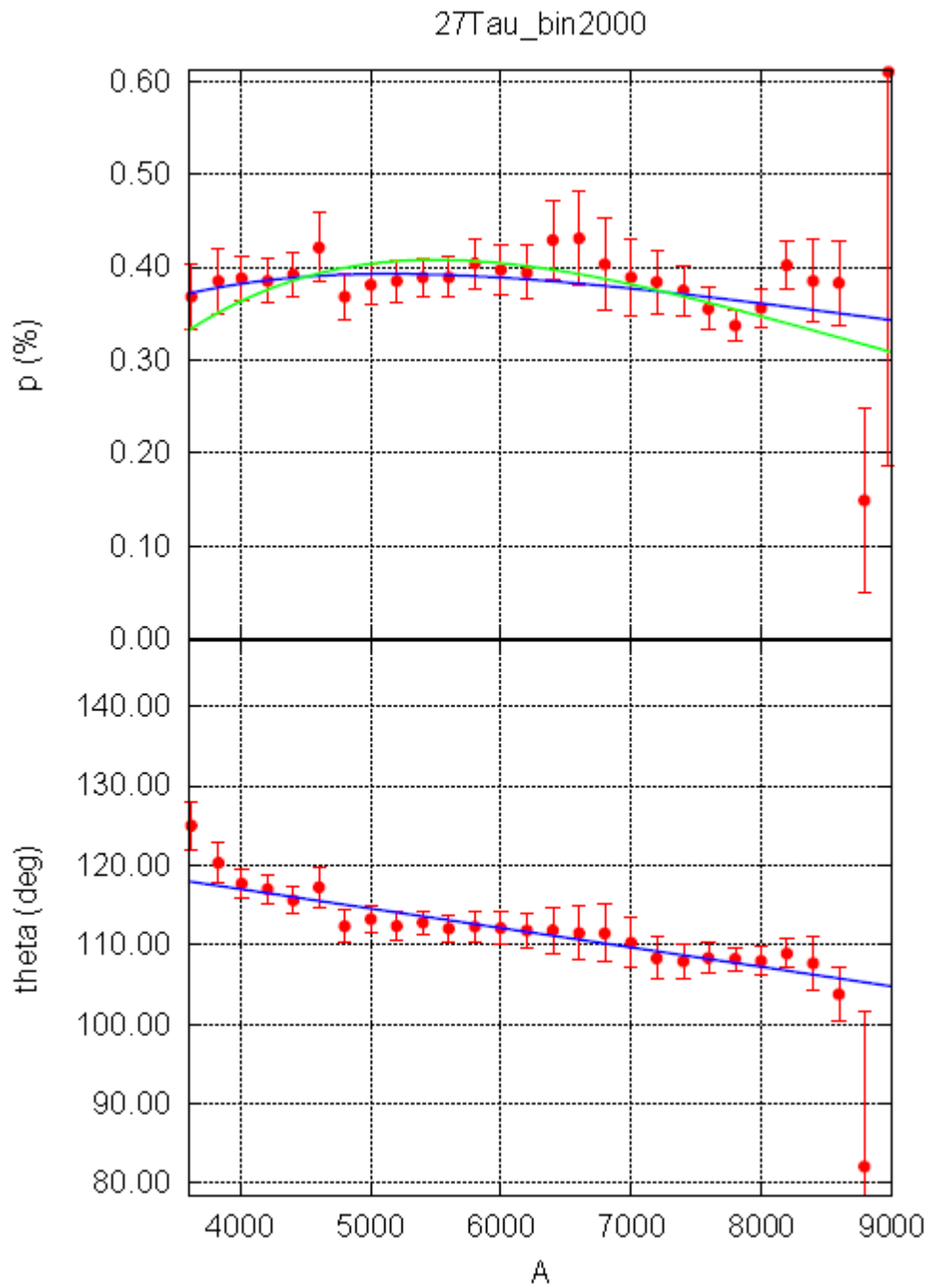


図 37 : HD23850 (27Tau)の偏光度、最大位置角

HD23850 (27Tau)
2008/10/31

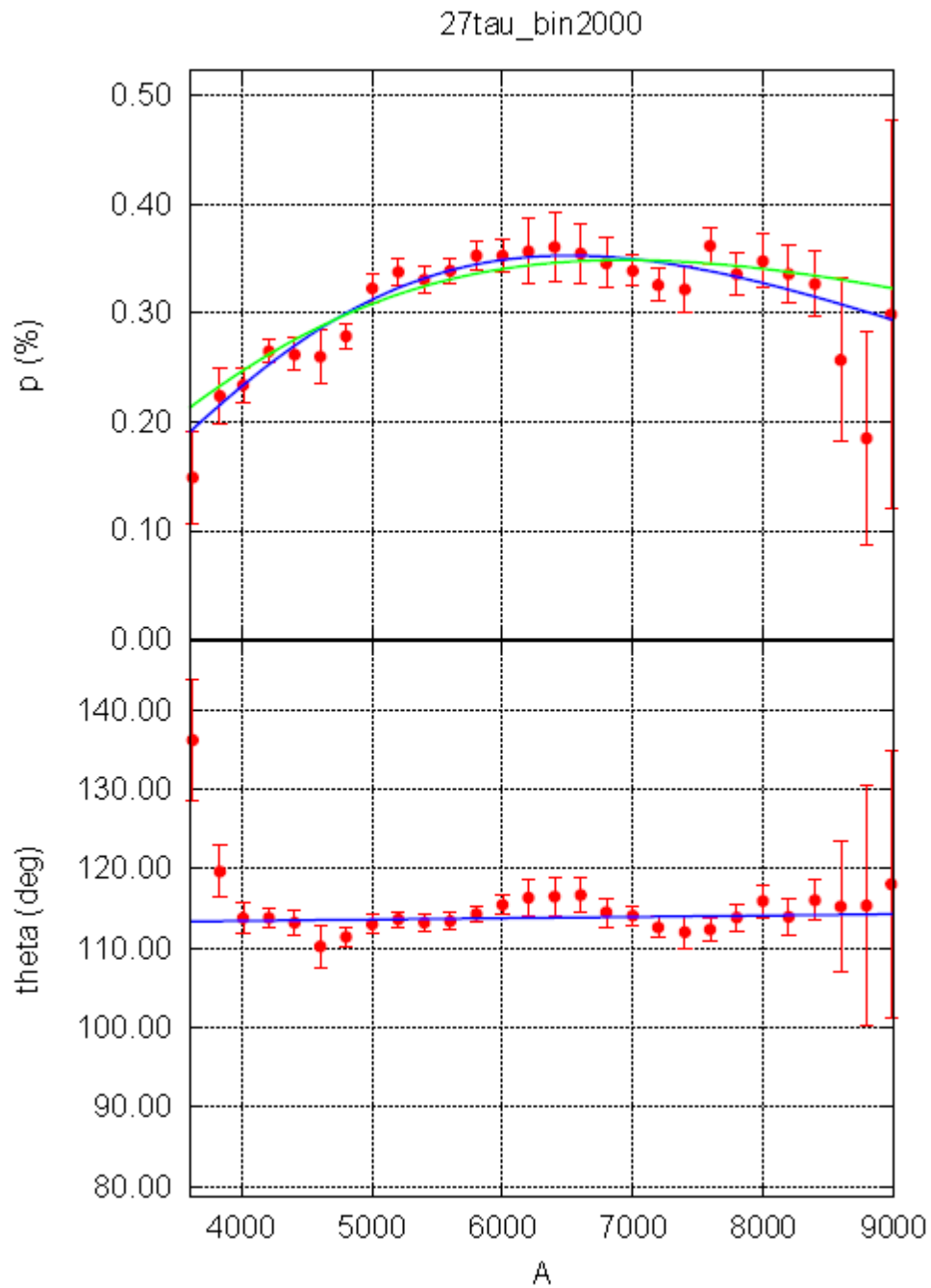


図 38 : HD23850 (27Tau)の偏光度、最大位置角

HD23850 (27Tau)

2008/11/5

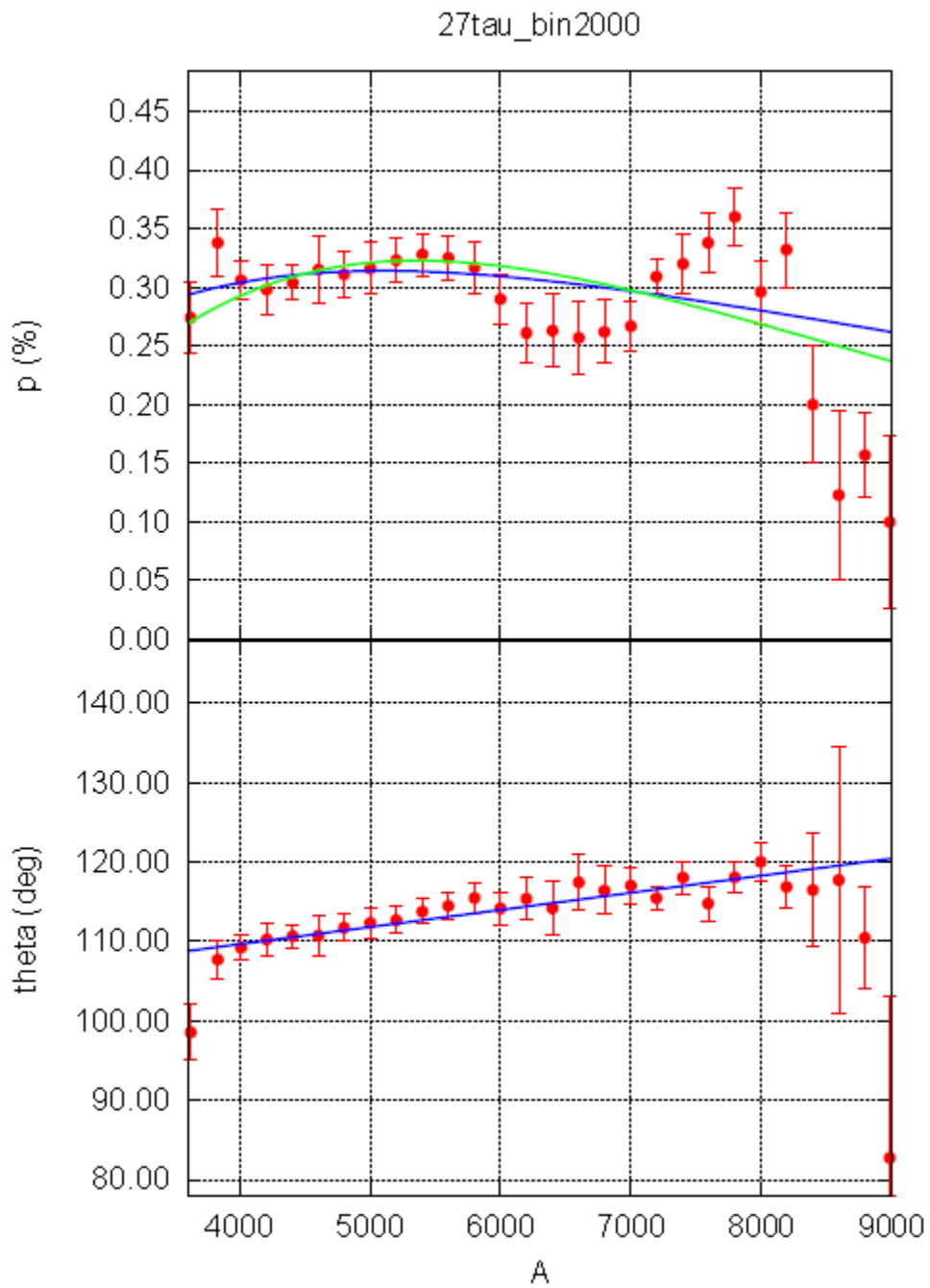


図 39 : HD23850 (27Tau)の偏光度、最大位置角

HD23480 (23Tau)

2008/10/30

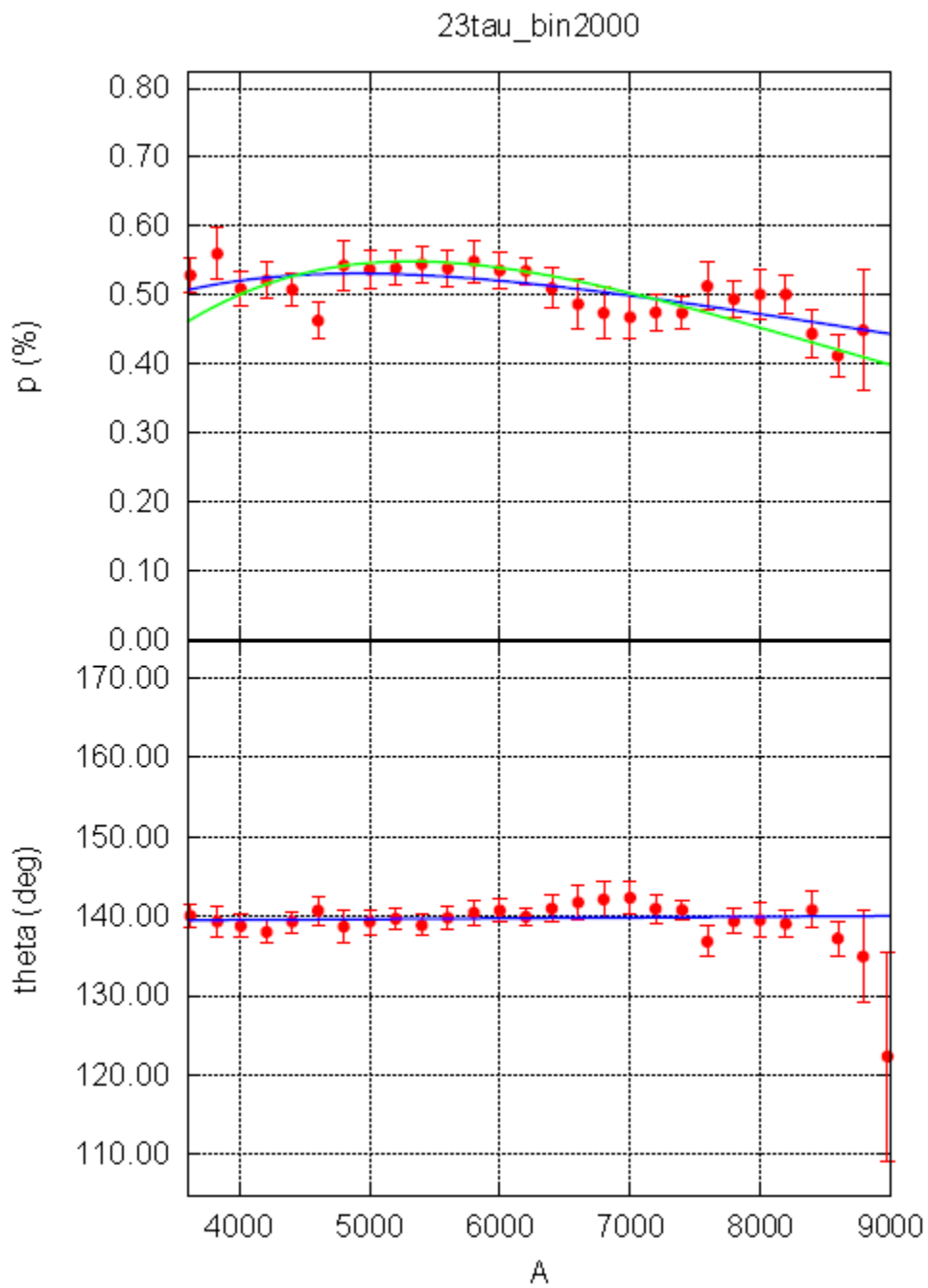


図 40 : HD23480 (23Tau)の偏光度、最大位置角

HD23480 (23Tau)
2008/11/5

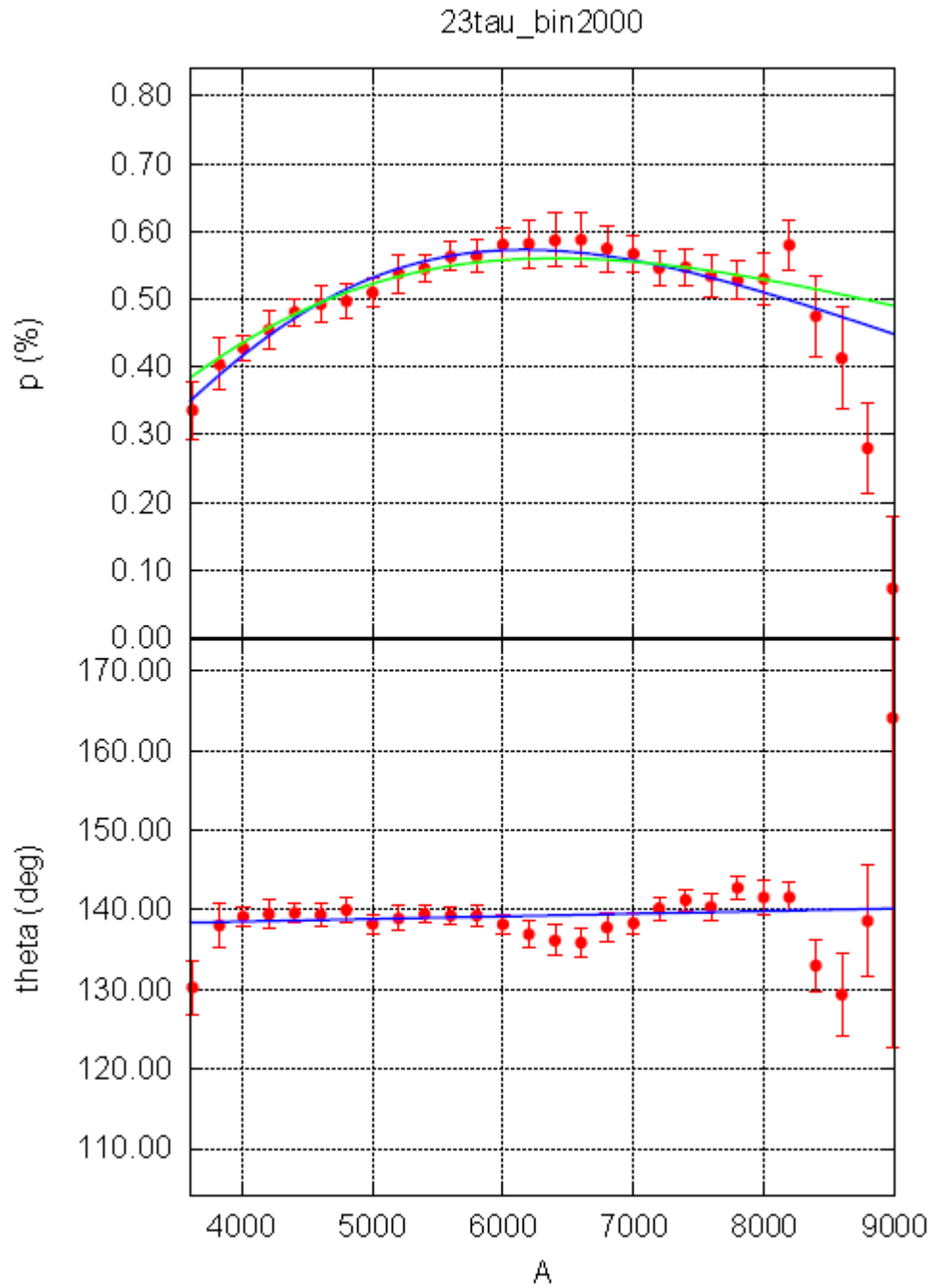


図 41 : HD23480 (23Tau)の偏光度、最大位置角

HD23338 (19Tau)

2008/10/30

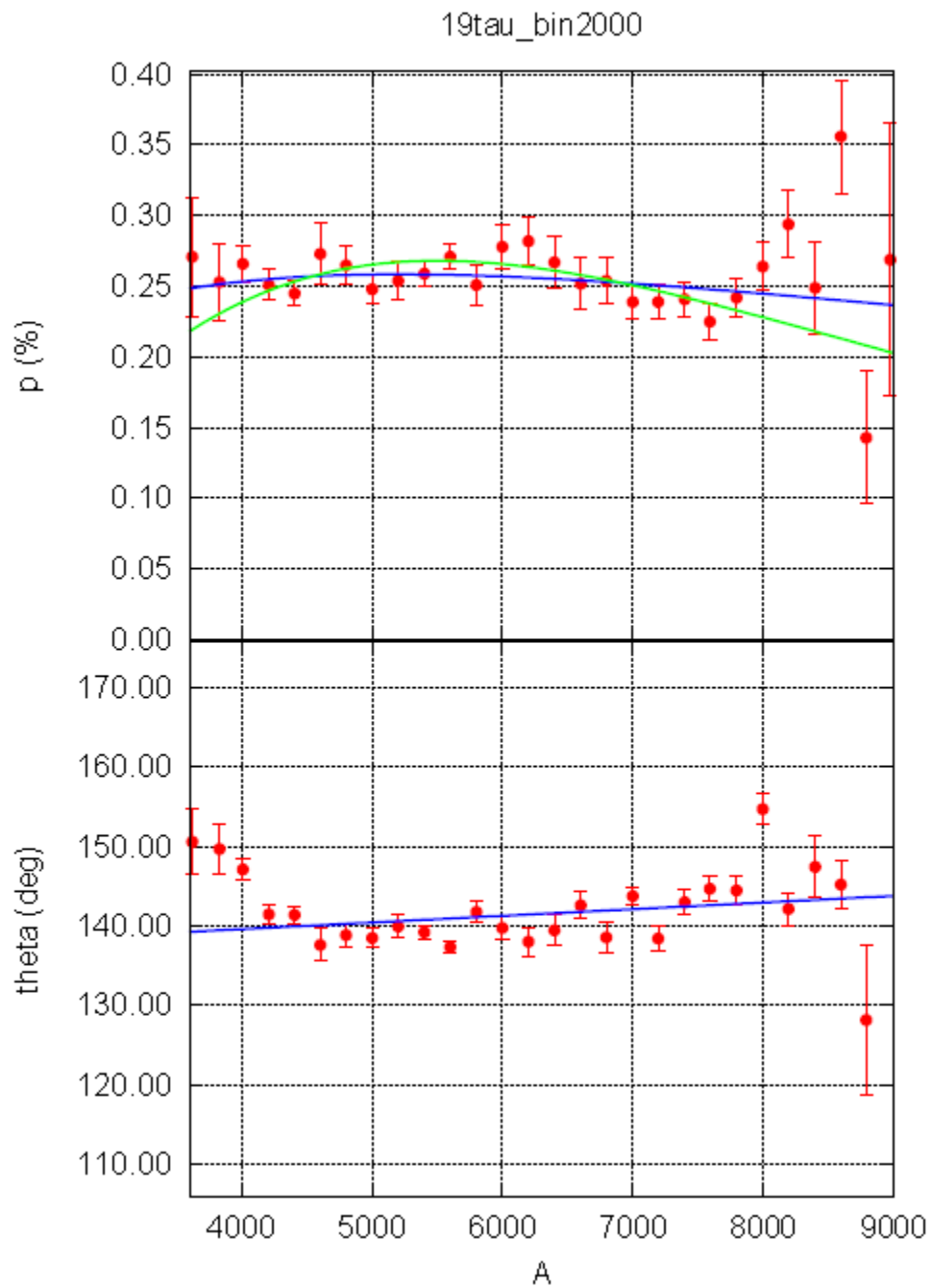


図 42 : HD23338(19Tau)の偏光度、最大位置角

HD23338 (19Tau)

2008/11/5

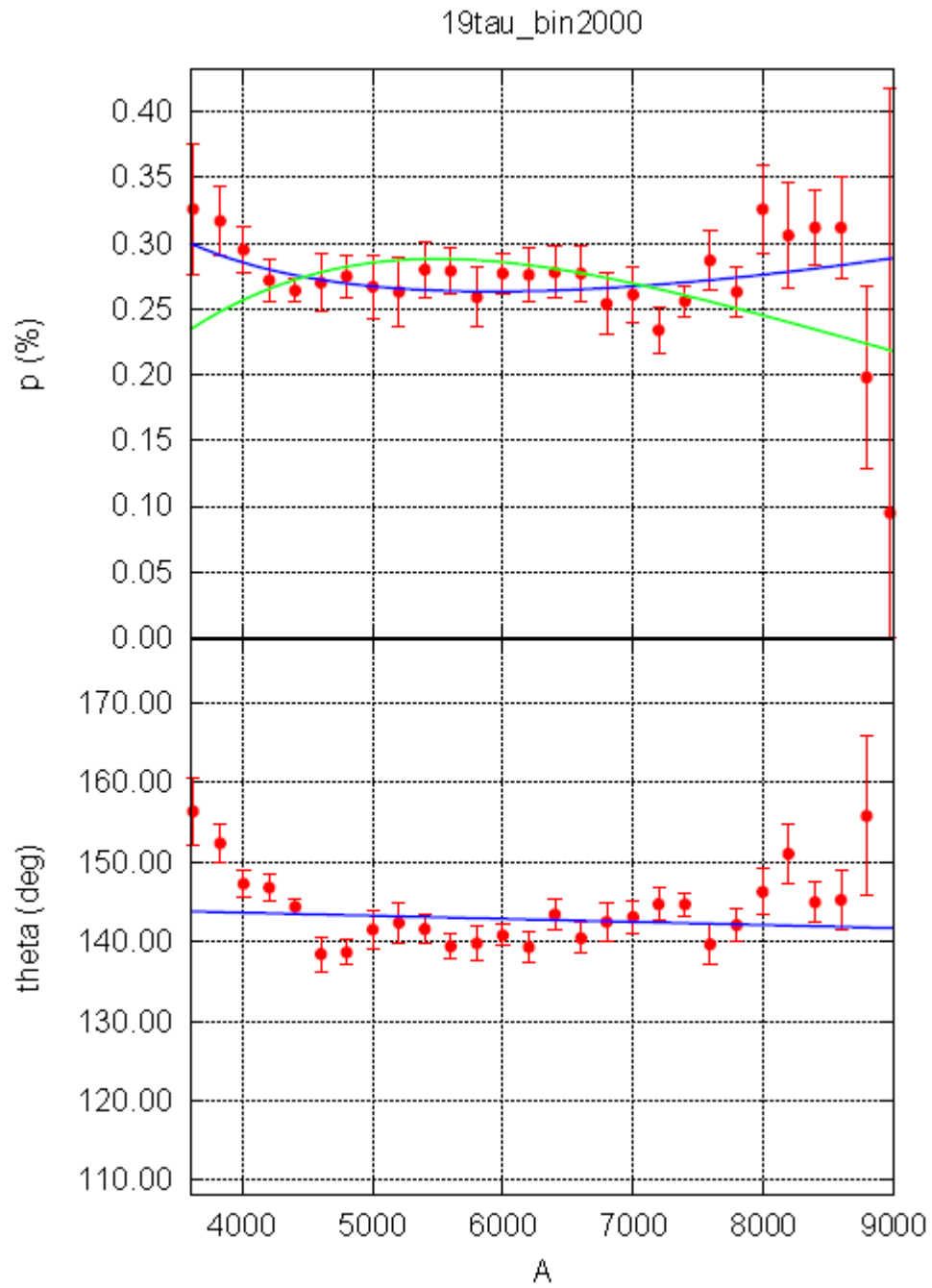


図 43 : HD23338(19Tau)の偏光度、最大位置角

HD 23753
2008/10/30

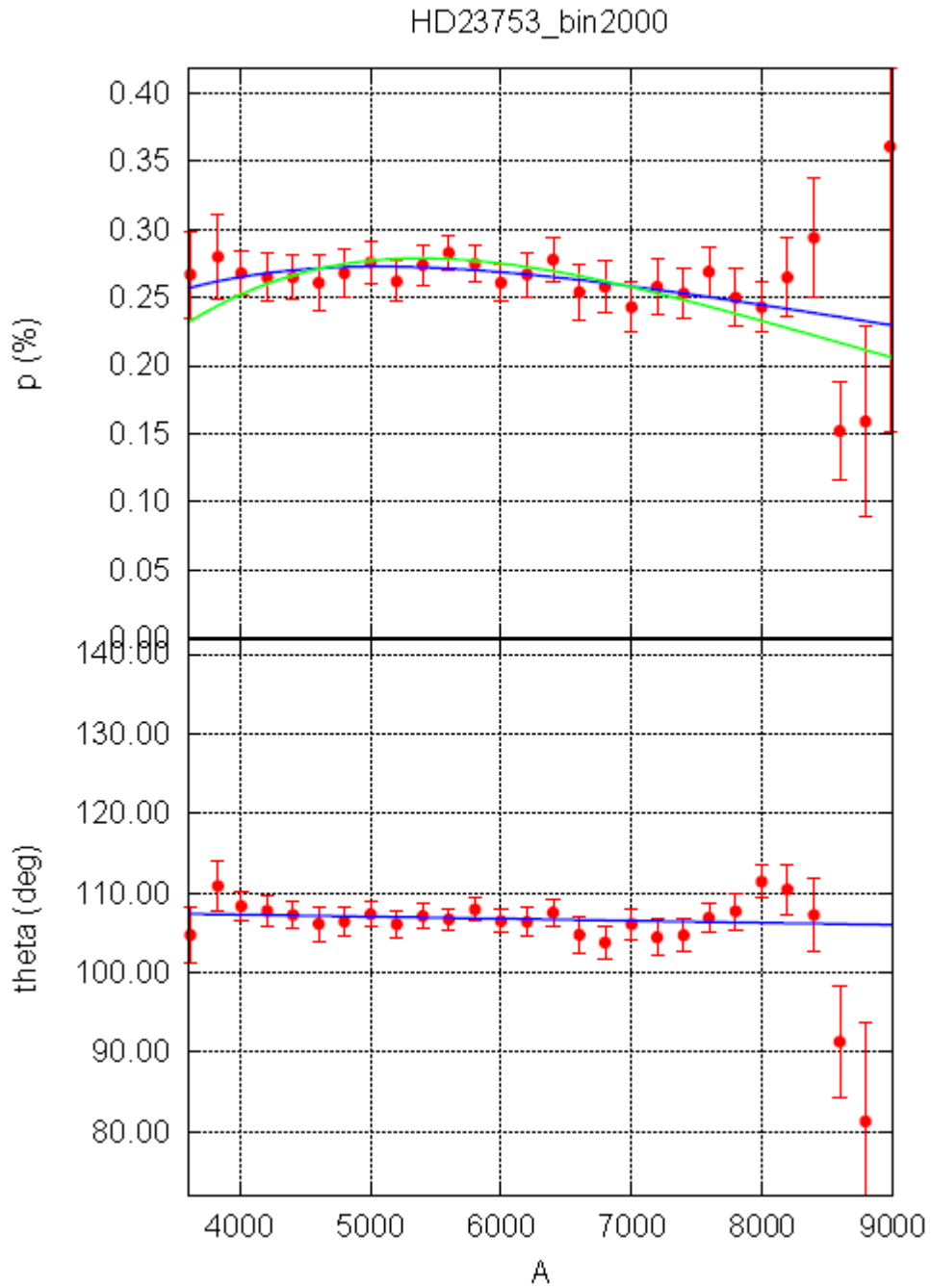


図 44 : HD23753 の偏光度、最大位置角

HD23753
2008/11/5

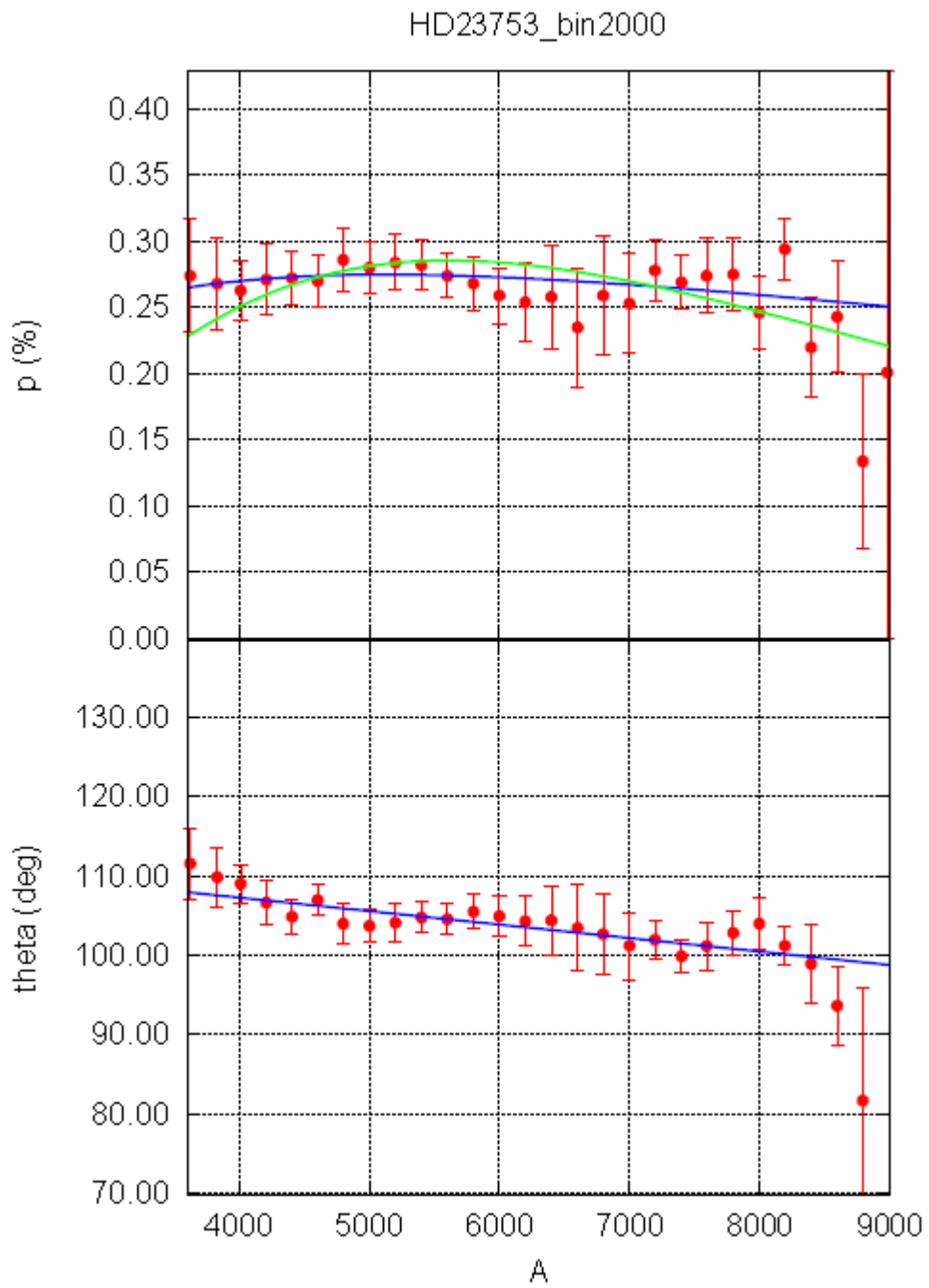


図 45 : HD23753 の偏光度、最大位置角

HD 24118
2008/10/30

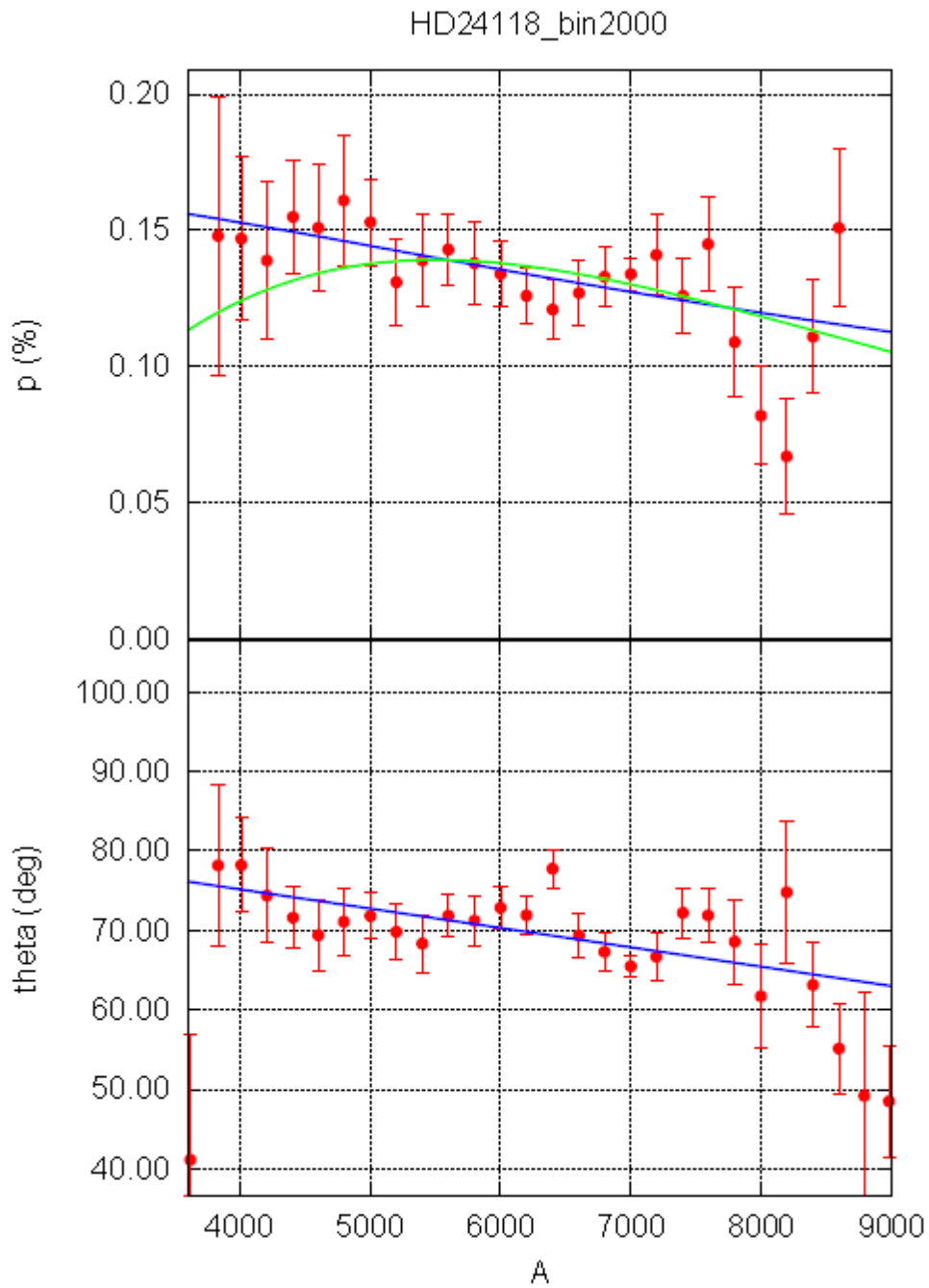


図 46 : HD24118 の偏光度、最大位置角

HD24118
2008/11/5

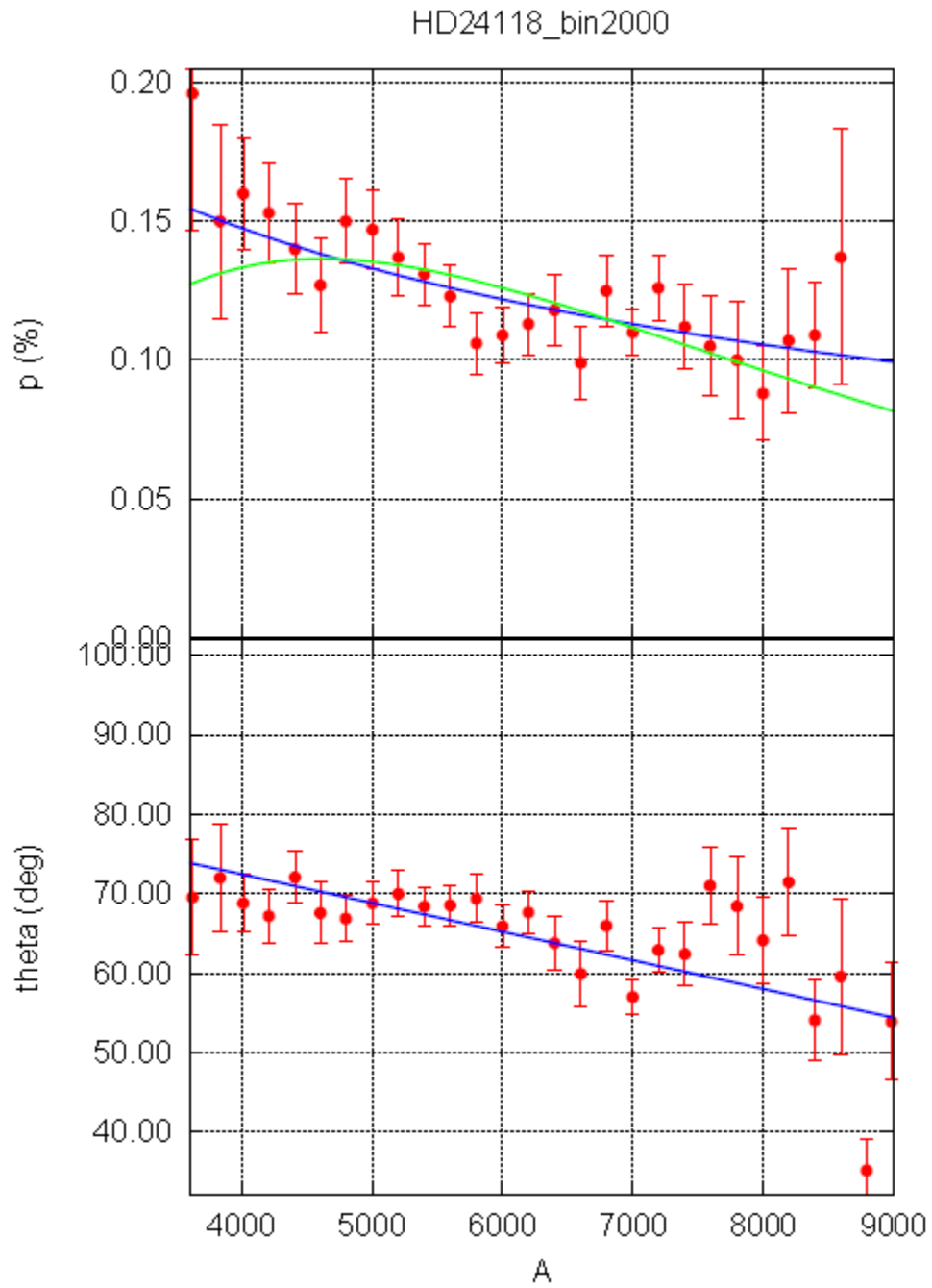


図 47 : HD24118 の偏光度、最大位置角

HD24118
2009/1/13

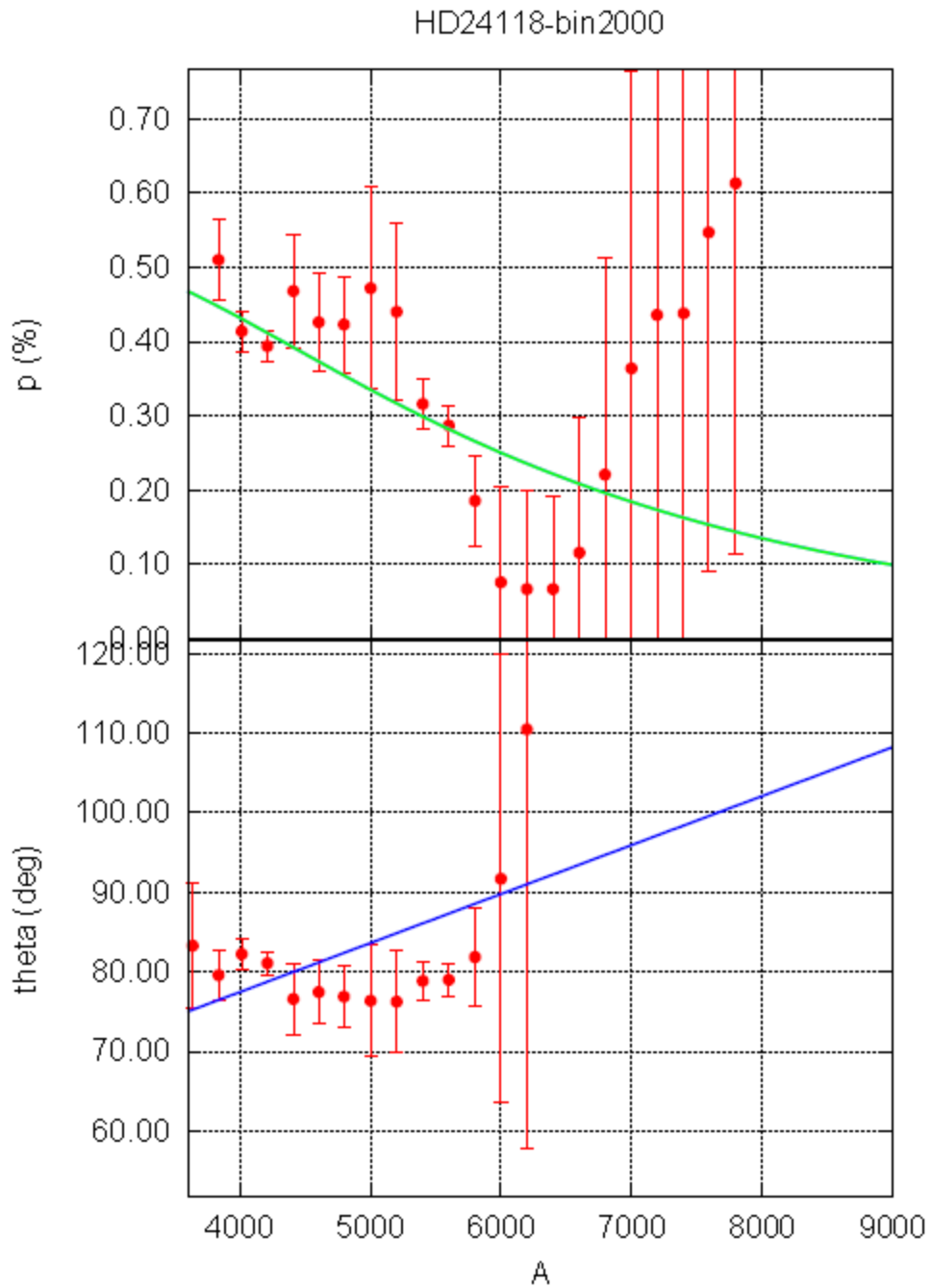


図 48-1 : HD24118 の偏光度、最大位置角
(2009 年 1 月の較正データを使って解析した結果)

HD24118
2009/1/13

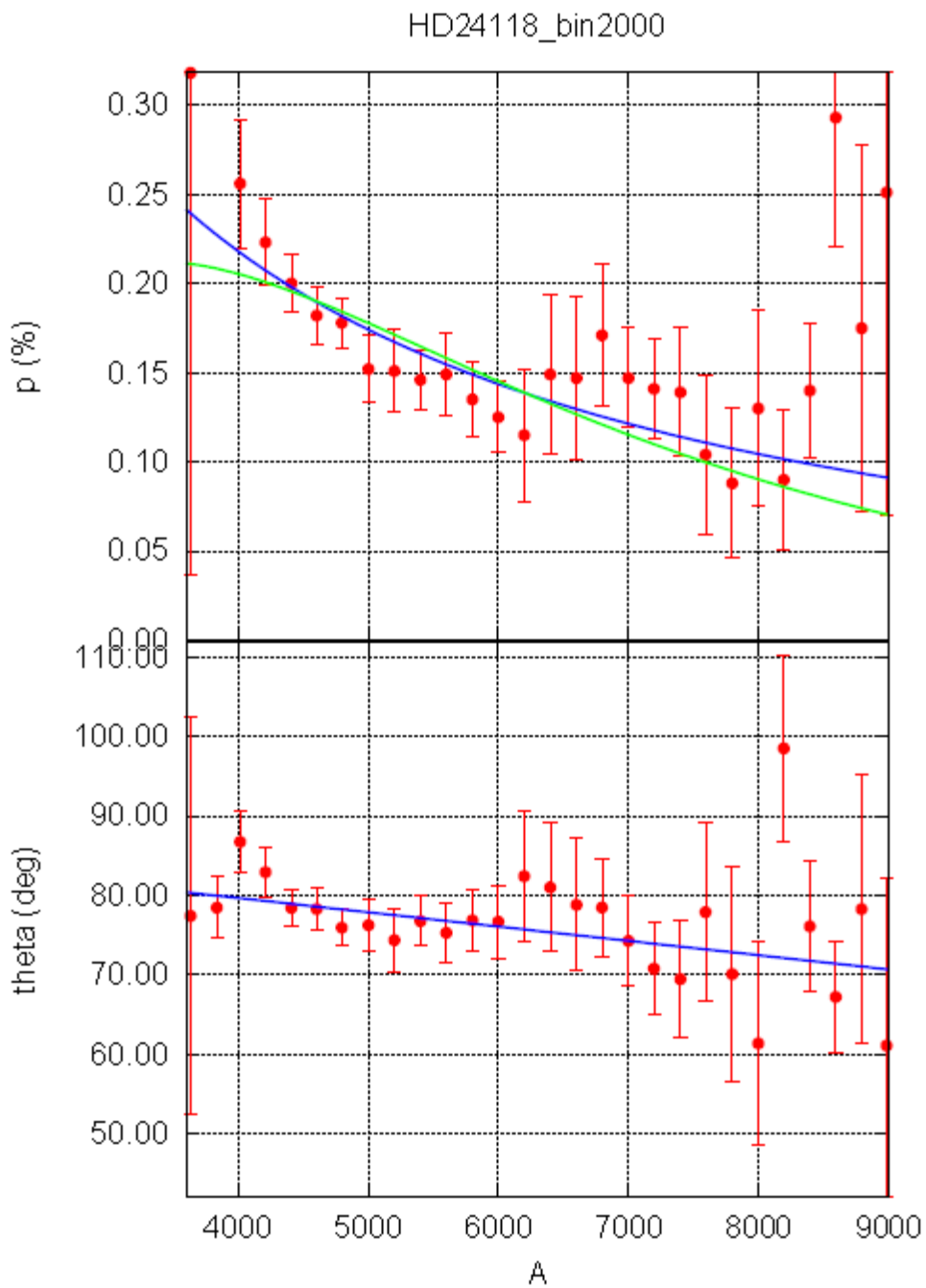


図 48-2 : HD24118 の偏光度、最大位置角
(2008 年 10 月・11 月の較正データを使って解析した結果)

HD24368
2008/11/5

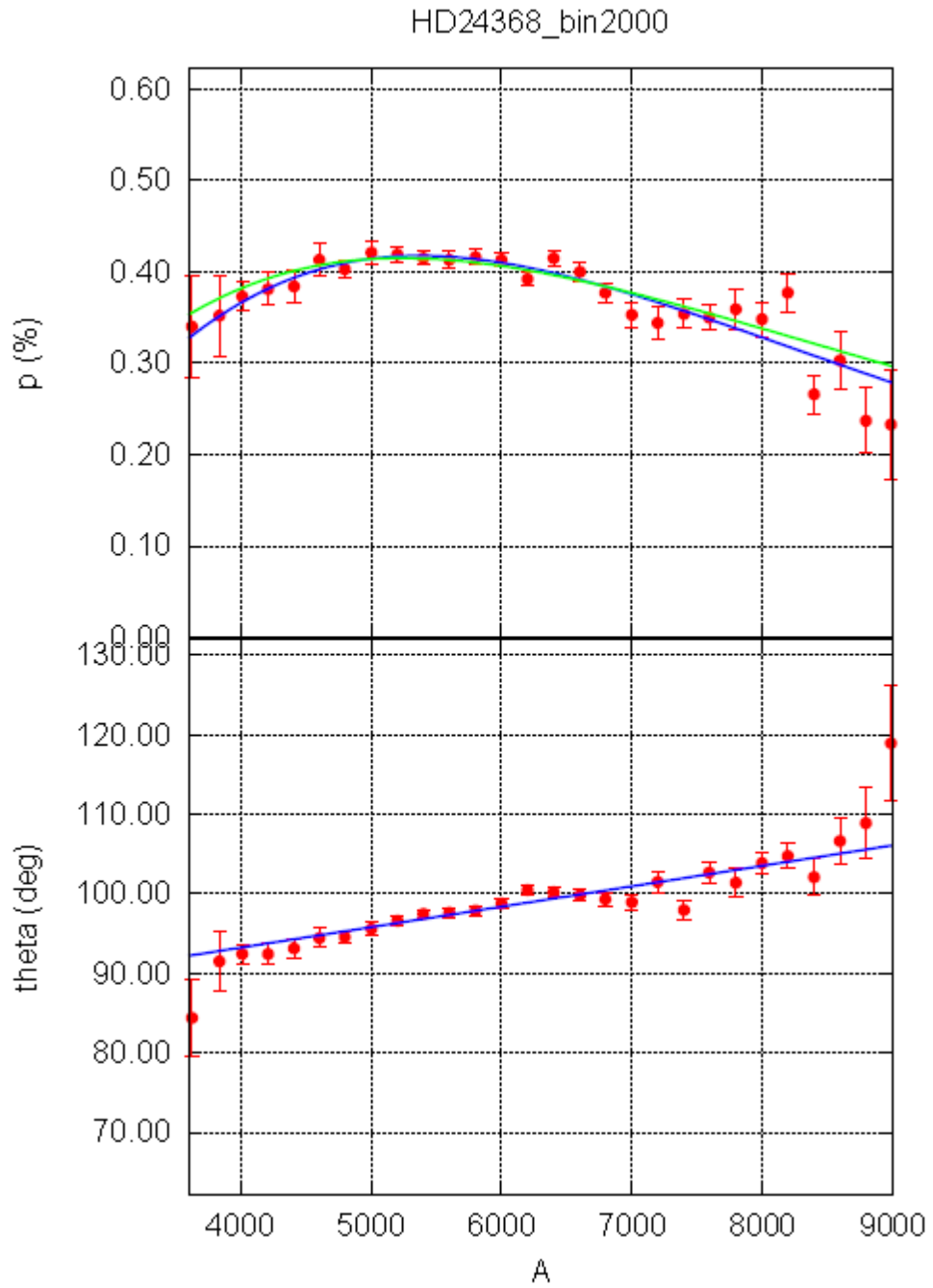


図 49 : HD24368 の偏光度、最大位置角

HD24368
2009/1/16

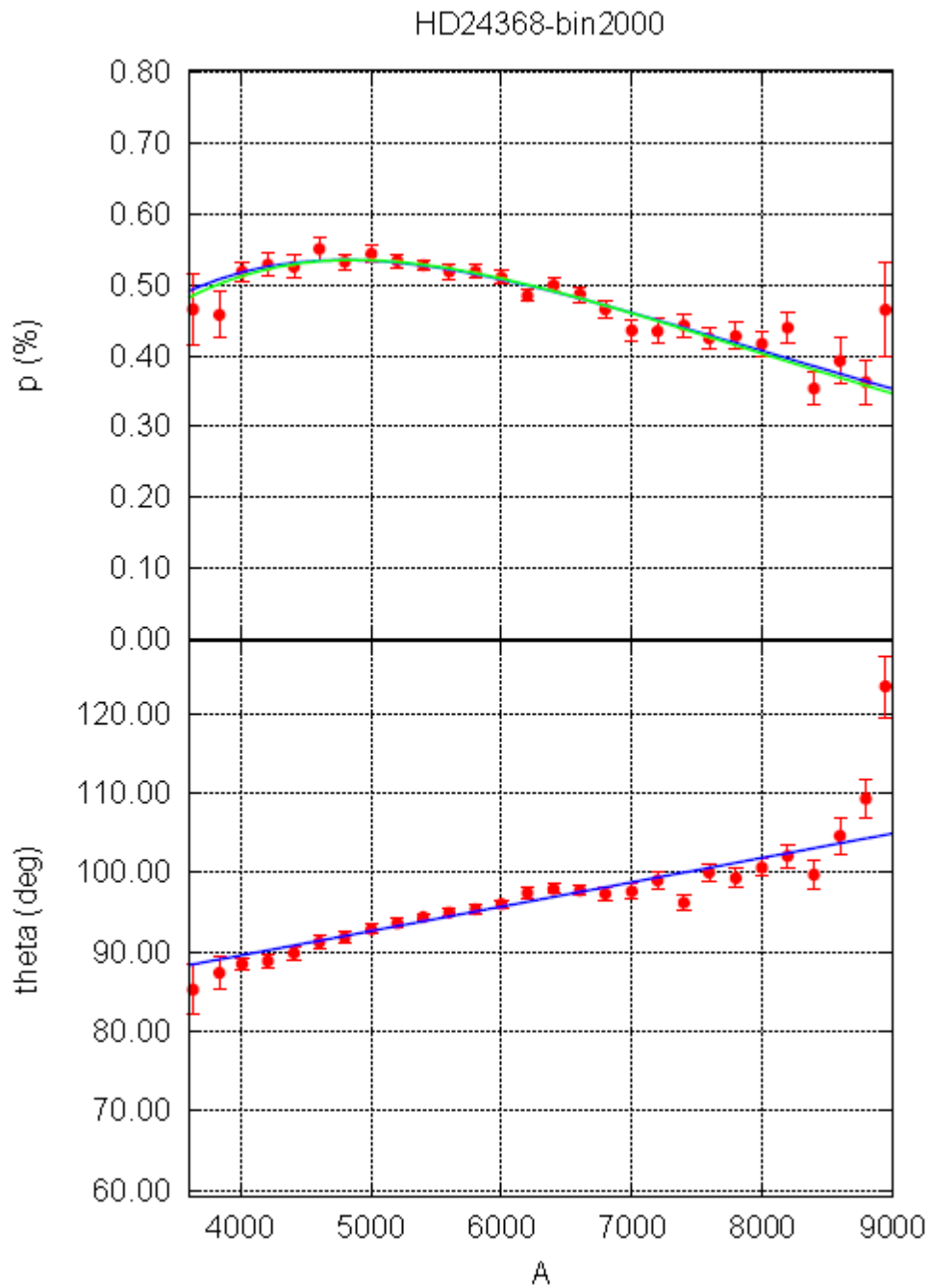


図 50 : HD24368 の偏光度、偏光位置角

HD23985
2009/1/13

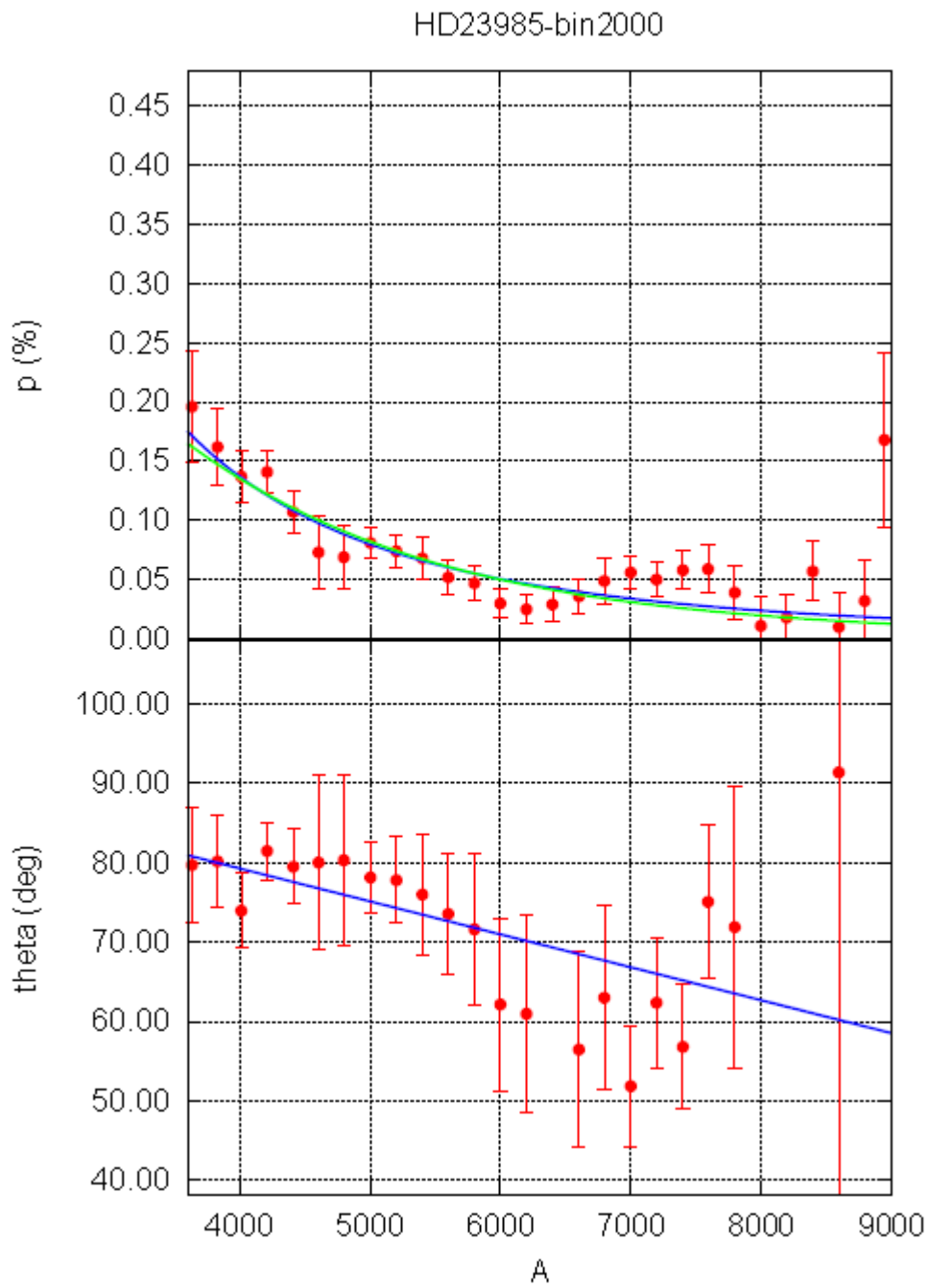


図 51 : HD23985 の偏光度、偏光位置角

HD23985
2009/1/14

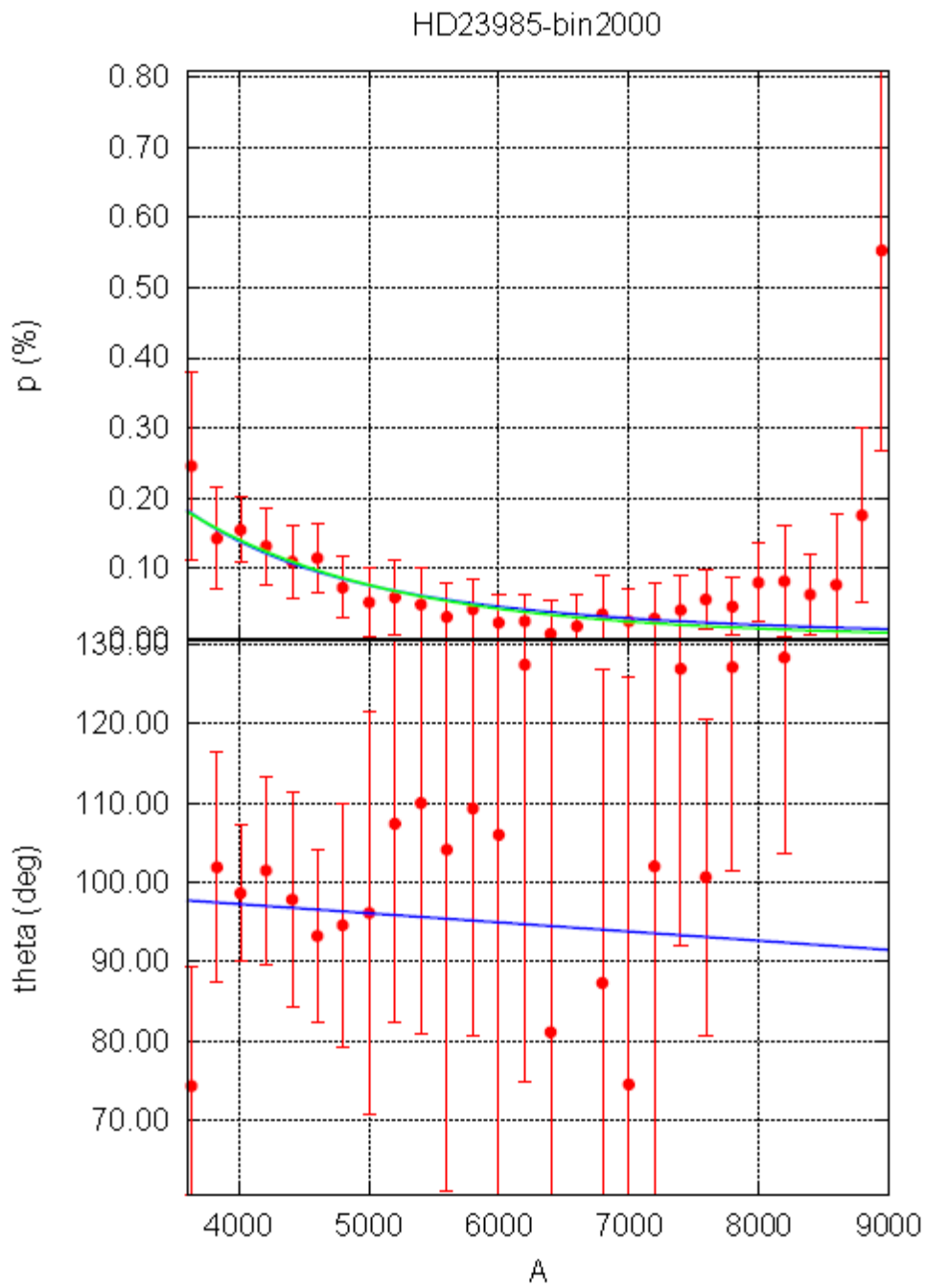


図 52 : HD23985 の偏光度、偏光位置角

HD24178
2009/1/13

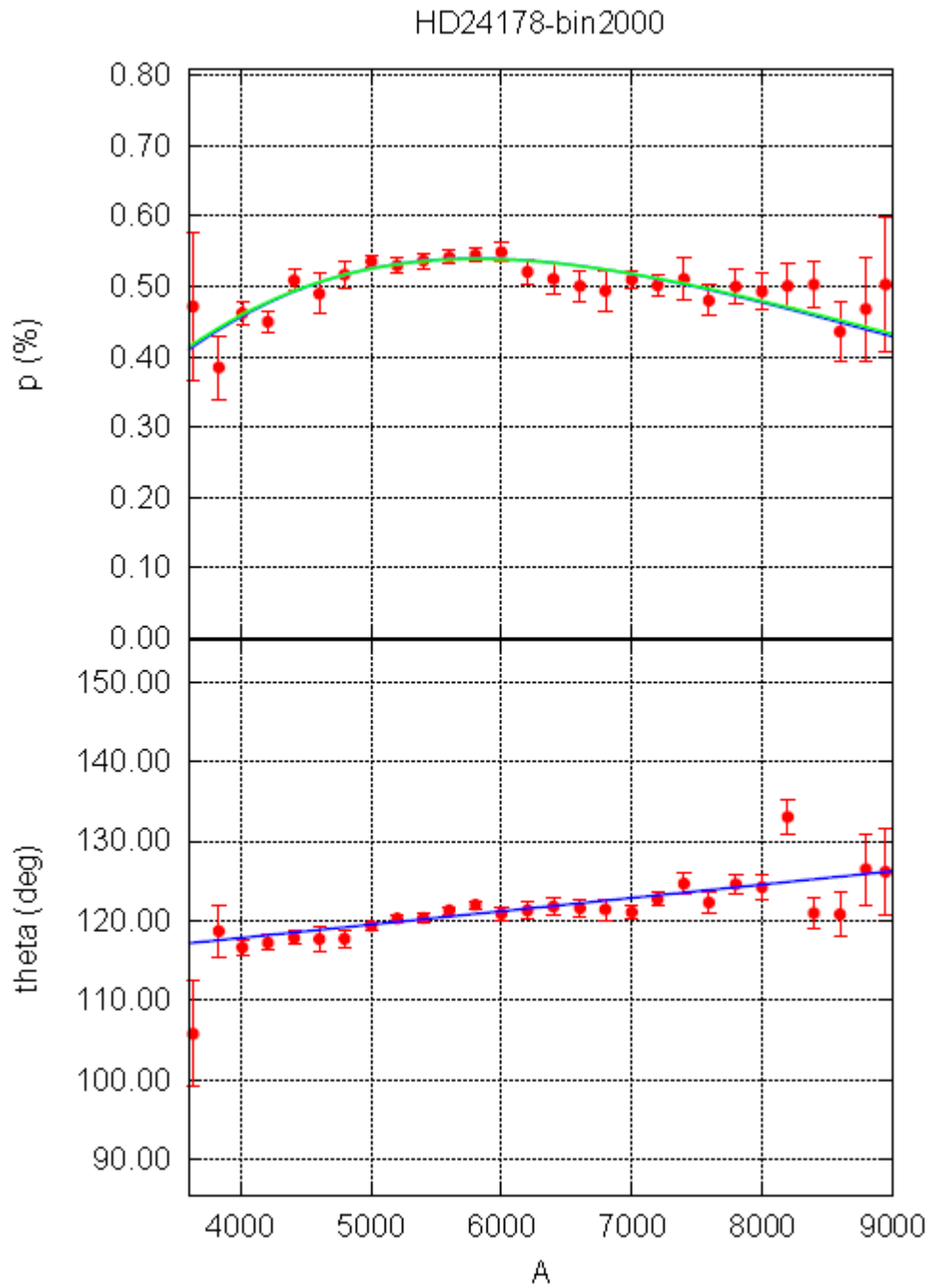


図 53 : HD24178 の偏光度、偏光位置角

HD24178
2009/1/14

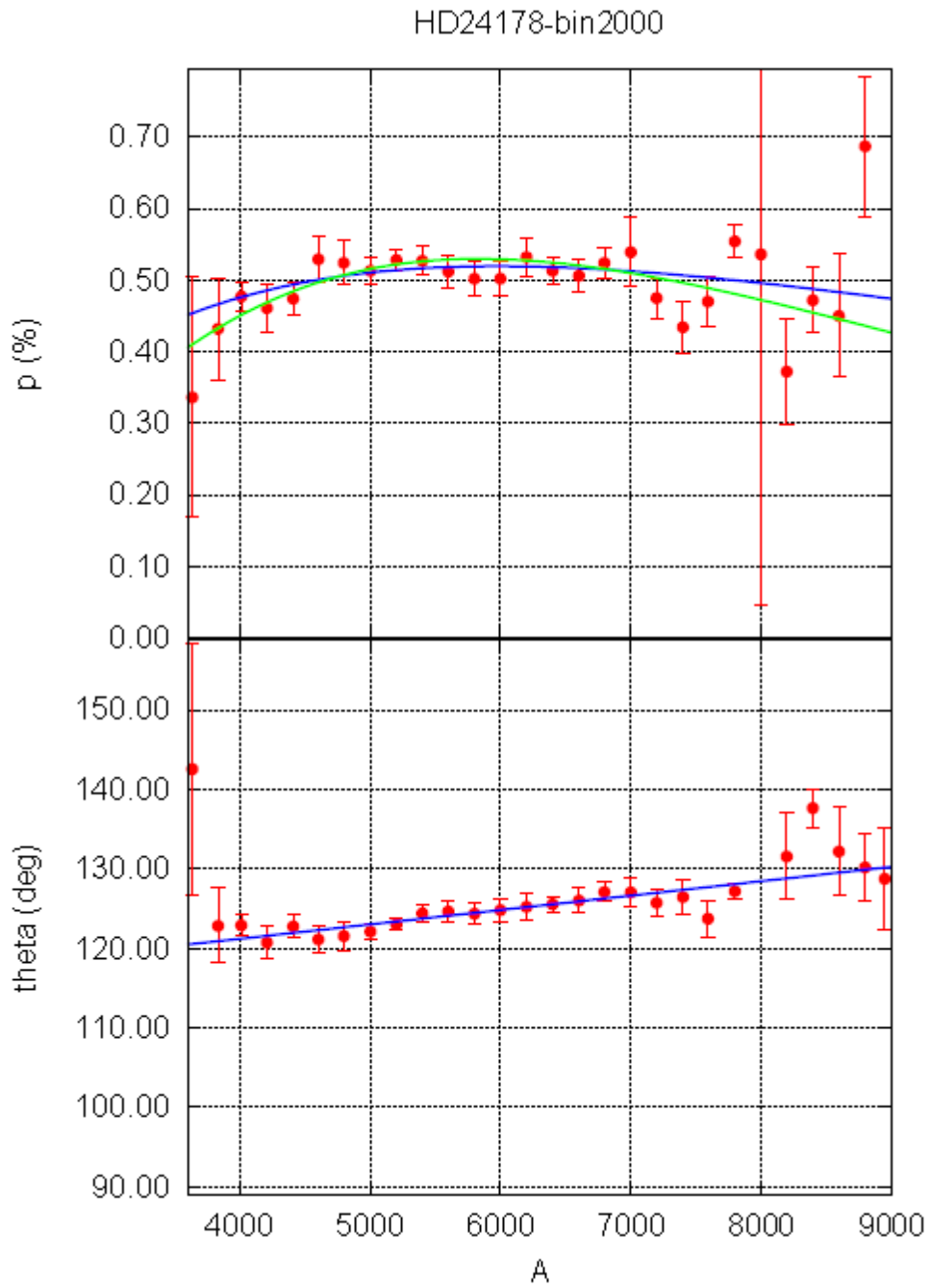


図 54 : HD24178 の偏光度、偏光位置角

HD24178
2009/1/15

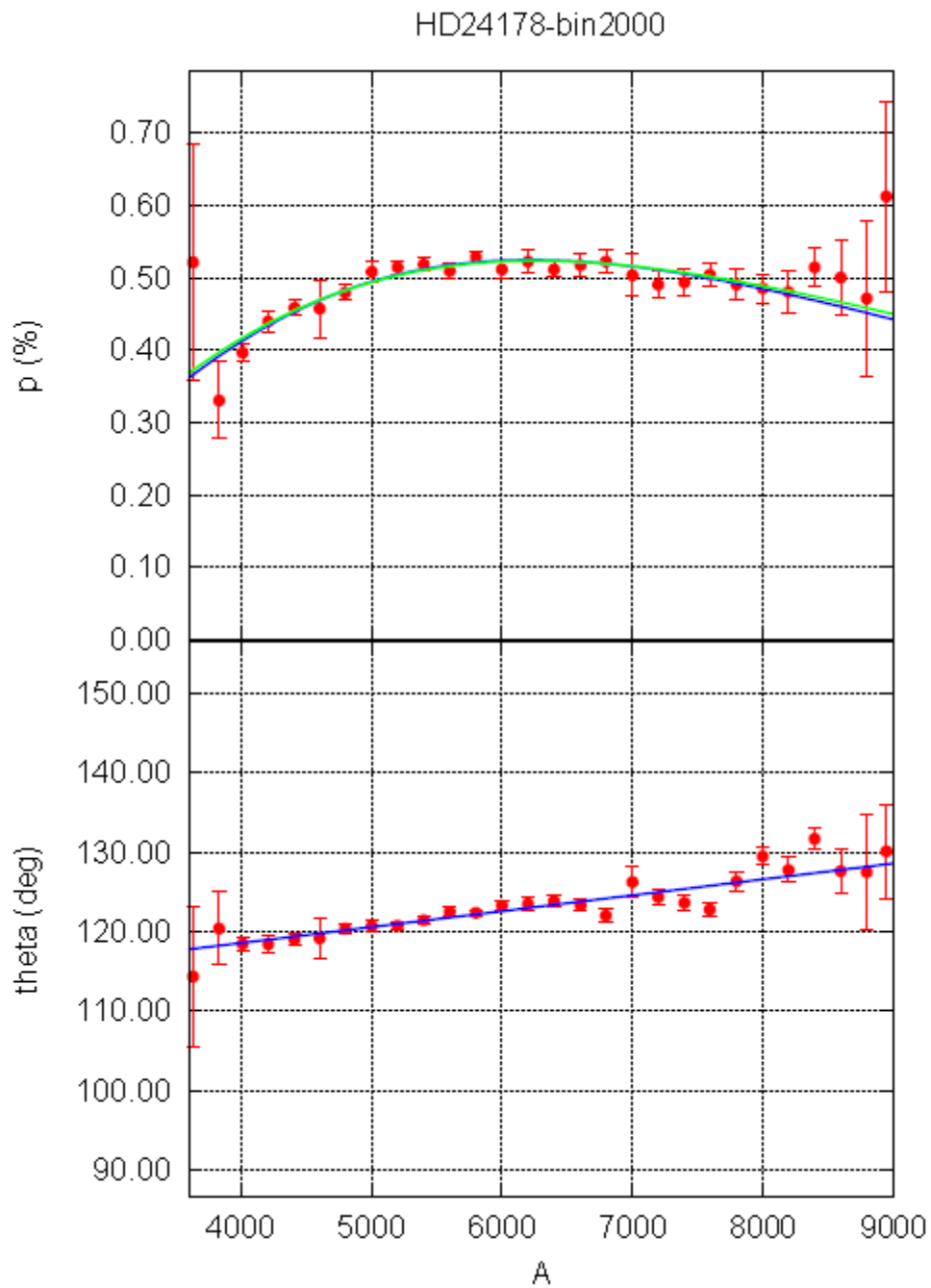


図 55 : HD24178 の偏光度、偏光位置角

HD23512
2009/1/17

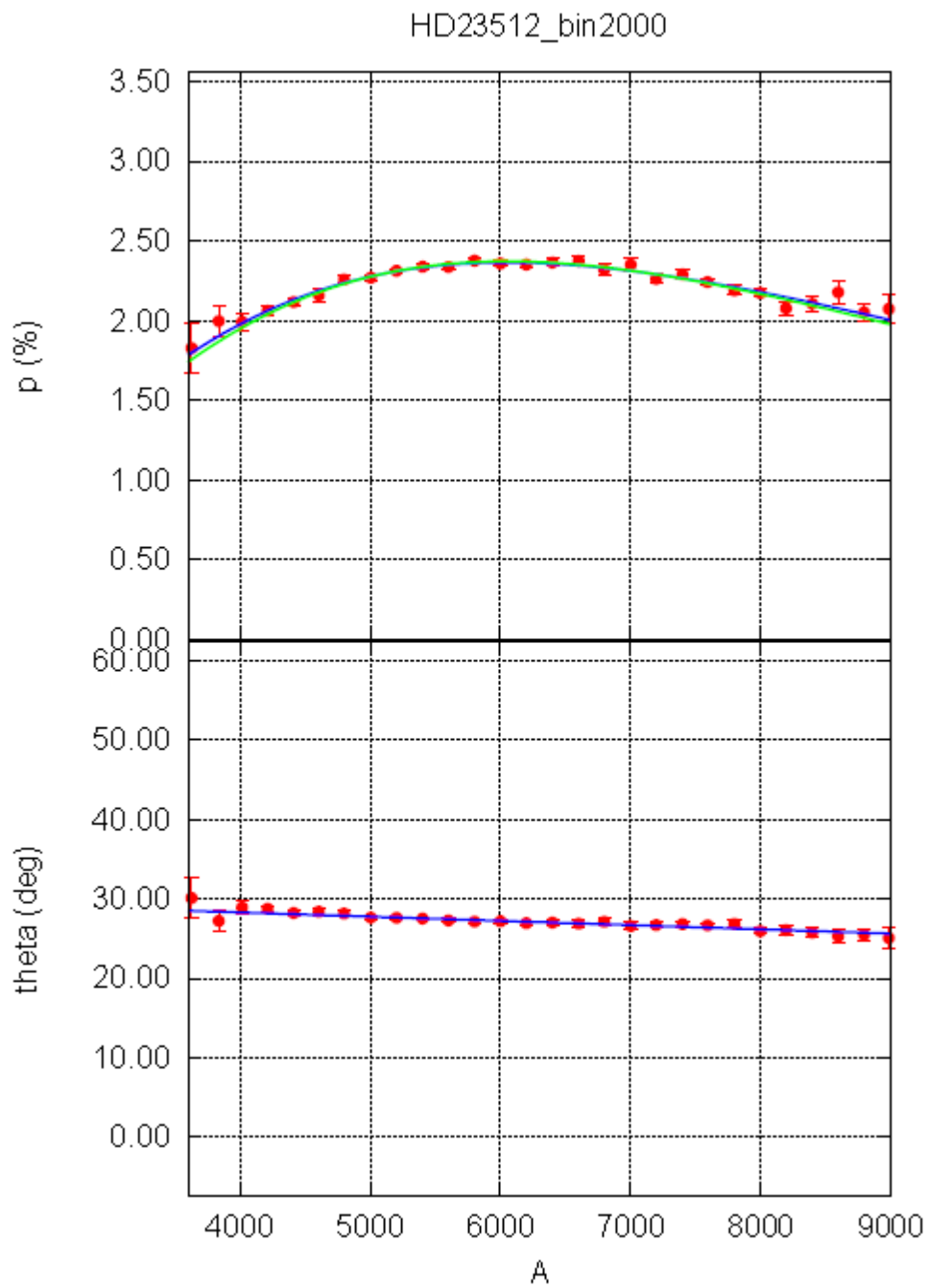


図 56 : HD23512 の偏光度、偏光位置角

HD34547 (Neb)

2009/1/14

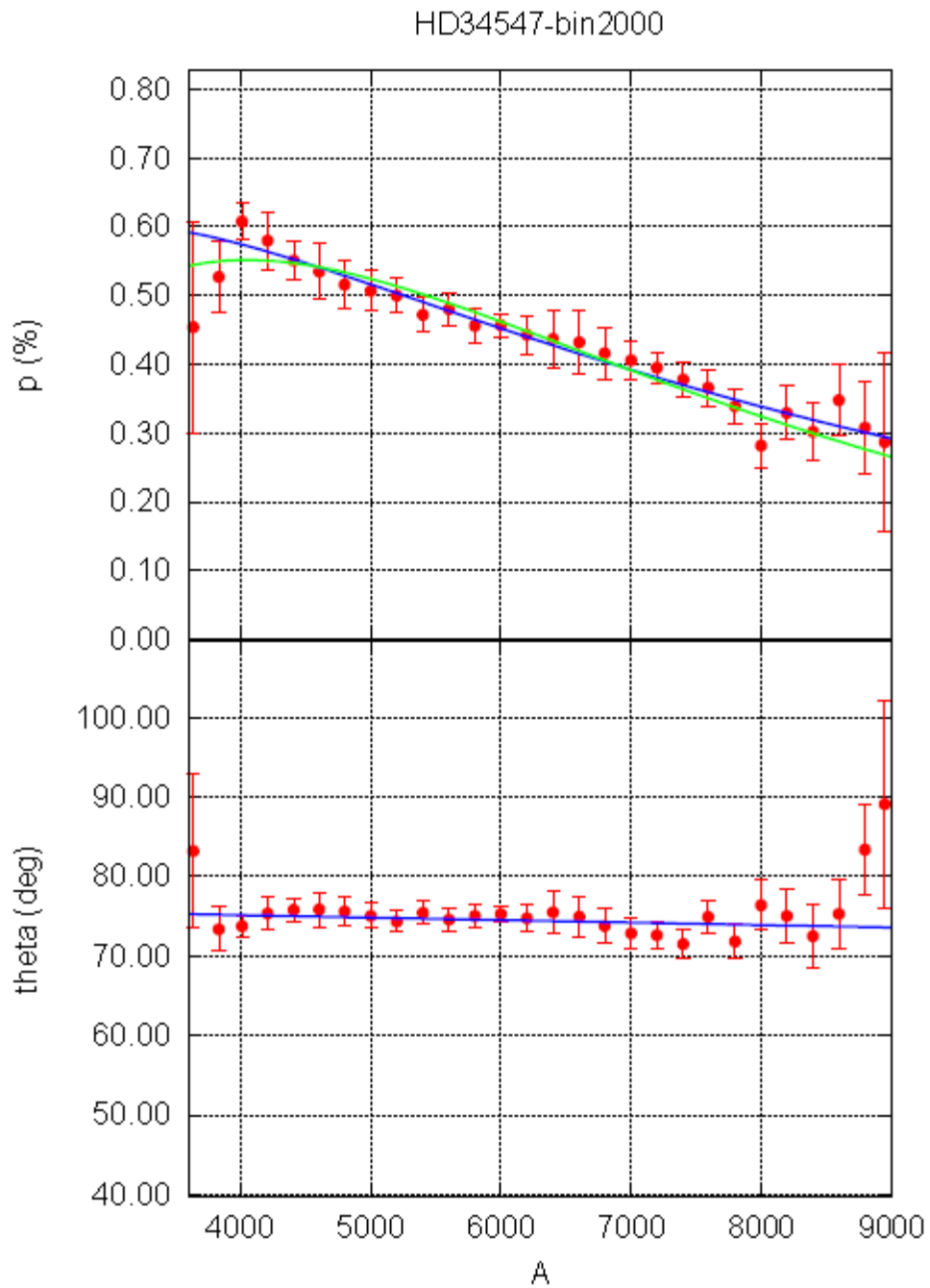


図 57 : HD34547(Neb)の偏光度、偏光位置角

HD34033 (Neb)

2009/1/19

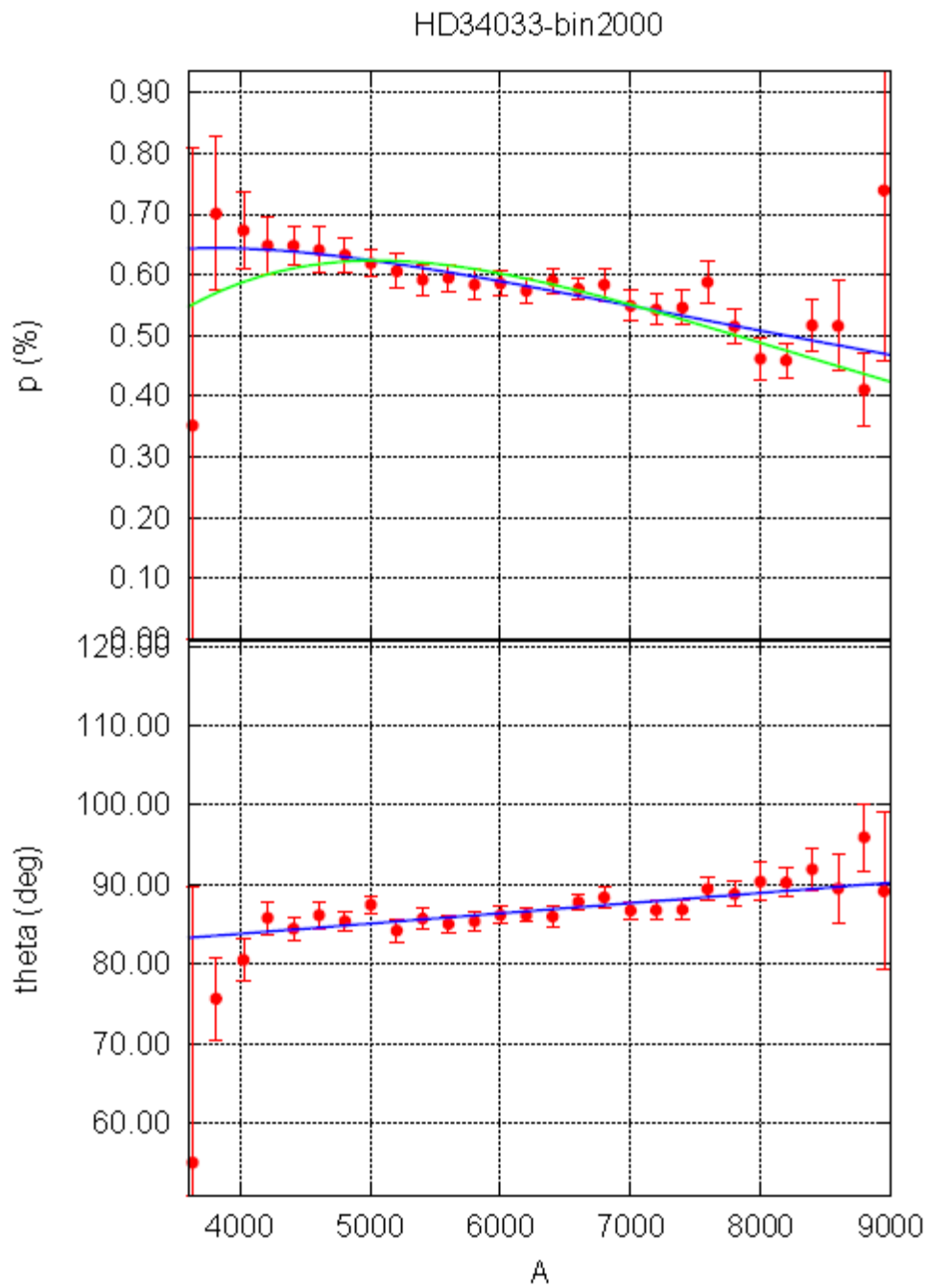


図 58 : HD34033(Neb)の偏光度、偏光位置角

HD34316
2009/1/19

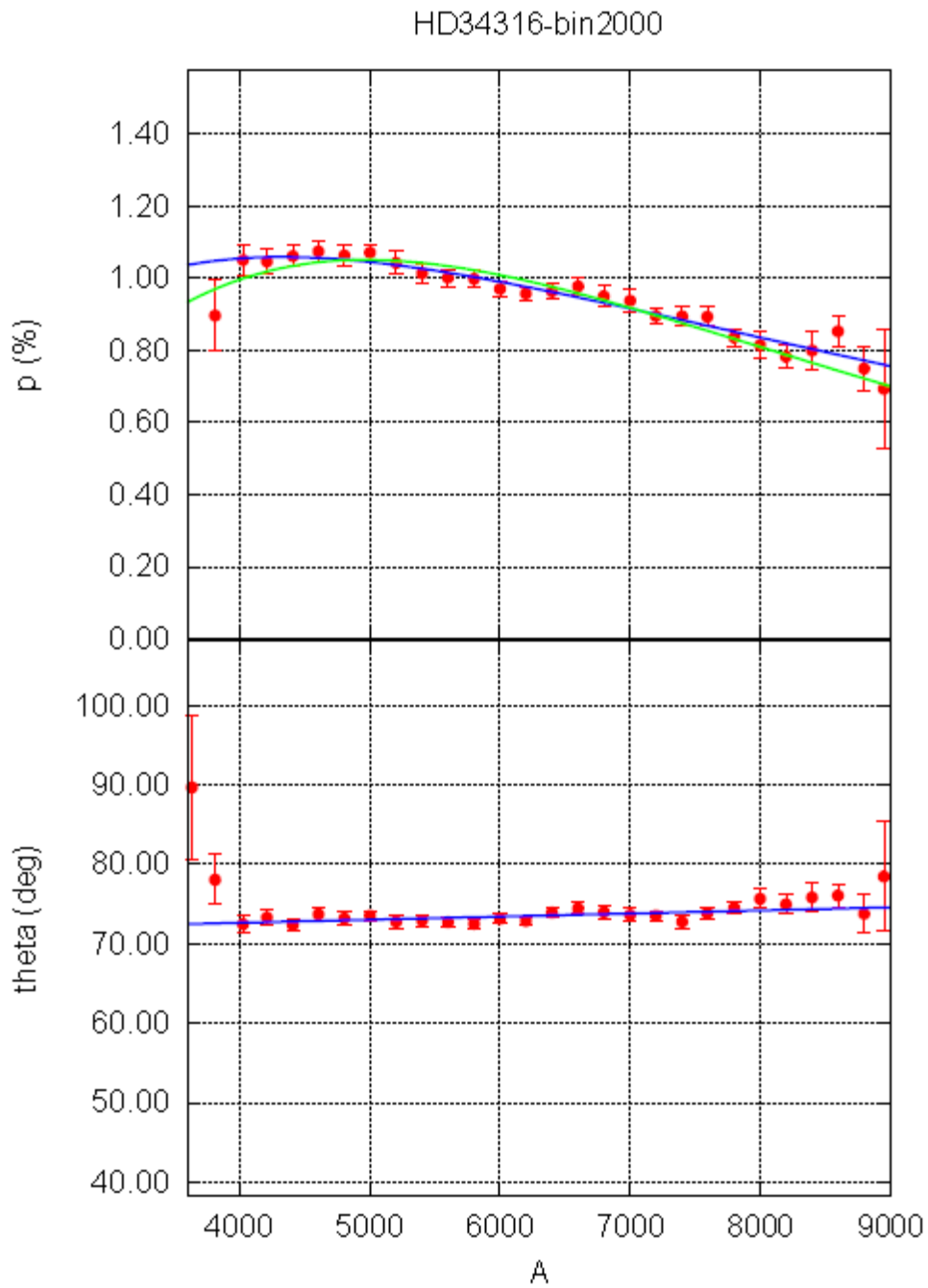


図 59 : HD34316 の偏光度、偏光位置角

第4章 考察

4.1 全観測データの考察

4.1.1 最大偏光波長 λ_{\max}

今回観測した星全体について、星雲を伴う星と伴わない星の偏光が最大になる波長である λ_{\max} の差を比較する。表5は星雲を伴う星と伴わない星の λ_{\max} の比較を示している。また、図60はそれぞれの星の2つの方法で出した、 λ_{\max} の差の値を棒グラフにしたものである。

このグラフでは星雲を伴う、伴わないに関わらず、ほとんどの星が $-0.02 \sim +0.02$ の間に集まっている。これは、赤色巨星の周囲で特に顕著な差がないことを示す。しかしながら、HD206509は他の領域の星と比べて、 λ_{\max} の差の値が大きいことがわかる。また、HD24118についても差の値が他の星よりも大きくなっている。

表5：星雲を伴う星の λ_{\max} と伴わない星の λ_{\max} の比較

星雲を伴う星			星雲を伴わない星			差	
Object	$\lambda_{\max}(1)$	$\lambda_{\max}(2)$	Object	$\lambda_{\max}(1)$	$\lambda_{\max}(2)$	$d\lambda_{\max}(1)$	$d\lambda_{\max}(2)$
HD3037 (Neb)	0.471 [0.007]	0.466 [0.008]	HD3122	0.468 [0.003]	0.469 [0.004]	0.003 [0.008]	0.000 [0.008]
HD21110 (Neb)	0.571 [0.010]	0.564 [0.046]	HD20844	0.572 [0.008]	0.551 [0.009]	-0.010 [0.013]	0.013 [0.047]
HD206509 (Neb)	0.404 [0.025]	0.430 [0.048]	HD206823	0.404 [0.027]	0.405 [0.048]	0.000 [0.037]	0.026 [0.068]
			HD206348	0.467 [0.019]	0.493 [0.029]	0.026 [0.068]	-0.063 [0.056]
HD37387 (Neb)	0.557 [0.004]	0.557 [0.010]	HD37769	0.550 [0.028]	0.506 [0.03]	0.007 [0.028]	-0.003 [0.012]
			HD245547	0.568 [0.005]	0.573 [0.007]	-0.010 [0.006]	-0.016 [0.012]
HD23338 (19 Tau)	0.550 [0.019]	0.562 [0.026]	HD23753	0.550 [0.016]	0.544 [0.033]	0.000 [0.25]	0.018 [0.042]
			HD24118	0.506 [0.037]	0.453 [0.038]	0.044 [0.042]	0.110 [0.046]
			HD24368	0.542 [0.069]	0.537 [0.009]	0.008 [0.071]	0.025 [0.027]

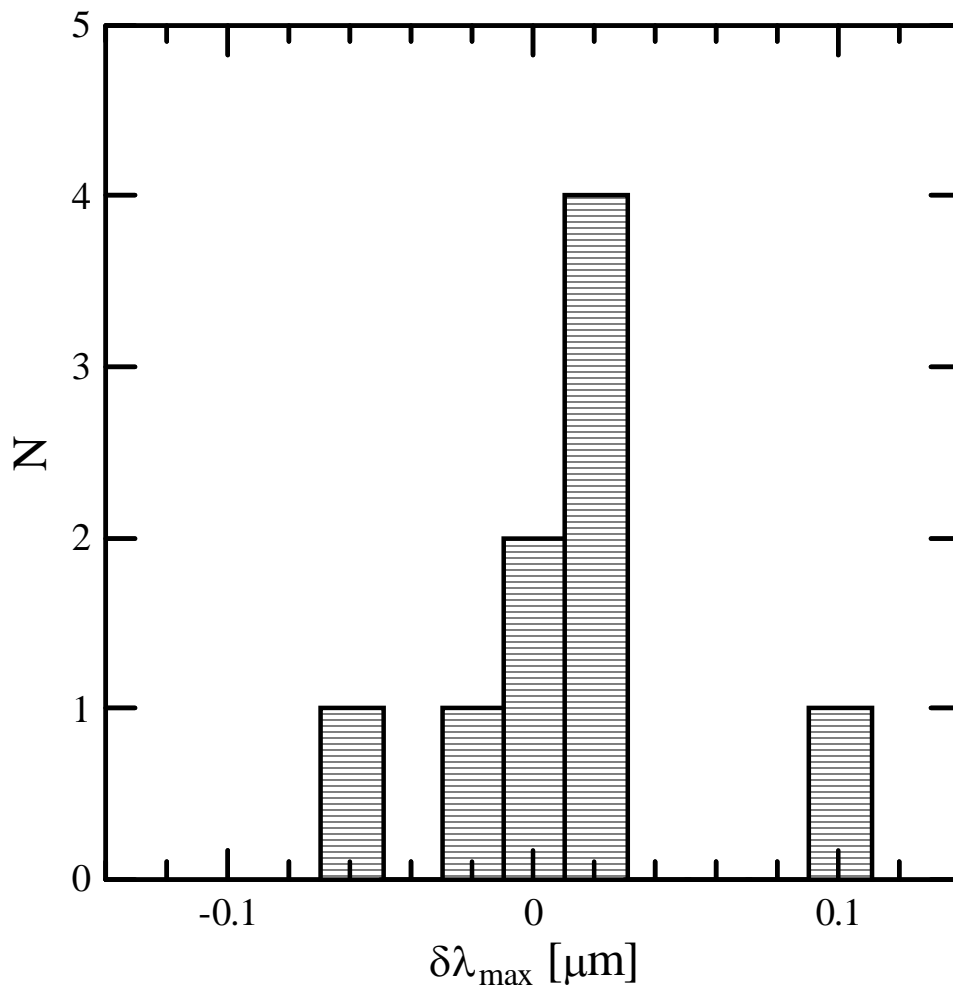


図 59 : それぞれの星の最大偏光波長 λ_{\max} の差 ($d\lambda_{\max}(2)$)

4.1.2 赤色巨星の偏光と色超過

図 61 は赤色巨星の偏光度と色超過の比較である。この図の中の破線は $p_V=9E_{B-V}$ を示している。多数の星の偏光度 p_V と色超過 E_{B-V} で知られている関係 $p_V \lesssim 9E_{B-V}$ における、偏光の上限に相当する。ほとんどの星の値が破線に沿うように分布している。

また、4.1.1 節で示したように、赤色巨星の結果の全体の傾向から、星雲を伴う赤色巨星と伴わない赤色巨星の λ_{\max} の大きさに有意な差が見られない。このことから、 λ_{\max} を、整列した星間塵の大きさで表すと仮定するならば、星雲を伴う星と伴わない星の周囲にある星間塵粒子のサイズに差はないことが考えられる。

一方、輻射トルクによる整れる機構については、 λ_{\max} は輻射のエネルギーによっても変わる。星雲を伴う星の周囲の方が輻射が強いと考えられるので、塵が整列している

と思われ、星雲を伴う星の方が λ_{\max} は大きくなると予測されるが、これらの事実から、以下のことが考えられる。

- ① 輻射の強いところではそもそも塵は整列していない。そのため λ_{\max} が変化しない。
- ② 輻射の強いところでは、輻射トルクによるものではない別の機構によって整列をしている。そのため、輻射が効いている空間と効いていない空間での λ_{\max} の差が出ない。

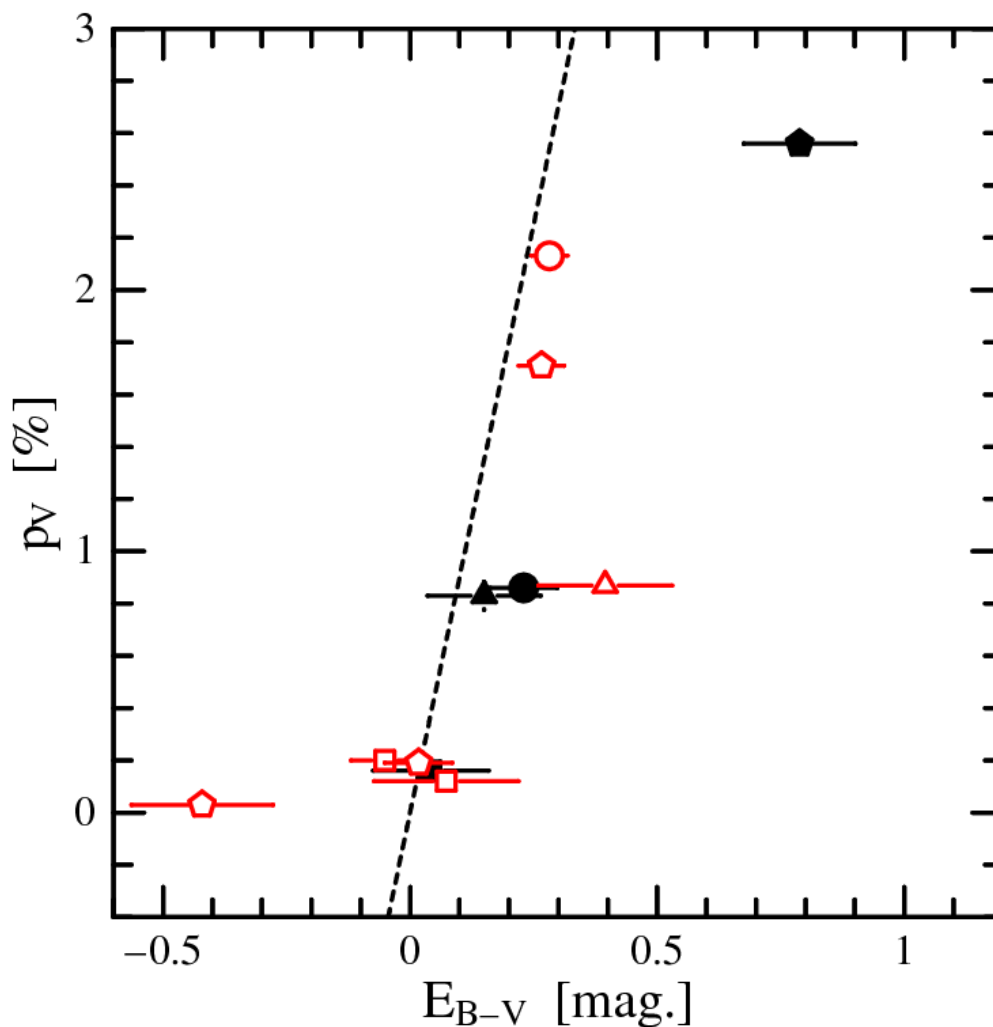


図 60 : 赤色巨星の偏光度と色超過の比較

同じ形のマークは近くの星を示し、黒は星雲を伴う星、赤はその近くの星雲を伴わない星を示している。

4.1.2 プレアデス星団およびその周辺の星の偏光と色超過

プレアデス星団とその周辺の星の位置を図 62 に表している。図 60 において、最大偏光波長 λ_{\max} の差が $0.1 \mu\text{m}$ のところにあるのが HD24118 である。また、図 63 は、プレアデス星団とその周辺の星の偏光度 p_V と色超過 E_{B-V} を比較したものである。この図の中で、 p_V の値が小さく E_{B-V} の値が比較的大きな星が 2 つある。この 2 つの星は HD24118 と HD23985 である。図 64 では、 λ_{\max} の値が小さく、かつ p_V/E_{B-V} も小さいものが 2 つあり、この 2 つの星が HD24118 と HD23985 である。

このことから、この 2 つの星の周辺では以下のようなことが考えられる。

- ① 整列している塵のサイズが小さいために、 λ_{\max} の値が小さくなっている。
- ② 大きな塵が整列せずに λ_{\max} の値が小さくなっている。

また偏光位置角 θ が他の星と比べて小さいことから、この 2 つの星周辺での星間塵粒子の整列は他の星の周囲と向きが違ふことがわかる。これは、磁場の向きが他の星の周囲と異なることを示している。

図 63 をみると、HD24118、HD23985 以外の星については、 λ_{\max} の値は大きく、大きい塵が整列している可能性が考えられる。しかし、プレアデスのような青い星は光の波長は短いため、小さな塵が整列しやすいと考えられるが、結果はそうなっていない。

なぜ、HD24118 と HD23985 の周辺のみ他と異なる結果となったのか、以下のことが考えられる。

- ① Gibson & Nordseick (2003)によると、プレアデス星団にかかっている星雲はシート状に星の手前にあるとされている。HD24118 と HD23985 の 2 つの星の光の領域において星雲が途切れているとすると、この 2 つの星が他の星の結果と異なることの説明がつく。この場合、手前の星雲による偏光を見ていることとなるので、星雲より奥の星間空間では偏光度 p_{\max} と最大偏光波長 λ_{\max} の値が小さい。
- ② HD24118 と HD23985 の偏光位置角 θ が他の星と比べて小さいことから、この 2 つの星の周辺は他の星と整列の向きが異なるため、整列の向きが視線と平行に近い可能性がある。このことにより p_{\max} が小さくなっている可能性がある。

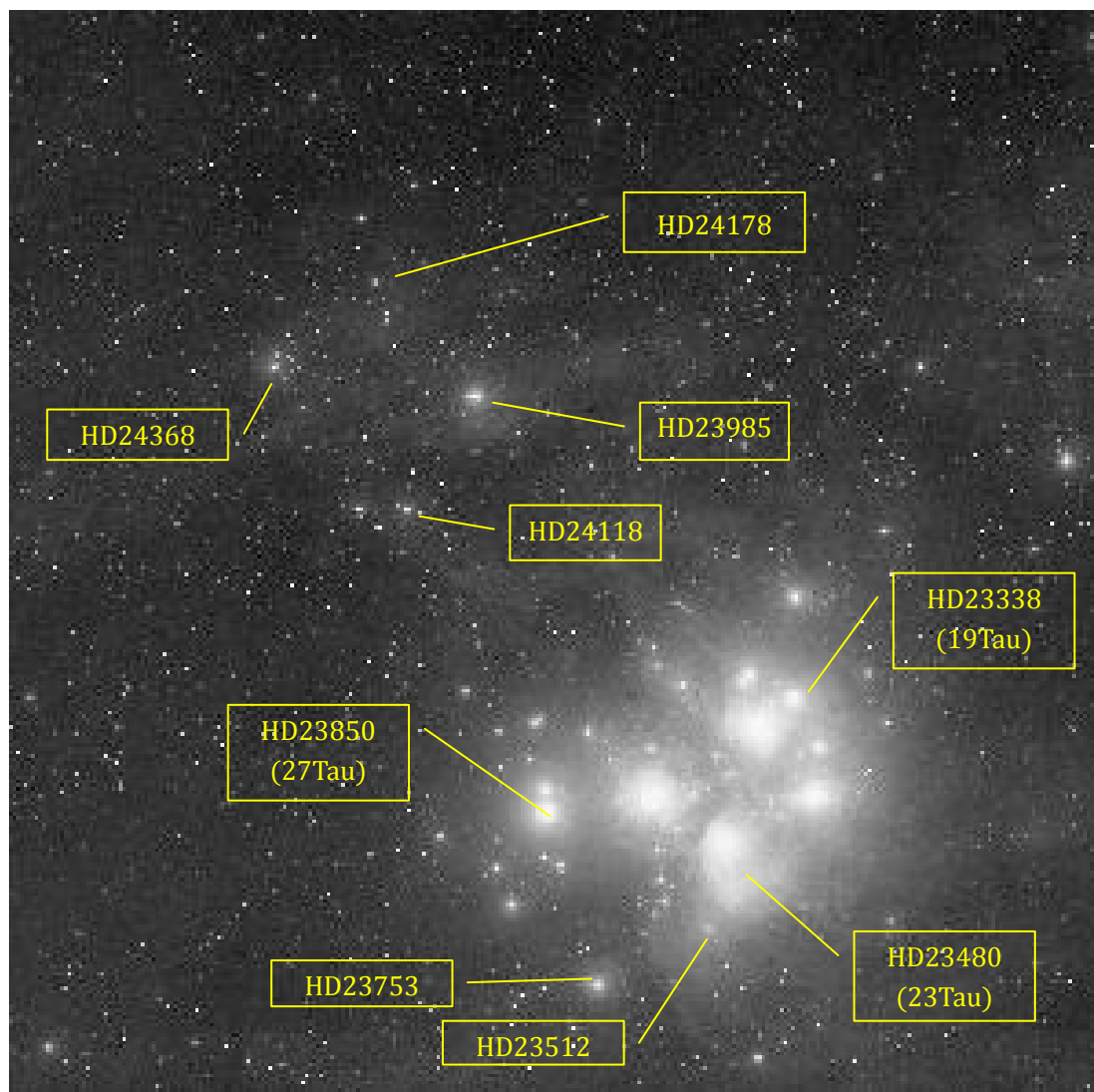


図 61 : Pleiades 星団とその周辺の星の位置

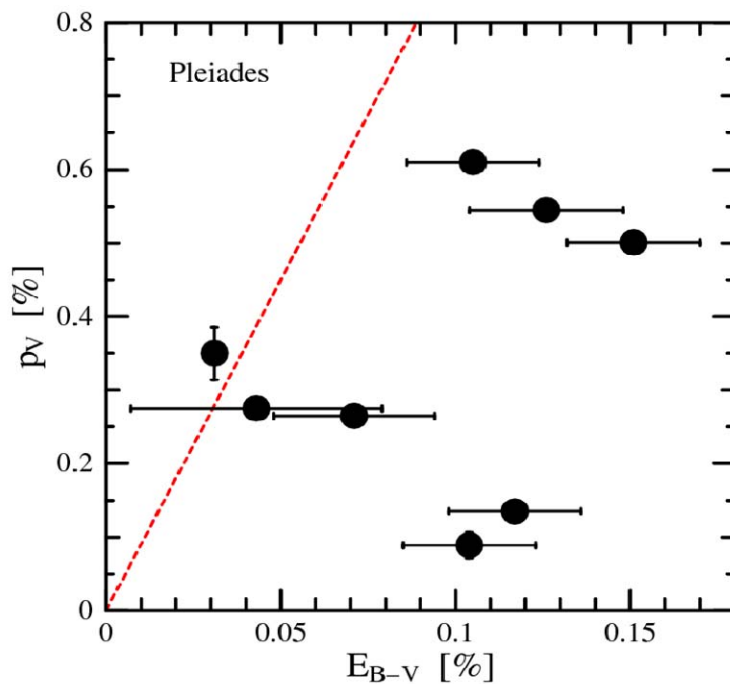


図 62 : Pleiades の偏光度と色超過の比較

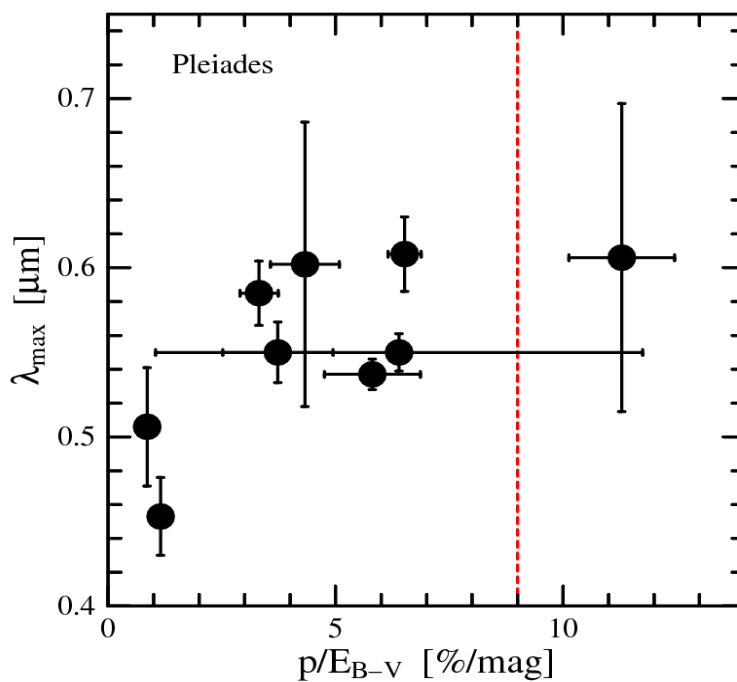


図 63 : Pleiades の最大偏光波長と偏光効率の比較

4.2 個々の星についての考察

4.2.1 偏光度の波長依存性

① HD3037 と HD3122

HD3037(Neb)と HD3122 の偏光度 p_{\max} は星雲を伴わない HD3122 のほうが明らかに大きな値である。理論上では星雲を伴う星の方が p_{\max} は大きくなると考えられる。この原因としては反射星雲を通しては HD3037 の光を見ていないことや HD3037 の周辺の磁場の向きが、視線と平行であることが考えられる。

これについて、2 つの星の距離も含めて検討すると、HD3037(Neb)と HD3122 では、HD3122 の方が距離は長い。よって、長い距離を光が通ってくるため、その分、 p_{\max} が大きくなることが考えられる。

偏光位置角 θ を考慮すると、2 つの星の θ の値も異なっている。これは塵の整列の方向が異なっていることを示す。塵の大きさが異なる場合は最大偏光波長 λ_{\max} の値も異なるはずだが、この 2 つの星の λ_{\max} の値に有意な差は見られない。つまり、整列の方向が変わっても、塵粒子の大きさは有意に変化していないと考えられる。

② HD21110 と HD20844

2 つの星の距離も含めて検討すると、HD21110 (Neb)と HD20844 では、HD20844 の方が距離は長い。長い距離を光が通ってくるため、その分偏光度 p_{\max} が大きくなっていると考えられる。その場合だと、距離が近いにもかかわらず、HD21110 は p_{\max} が大きいことになり、近くの塵の影響を受けている可能性はある。しかし、近くの塵の影響を受けているならば、最大偏光波長 λ_{\max} の値は大きくなるはずなので、輻射トルクが効いているとは一概には言えない。

また、偏光位置角 θ を考えると、この 2 つの星も θ の値も異なっている。これは整列の向きが異なることを示している。塵の大きさが異なる場合は、最大偏光波長 λ_{\max} の値も異なると予測されるが、 λ_{\max} の値に有意な差は見られない。つまり、①の場合と同様に、整列の向きが変わっても、塵粒子の大きさが有意に変化していないと考えられる。

③ HD206509、HD206823、HD206348

この 3 つの星について検討すると、偏光度 p_{\max} に関しては、どの星も値が小さい。また、最大偏光波長 λ_{\max} にも有意な差は見られない。このことから、3 つの星の周辺では同じサイズの塵が整列していると考えられる。

距離がわかっている HD206509 と HD206823 を比較すると 2 つの星の距離に有意な差はない。星雲を伴う HD206509 と伴わない HD206823 の p_{\max} の値が大きな差が見られないということは、星雲を伴うとされる HD206509 の星の光を星雲を通して見ていない、もしくは HD206823 の星の光が通ってくる通常の星間空間の塵の密度が多いことが考えられる。

また、偏光位置角 θ について検討すると HD206509 の θ の値が大きくなっている。これは、整列の向きが異なることを示している。よって、①、②の場合と同様に、整列の向きが変わっても、塵の大きさが有意に変化していないと考えられ

る。

④ HD37387, HD37769, HD245547, HD39498

この4つの星の中で、HD39498については、データの数が不十分なため、除いて考える。

HD37387は星雲を伴う星である。この星とHD37769、HD24554を比較すると、HD37387の方が偏光度 p_{\max} は2つの星に比べて高い値が出ている。しかし、最大偏光波長 λ_{\max} に関しては有意な差は見られない。そして、偏光位置角 θ の値も大きさが異なることから、それぞれの星の周辺の塵の整列の向きが異なっていると考えられる。HD37387に比べて、HD37769とHD24554の整列の向きが視線の方向と平行に近ければ、 p_{\max} の値も小さくなると考えることができる。

⑤ プレアデス

プレアデスの9つの星において、HD24118とHD23985に関してのみ、 λ_{\max} も p_{\max} も他の星と比べて値が小さい。このことから、この2つの星周辺では整列している塵の大きさが小さい、もしくは大きな塵は整列していないことが考えられる。(§4.1.2)

残りの7つの星に関しては λ_{\max} の値は大きく、大きな塵粒子が整列している可能性を示している。輻射トルクによる整列理論によると、波長と塵のサイズは依存するため、プレアデス星団のような青い星の場合、波長は短いため小さな塵が整列しやすいと考えられる。今回の観測の結果では、 λ_{\max} の値が大きいためこの予想とは異なる。

4.2.2 偏光度と色超過

① HD3037 と HD3122

この2つの星の偏光効率 p/E_{B-V} を検討すると、HD3037は4.16%/mag、HD3122は6.84%/magとなっている。輻射トルクによって塵粒子が整列している場合、星雲を伴うHD3037は星雲を伴わないHD3122の p/E_{B-V} の値が大きくなると考えられるが、結果はそのようにはなっていない。

② HD21110 と HD20844

この2つの星の偏光効率 p/E_{B-V} を比較すると、星雲を伴うHD21110の方が p/E_{B-V} は高い値となっている。しかし、偏光度 p_V と色超過 E_{B-V} で知られている関係の上限とされる $p_V \leq 9E_{B-V}$ を上回ることはない。

③ HD206509、HD206823、HD206348

この3つの星のうち、HD206509とHD206823については色超過 E_{B-V} が分かっている。この2つの p/E_{B-V} を比較すると、星雲を伴うHD206509の方が高い値となっている。しかし、②と同様に $p_V \leq 9E_{B-V}$ を上回ることはない。

④ HD37387、HD37769、HD245547、HD39498

この4つの星の中で色超過 E_{B-V} が分かっている星は、星雲を伴うHD37387とHD245547である。この2つの星を比較すると、HD37387の方が p/E_{B-V} の値が

小さい。星雲を伴う HD37387 の p/E_{B-V} の値が小さいということは HD37387 の周辺では輻射トルクによって塵粒子が整列していない可能性を示している。

第5章 結論

輻射トルクの効果で塵が整列しているのであれば、赤色巨星の星雲を伴う星と伴わない星とで比較すると、星雲を伴う星の方が最大偏光波長 λ_{\max} の値が大きくなることを期待していたが、今回の観測の結果からはどの結果からも λ_{\max} に有意な差は見られなかった。これは以下の3つの可能性を意味する。

- ① 輻射トルクによっては星周囲の塵が整列していない。
- ② 輻射トルクにより整列してはいるが、整列する塵のサイズは普通の星間空間と変わらない。
- ③ 今回観測した星雲を伴うと考えていた星までの視線上に、星雲は存在していない。

また、 p_{\max} と E_{B-V} の関係については、輻射トルクによって塵が整列しているのであれば、偏光効率 p/E_{B-V} が $p_v \leq 9E_{B-V}$ の関係を上回ると期待していたが、これを上回った例は観測されなかった。

プレアデスの周囲の星に関しては p と E_{B-V} の関係をみると、輻射が強い領域の方が偏光効率が高いため、輻射トルクにより塵が整列している可能性があると考えられる。しかし、青い星の光は波長が短いため、小さな塵が整列しやすいとはずだが、結果は逆に青い光が強い領域では λ_{\max} の値が大きい傾向が見られた。唯一、プレアデスの星である HD24118 と HD23985 に関しては、偏光度 p_{\max} と最大波長 λ_{\max} がともに小さいという結果となった。この2つの星の p_{\max} と λ_{\max} の値が小さくなった可能性として以下のことが考えられる。

- ① プレアデス星団にかかっている星雲はプレアデス星団の星よりも手前にシート状に存在し、HD24118 と HD23985 の領域だけ星雲が途切れているため、 p_{\max} と λ_{\max} の値が小さくなった。この場合、他の星に関しても星雲より奥側では p_{\max} と λ_{\max} の値が小さい可能性がある。
- ② HD24118 と HD23985 の偏光位置角 θ の値が、他の星の θ の値と異なることから、2つの星の周りの塵粒子の整列の方向が、他の星の周りの塵粒子の整列の方向と異なっていることがわかる。そのため、この2つの星の視線上において、整列した塵粒子の状況が他と異なるため p_{\max} と λ_{\max} の値が小さく観測された可能性がある。

参考文献

- Andersson, B.-G. & Potter, S.B., 2007, ApJ, 665, 369
Cho, J., & Lazarian, A. 2005, ApJ, 631, 361
Cohen, M. 1975, PASP, 87,421
Davis, L., & Greenstein, J.L., 1951, ApJ, 114, 206
Dolginov, A.Z. & Mytrophanov, I.G. 1976, Ap&SS, 43, 291
Draine, B.T. & Weingartner, J.C. 1967, ApJ, 480, 633
Lazarian, A. 2003, JQSRT, 79, 881
Lazarian, A. & Draine, B.T., 1997, ApJ, 487, 248
Lazarian, A., & Draine, B. T., 1999, ApJ, 520, L67
Lazarian, A. & Hoang, T. 2007, MNRAS, 378, 910
Magakian, T.Yu.2003, A&Ap, 399, 141
Mathis, J.S., Mezger, P.G., & Panagia, N., 1983, AAp, 128, 212
Purcell, E.M. 1979, APJ, 231, 404
Racine, R. 1968, AJ, 73, 233
Whittet, D.C.B. et al. 2008, ApJ, 674, 304
Breger, M. 1986, ApJ, 309, 311B
Seki, M. 1996, ASPC, 97, 168S
Serkowski, K., Mathewson, D.S., & Ford, V.L., 1975, ApJ, 196, 261
Steven, J. Gibson., & Kenneth, H. Nordsieck., 2003, ApJ, 589:362-377
小暮 智一, 宇宙物理講座 第3巻「星間物理学」(ごとう書房)
川端 弘治, 平方 伸之, 秋田谷 洋, 池田 優二, 1999, HBS データ整約マニュアル
浜坂 征志, 2002, 香川大学大学院修士論文
高橋 一栄, 2005, 香川大学大学院修士論文
小波 秀雄, 枝松 圭一, 1995, 新グラフィック・プロセッサ Gp のすべて (山海堂)

謝辞

本研究にあたり数多くのご指導をいただいた松村雅文 香川大学教授に深くお礼申し上げます。

また、本研究をするにあたってご指導いただいた関宗蔵 東北大学名誉教授、観測に協力していただいた秋田谷洋 国立天文台研究員、磯貝瑞希 石垣島天文台研究員、岡崎彰 群馬大学教授、国立天文台岡山天体物理観測所の方々、河合暁志さん (小学校教員)、椎名理恵さん (群馬大学大学院修士課程 2 年生)、須藤俊介さん、吉野晃生さん (群馬大学大学院修士課程 1 年生)、星野友幸さん (群馬大学 4 年生) にも心より感謝いたします。

なお本研究における観測は、国立天文台岡山天体物理観測所の共同利用観測 (学位論文支援プログラム、プロポーザル No.08A-S01,08B-S01,09A-S01) として行なわれた。