

β Lyrの高分散分光観測による 双極アウトフローの幾何と速度場の解明

新中 善晴 (国立天文台)

Email: yoshiharu.shinnaka@nao.ac.jp

池田 優二 (フォトコーディング、京都産業大学)、
新崎 貴之、河北秀世 (京都産業大学)

目次

1. イントロダクション

- β Lyrとは
- 干渉計による直接撮像
- 双極ジェットの見つけ
- 現時点で提案されている撮像

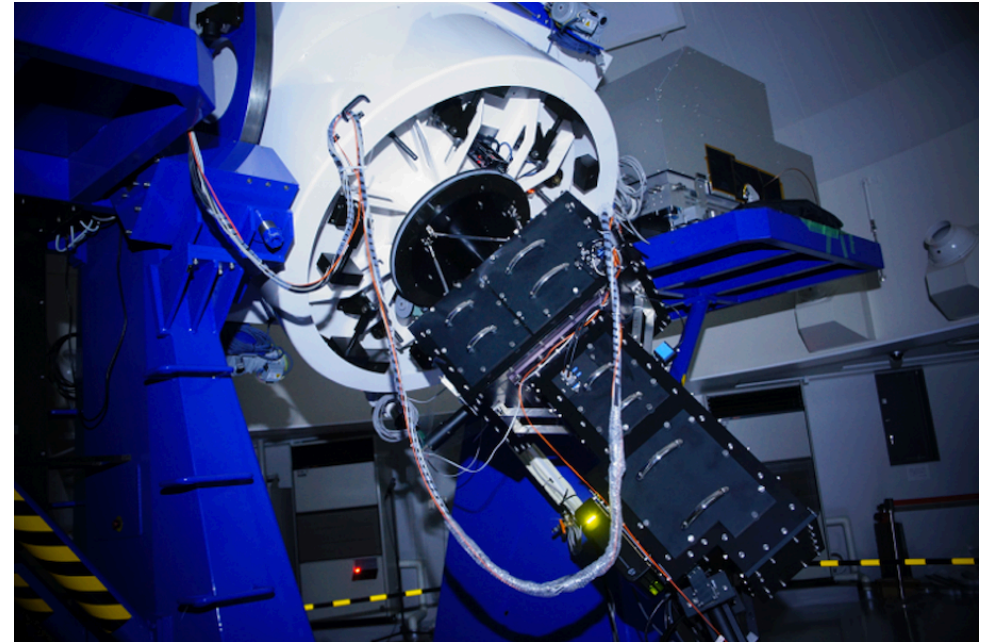
2. 観測

- VESPoIA/荒木望遠鏡、観測のまとめ
- 偏光観測でわかること

3. 結果と議論

- 観測結果、 $H\alpha$ の偏光スペクトル
- $H\alpha$ の散乱源のサイズと起源の制限
- 静止成分の抽出、 $H\alpha$ 放射源の推定
- $H\alpha$ の幾何と速度場の推定、計算結果
- 議論

4. まとめと今後の展望



β Lyrとは

- 早期型星からなる**食連星系**

主星: B0.5V

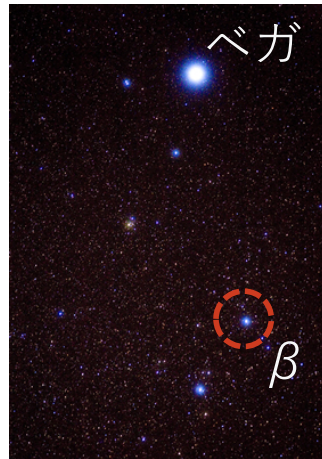
– $R \sim 6.0 R_{\text{sun}}$

– $M \sim 13.2 M_{\text{sun}}$

伴星: B6-8II

– $R \sim 15.2 R_{\text{sun}}$

– $M \sim 3.0 M_{\text{sun}}$



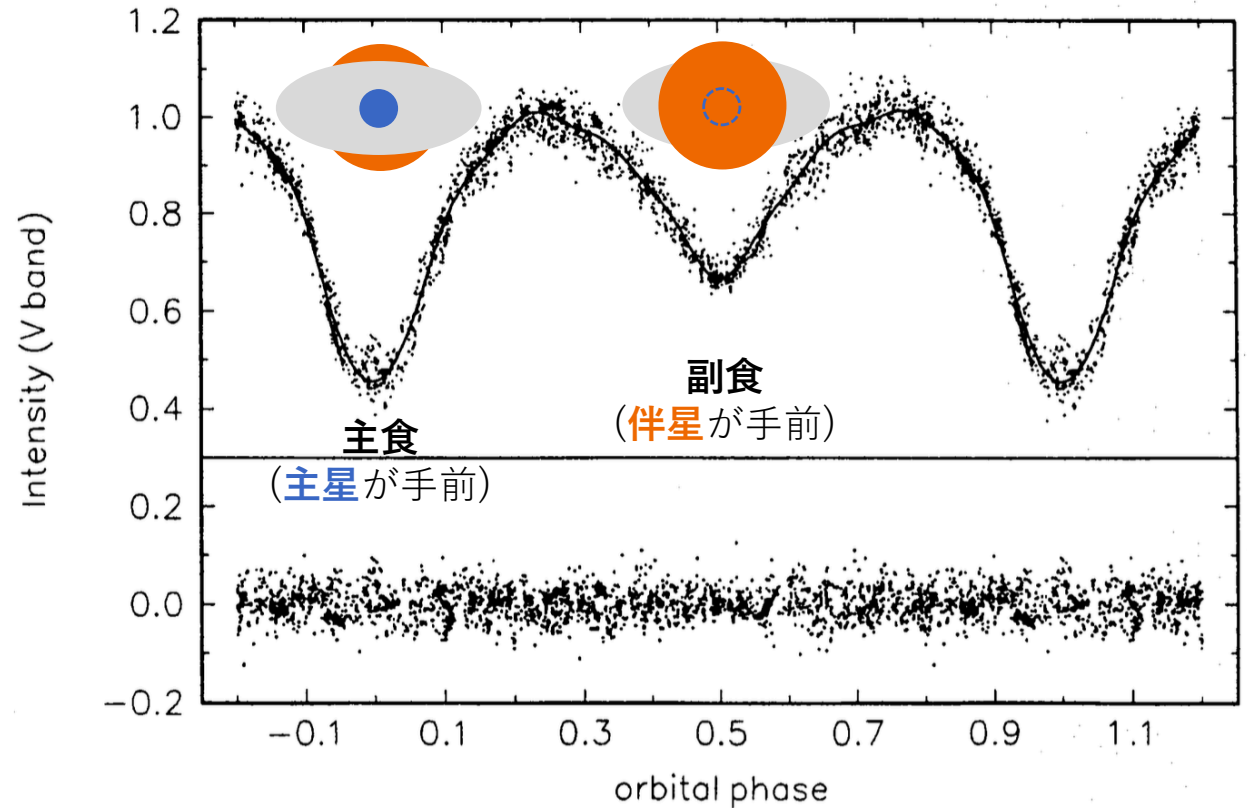
- 伴星から主星への質量降着により**主星の周りに光学的に厚い円盤**を形成

- 公転周期：**~12.94日**

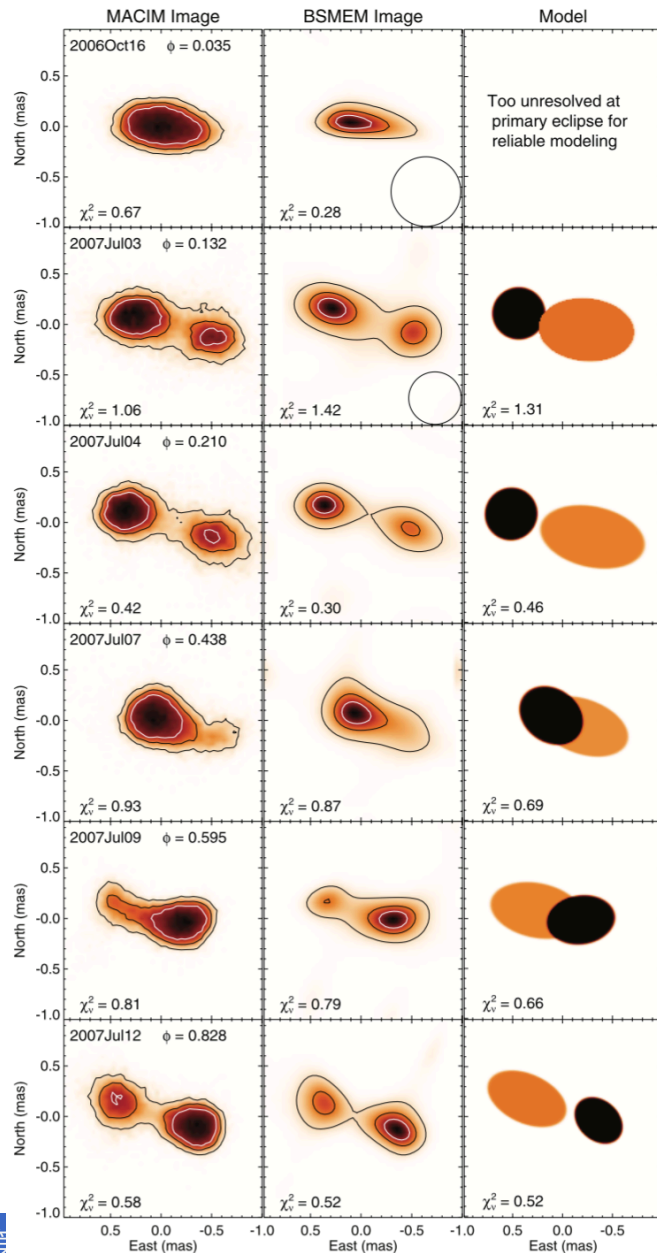
(Harmanec & Scholz 1993; Ak et al. 2007)

- 軌道傾斜角：**83°–88°** (Wilson 1974; Hubeny & Plavec 1991; Linnel et al. 1998, 2000; Zhao et al. 2009; Mennickent & Djurasevic 2013)

▶ **光度曲線** (Harmanec & Scholz 1993)

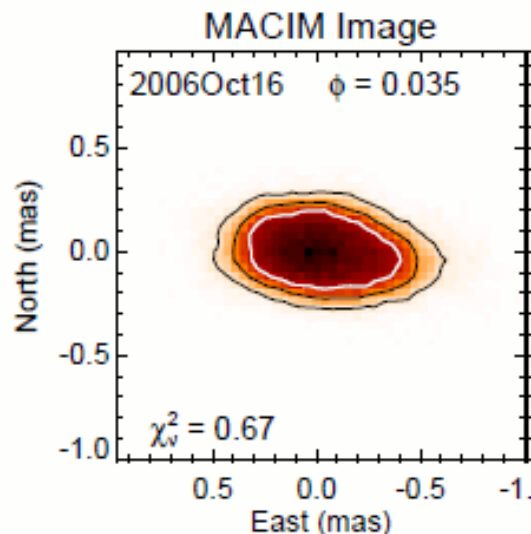


干渉計による直接撮像観測

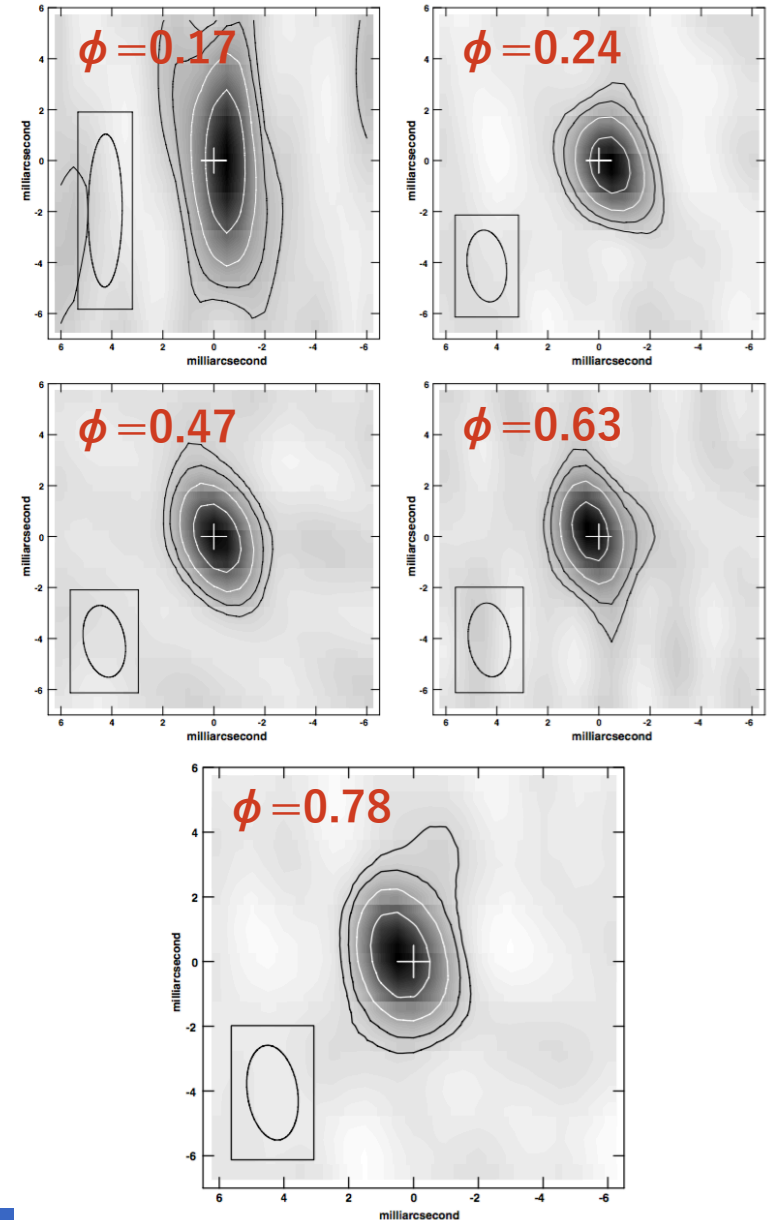


← CHARA干渉計による
K-band直接撮像画像
(Zhao et al. 2008)

→ NPOI干渉計による
H α 直接撮像画像
(Schmitt et al. 2009)

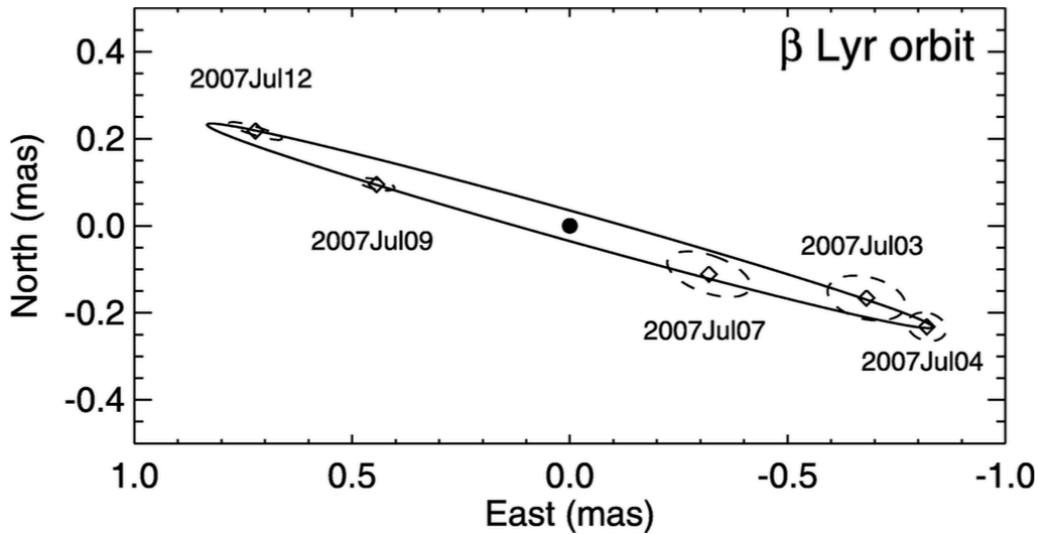


Zhao, 2008 www.shelyak.com



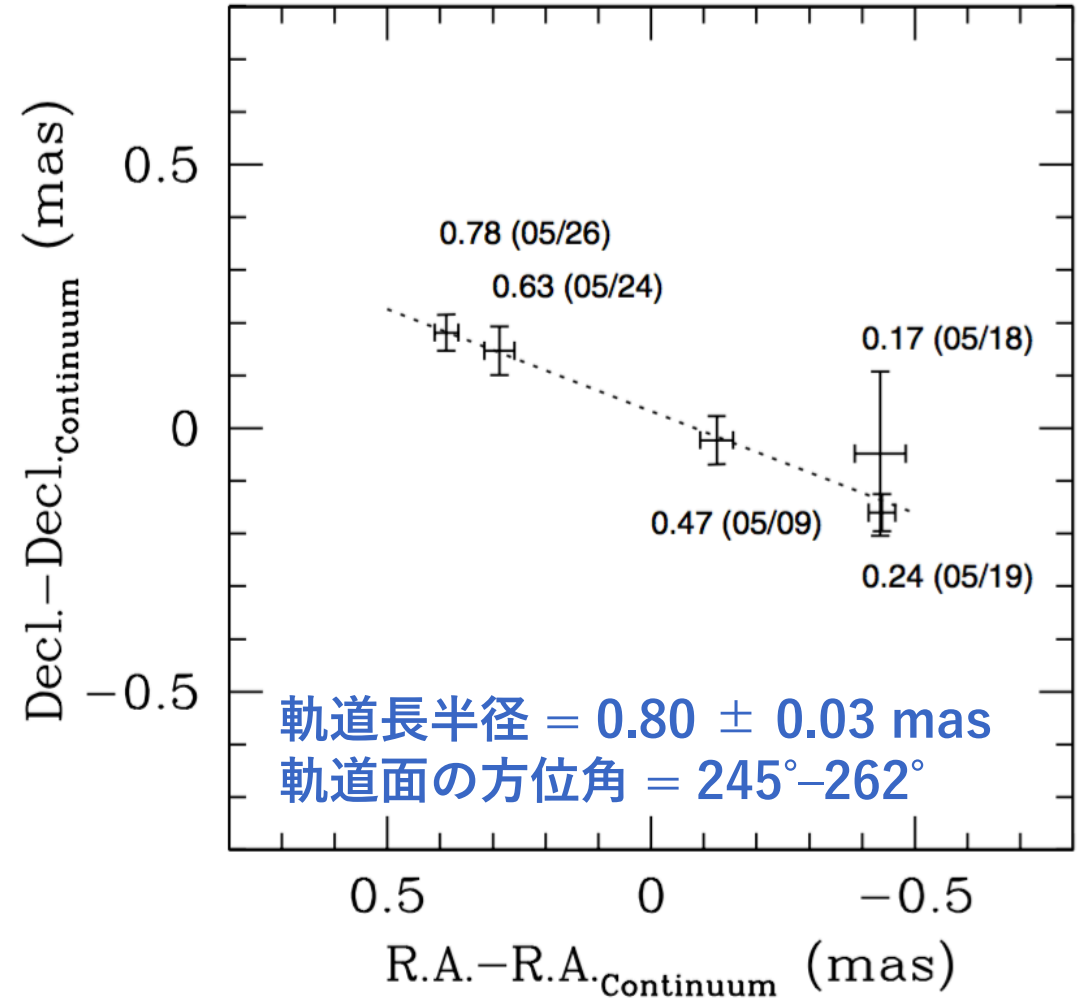
干渉計による直接撮像観測

▶ K-band干渉計 (Zhao et al. 2008)



軌道長半径 = 0.82 – 1.12 mas
軌道面の方位角 = 250°–255°

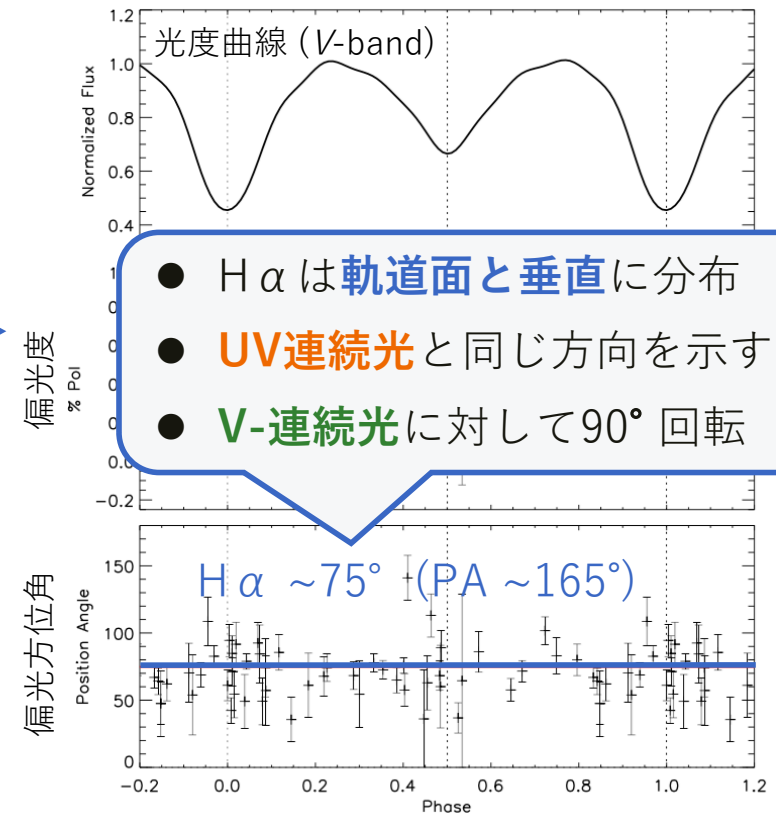
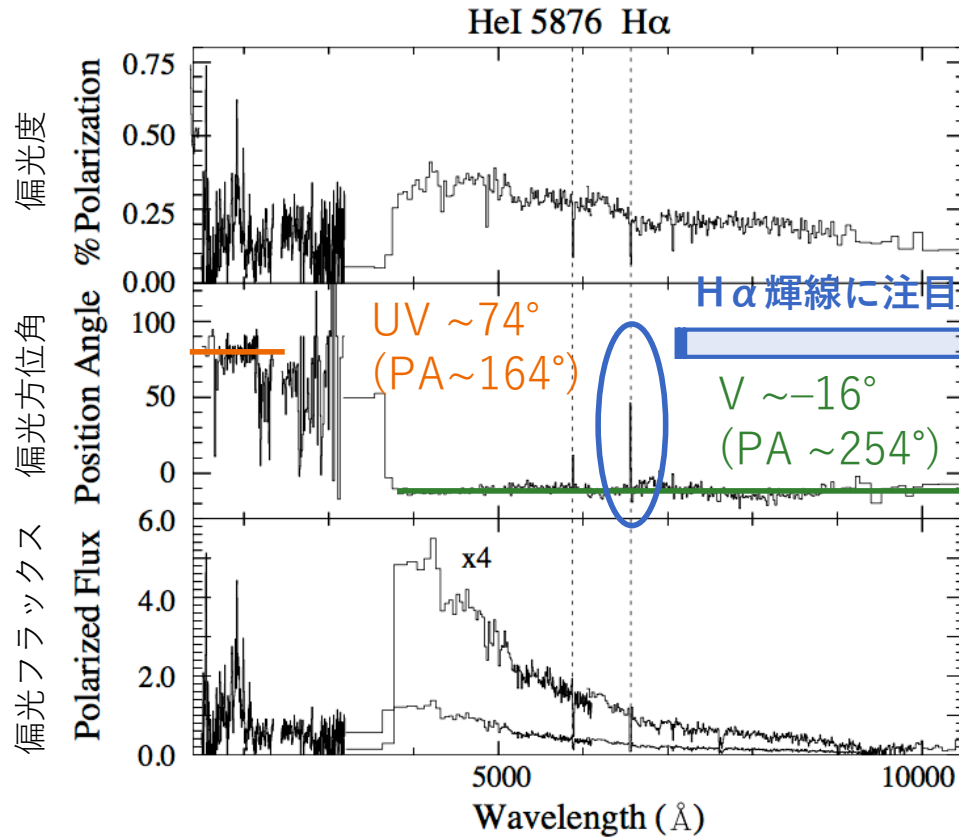
▶ H α 干渉計 (Schmitt et al. 2009)



軌道長半径 = 0.80 ± 0.03 mas
軌道面の方位角 = 245°–262°

双極アウトフローの検出

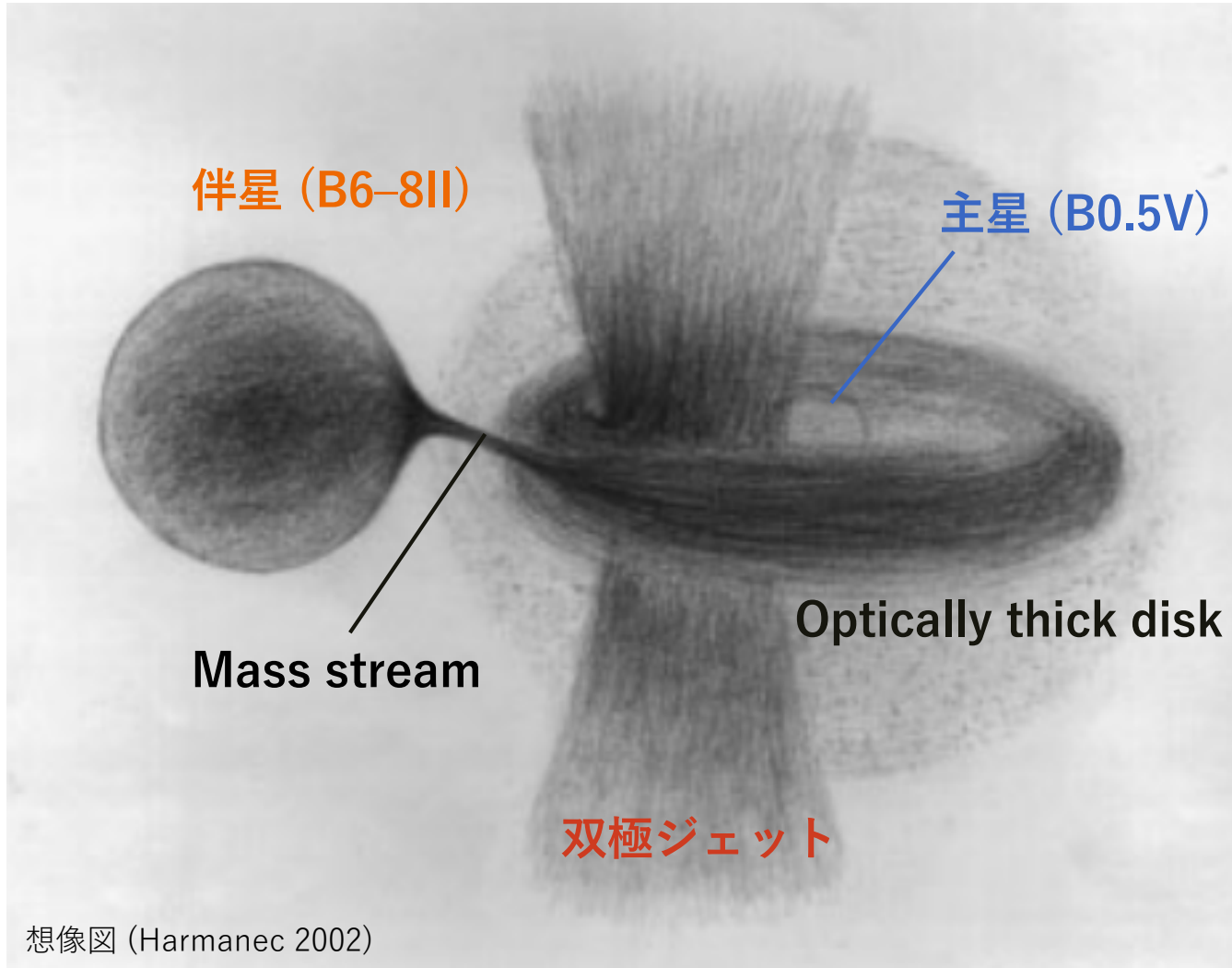
▶ 低分散偏光分光観測 ($\Delta\lambda \sim 8\text{--}16 \text{ \AA}$) (Hoffman et al. 1998; Lomax & Hoffman 2011)



- H α は軌道面と垂直に分布
- UV連続光と同じ方向を示す
- V-連続光に対して90°回転

- 軌道面 (245–255°) と垂直に分布する幾何を検出
- この幾何の候補として、**ジェット**や**双極アウトフロー**が提案されている

現時点で提案されている描像



しかし、双極ジェットについて、

- なぜ可視光連続光とUV連続光やH α の偏光方位角が90度回転しているかの**物理的な描像は謎**
- 干渉計による直接撮像でもジェットのような構造は検出できていない。
- **詳しい幾何構造や運動についても全く明らかになっていない**ため、検出された構造がジェットと言えるかどうかについても合意が得られているとは言い難い



高分散偏光分光観測により**双極ジェットと呼ばれる構造の正体の解明**を目指す

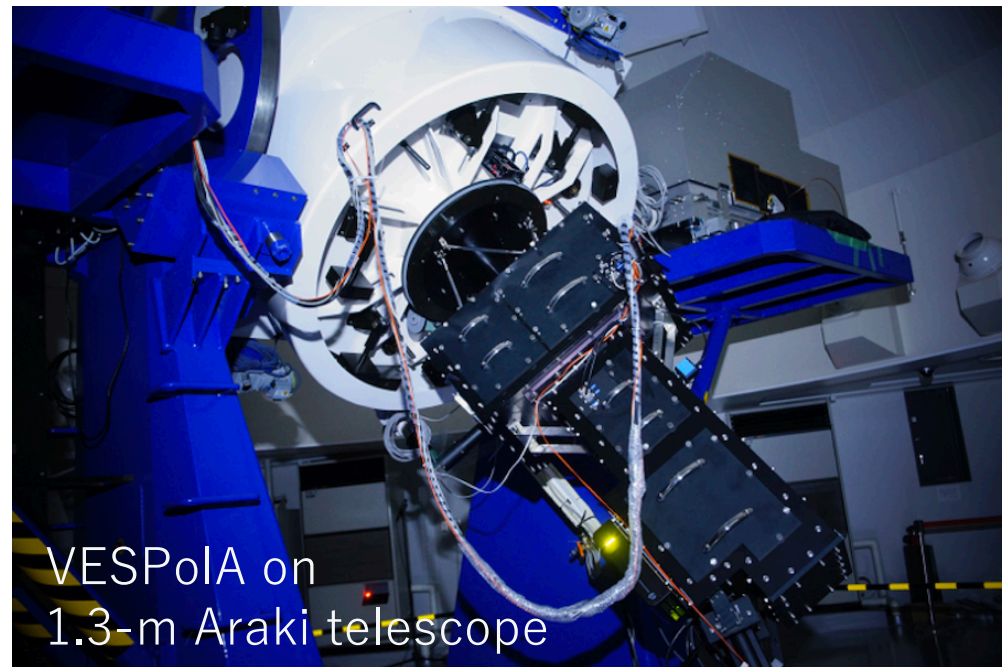
VESPoIA / Araki-telescope

Very precious Echelle Spectro-Polarimeter on Araki-telescope

(Arasaki et al. 2015, PASJ, 67, 35)

特徴

- 高波長分解能 ($R \sim 8000$)かつ高偏光決定精度 ($\delta P < 0.1\%$)で複数成分を一度に取得できる
- 小口径望遠鏡 (神山天文台 1.3m-荒木望遠鏡)を主力望遠鏡とすることで、変光星や突発天体等の時間変動する天体のモニター観測が可能



VESPoIA on
1.3-m Araki telescope

項目	仕様
波長分解能	$R \sim 8,000$ ($\sim 1 \text{ \AA}$ or $\sim 37 \text{ km/s}$ at $H\alpha$)
波長範囲	$\lambda = 400 - 850 \text{ nm}$ ($\delta\lambda > 150 - 250 \text{ nm}$)
偏光決定精度	$\delta P < 0.1\%$
限界等級 ($\delta P < 0.1\%$, 4 h)	$M_V = 7.8 \text{ mag}$

京都産業大学 神山天文台

北緯 $35^\circ 04' 13''$

東経 $135^\circ 45' 29''$

高度 162 m



観測のまとめ

観測のまとめ (# β Lyrの公転周期 ~12.94日)

UT Data	JD – 2,400,000	$T_{\text{exp.}}$ [sec x set]	Phase	v_{H} [km/s]	Calibrator
2013 Aug. 9	56514.10208	100 x 4	0.389	–8.22	ζ Peg (UP, GT)
2013 Aug. 10	56515.09410	100 x 3	0.465	–8.46	χ Her (UP), 55 Cyg (SP)
2013 Aug. 11	56516.09306	100 x 3	0.543	–8.70	ζ Peg (UP)
2013 Aug. 12	56517.09722	100 x 3	0.620	–8.94	ζ Peg (UP)
2013 Aug. 13	56518.10000	100 x 3	0.698	–9.18	ζ Peg (UP, GT)
2013 Aug. 14	56519.10278	100 x 3	0.775	–9.41	ζ Peg (UP)
2013 Aug. 15	56520.09097	100 x 3	0.851	–9.64	
2013 Aug. 16	56521.10185	100 x 3	0.930	–9.86	ζ Peg (UP)
2013 Aug. 17	56522.11181	100 x 3	0.009	–10.07	ζ Peg (UP), ϕ Cas (SP)
2013 Aug. 18	56523.10347	100 x 3 + 60 x 3	0.084	–10.30	ζ Peg (UP), β Cas (GT)
2013 Aug. 19	56524.09444	60 x 3	0.161	–10.52	
2013 Aug. 20	56525.08715	30 x 4	0.237	–10.74	ζ Peg (UP), 55 Cyg (SP)
2013 Aug. 21	56526.09861	30 x 4	0.316	–10.95	
2013 Aug. 22	56527.11979	30 x 4	0.390	–11.13	β Cas (UP)

$T_{\text{exp.}}$: 積分時間 (sec)。1 setは4方位法 (半波長板の方位角を 0度 \rightarrow 45度 \rightarrow 22.5 \rightarrow 67.5度の順に観測) を示す。

Phase: 各観測の位相はAk et al. 2007より計算。

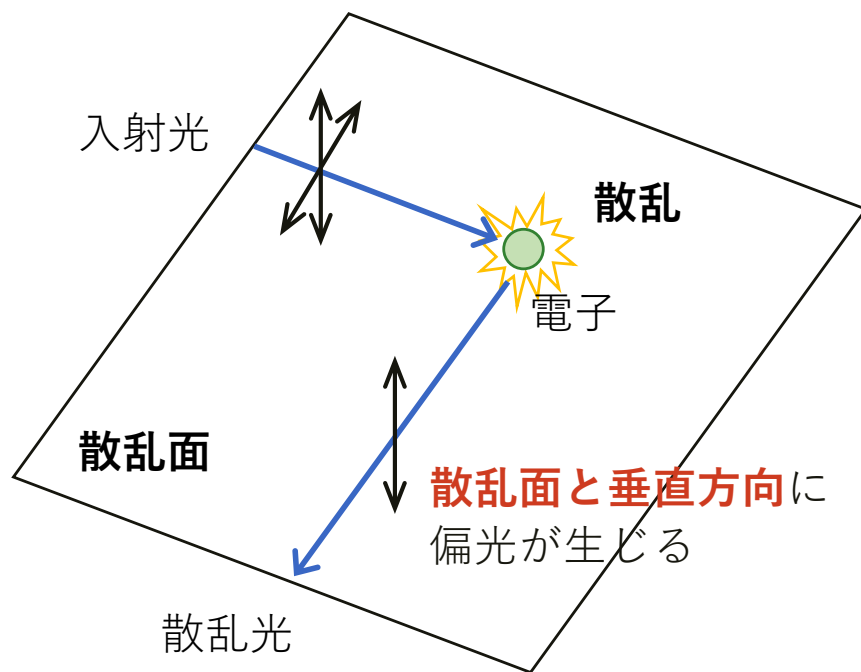
v_{H} : heliocentric velocity (太陽中心の速度への補正)

Calibrator: 機械偏光補正用の標準星

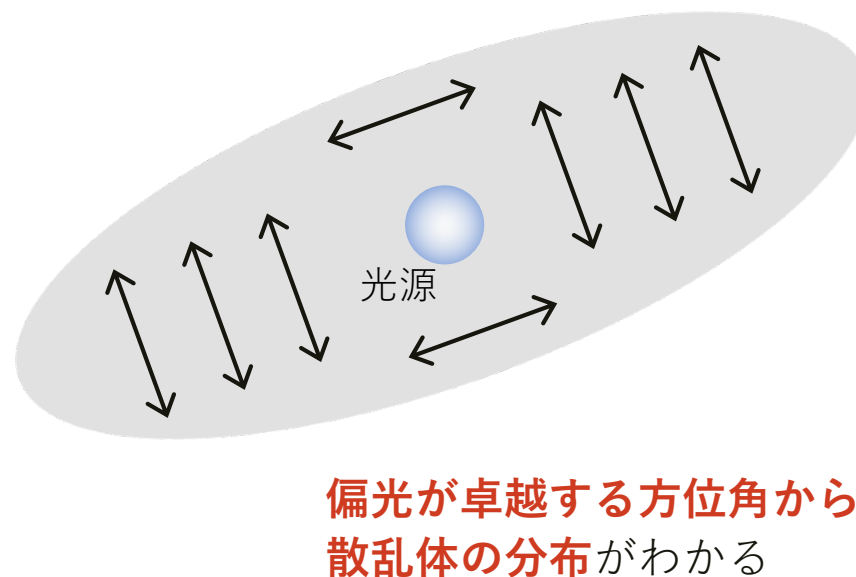
- UP: 無偏光標準星 (Unpolarized standards)
- SP: 強偏光標準星 (Strong polarized standards)
- GT: a Glan-Taylorプリズムによる、完全偏光スペクトル

偏光観測でわかること

光散乱による偏光



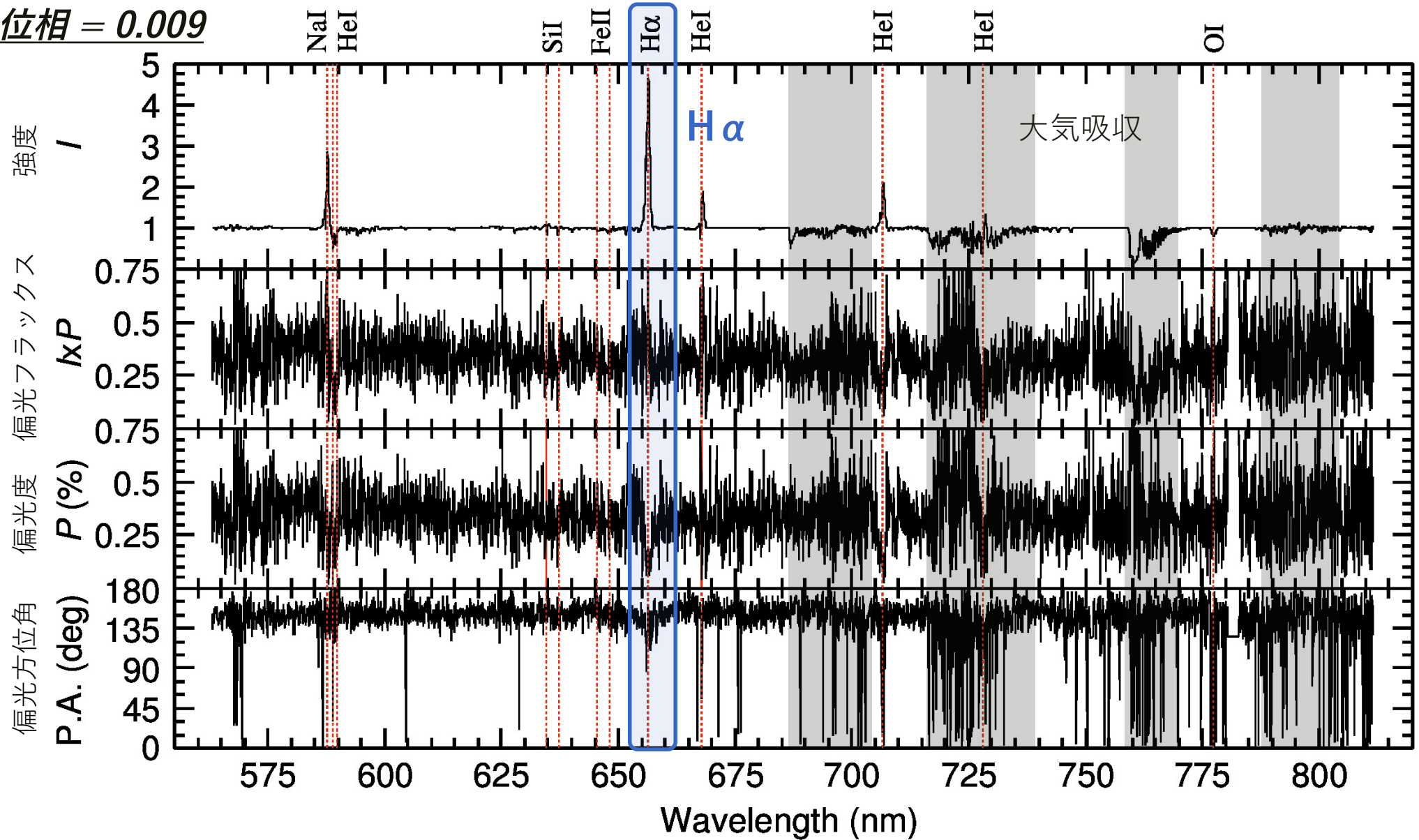
非一様に分布する散乱体による偏光



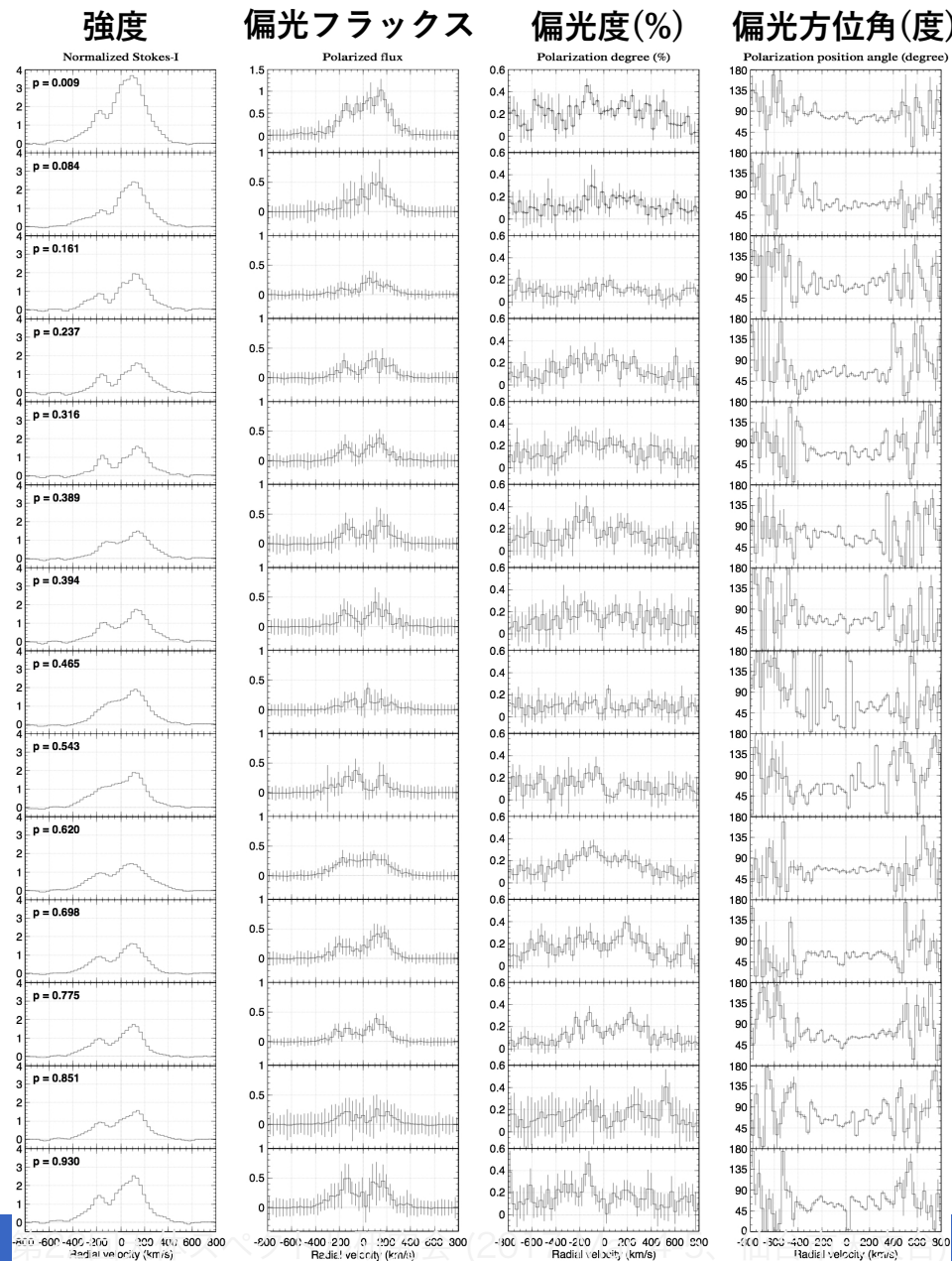
- **偏光観測** : 撮像観測などで直接的に空間分解できない**恒星近傍の細かい構造や小規模な構造を分解**できる
- **高分散分光観測** : **ガス成分ごとの速度場情報**が得られる

観測結果

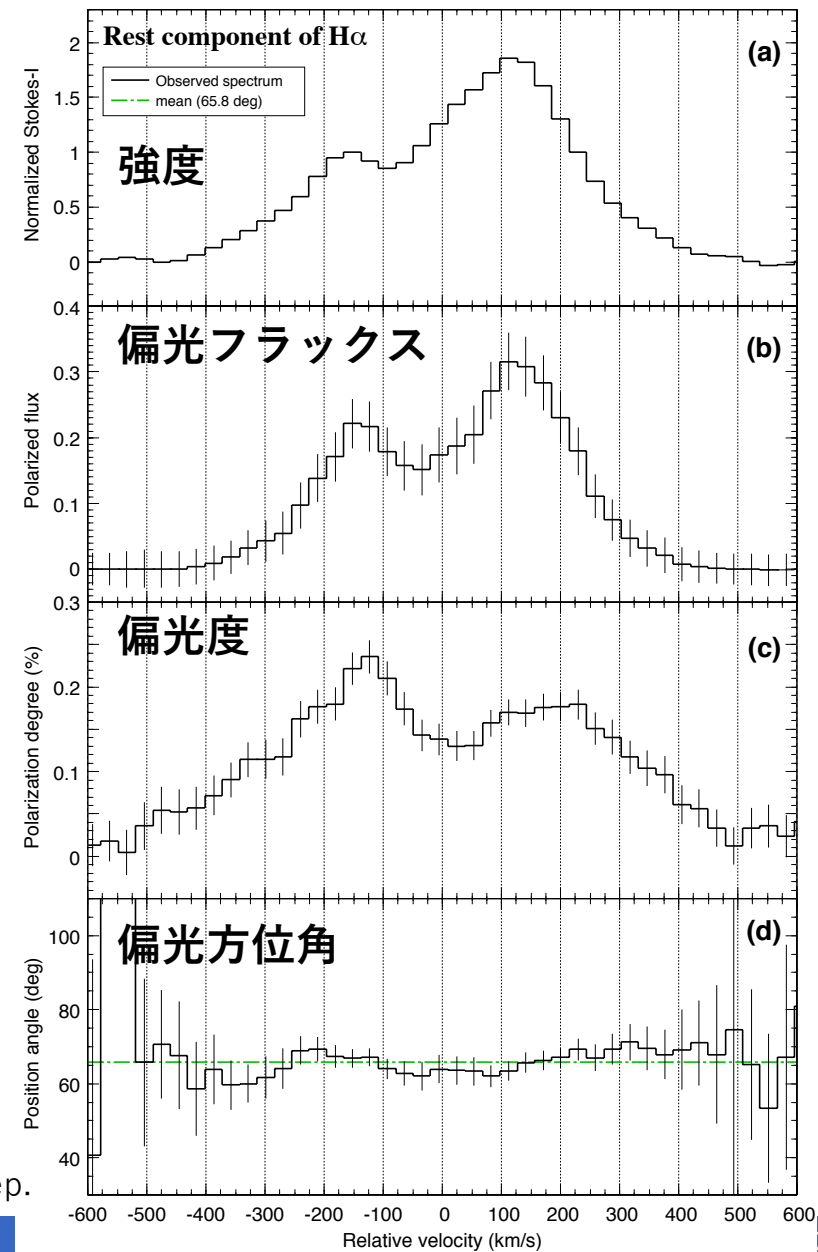
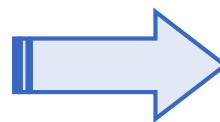
位相 = 0.009



H α の静止成分の抽出

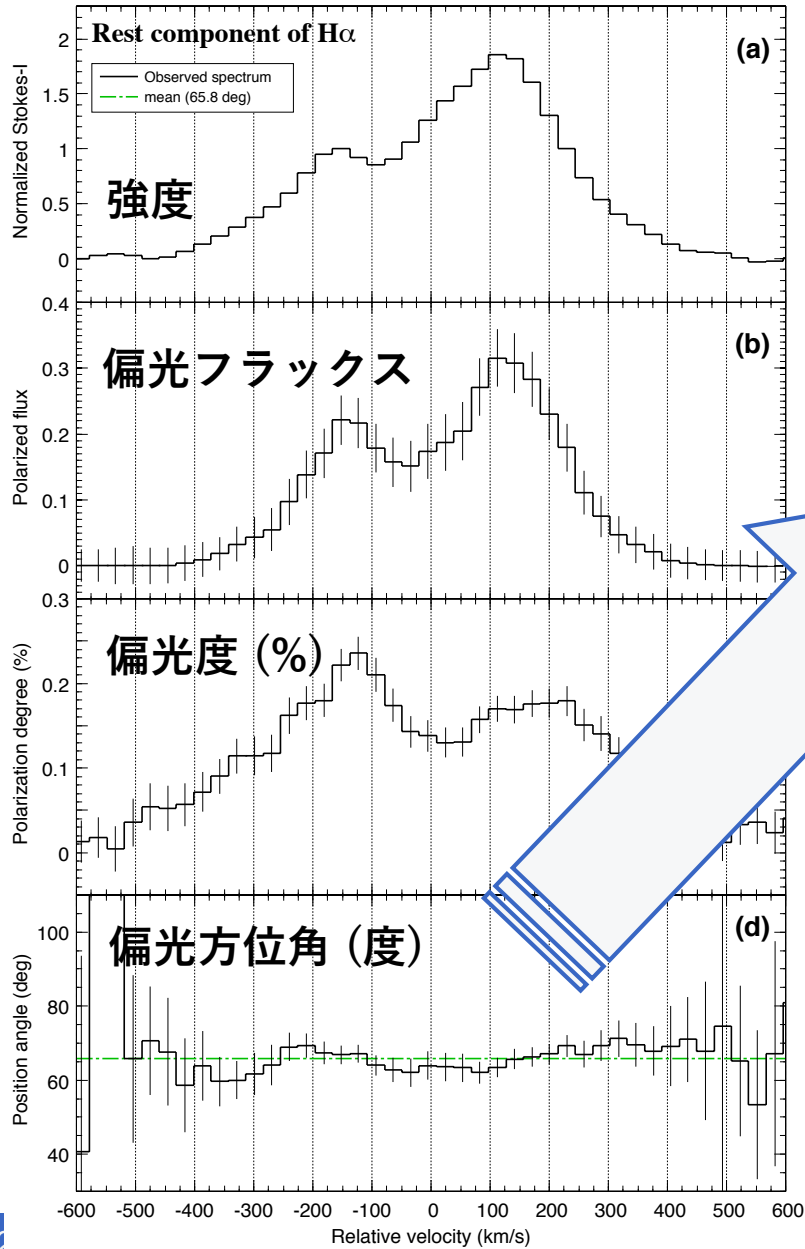


H α の静止成分
を抽出



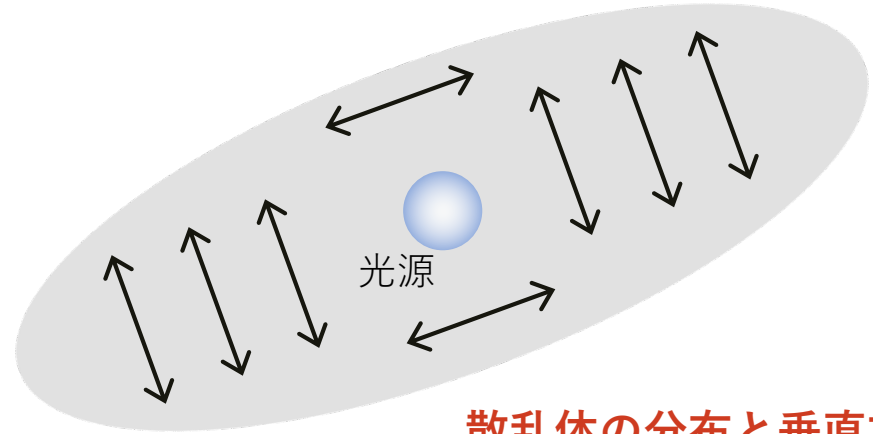
Shinnaka et al., in prep.

H α 放射源の推定



1) 偏光方位角

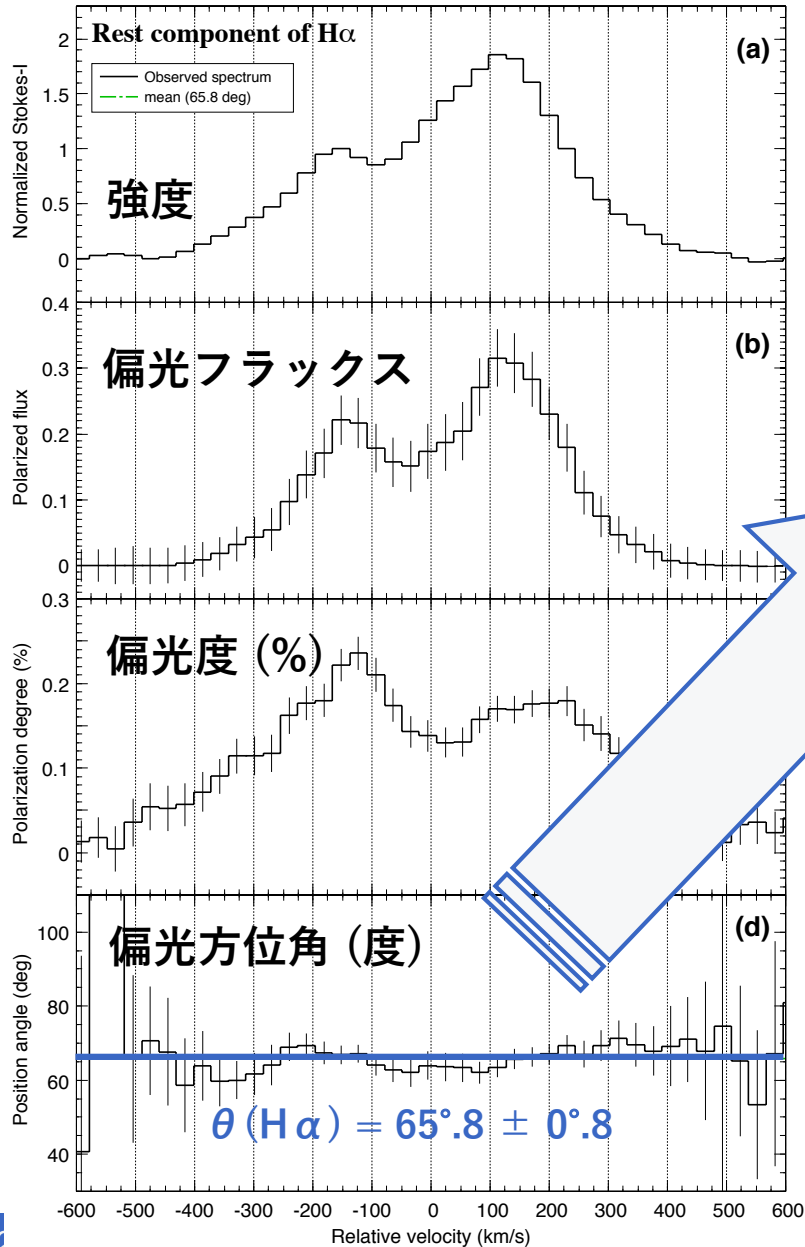
非一様に分布する散乱体による偏光



散乱体の分布と垂直方向の偏光が卓越

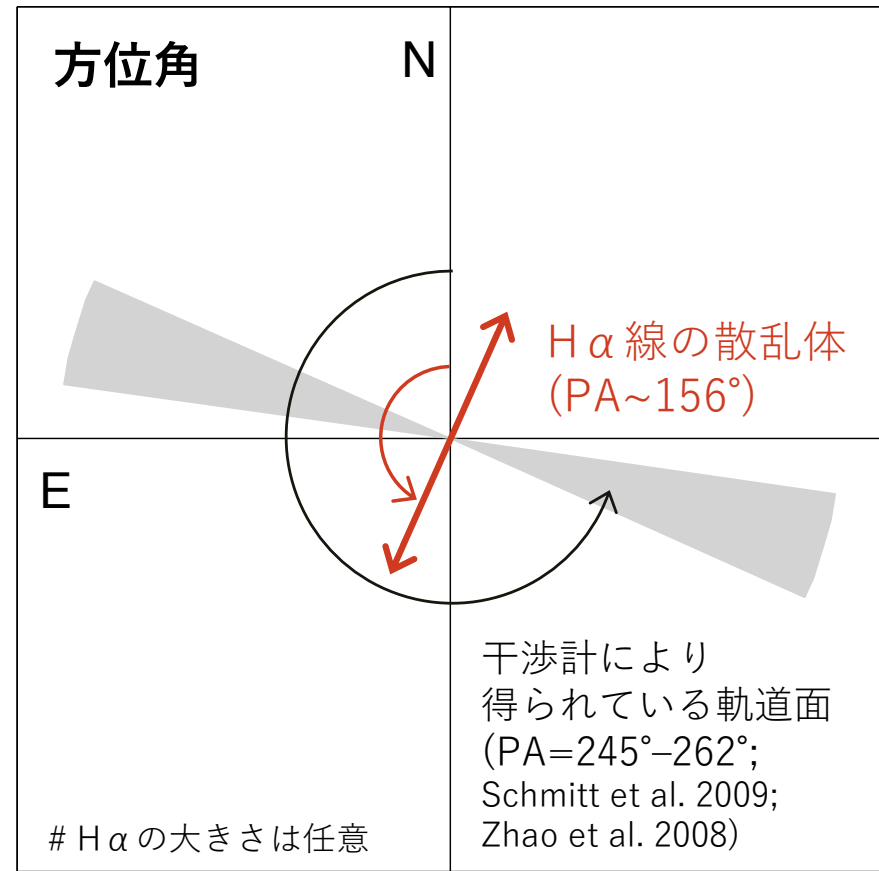
Shinnaka et al., in prep.

H α 放射源の推定



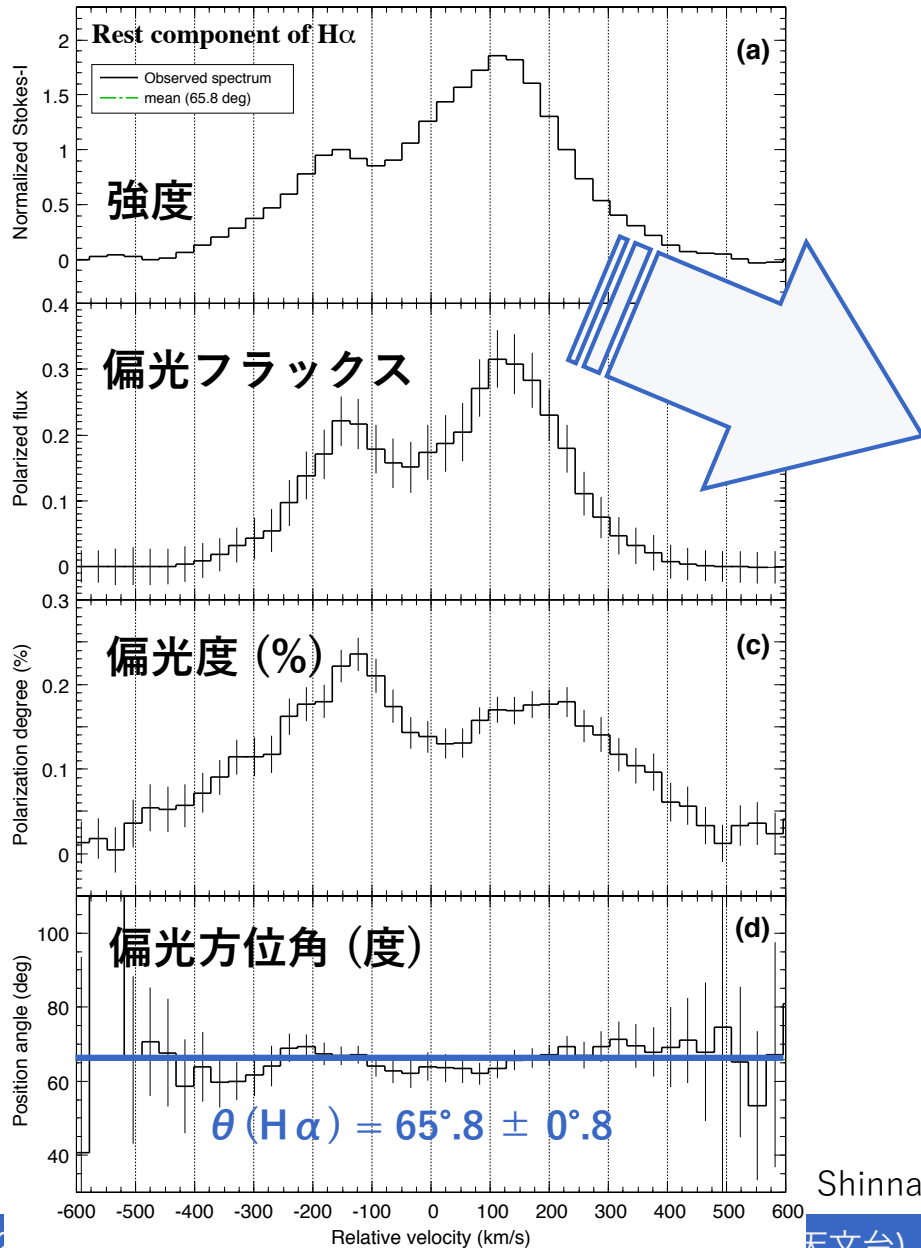
1) 偏光方位角

- あらゆる速度で**偏光方位角 $\sim 66^\circ$**
 \rightarrow H α 線の散乱体は**軌道面と垂直 (156°)**に分布



Shinnaka et al., in prep.

H α 放射源の推定

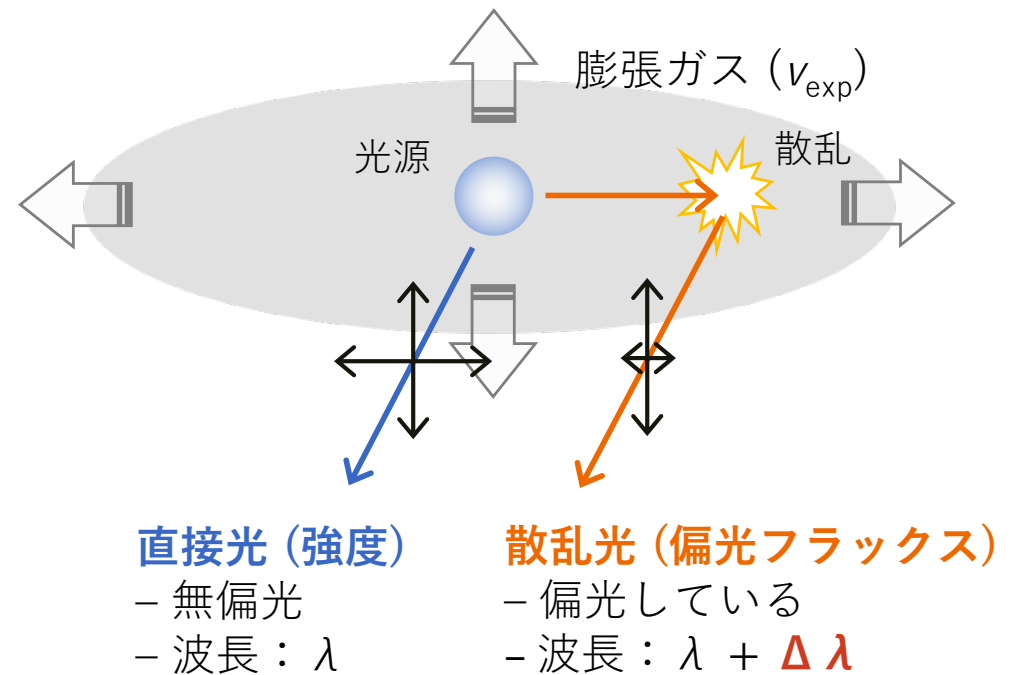


1) 偏光方位角

- あらゆる速度で偏光方位角 $\sim 66^\circ$
 \rightarrow H α 線の散乱体は軌道面と垂直 (156°) に分布

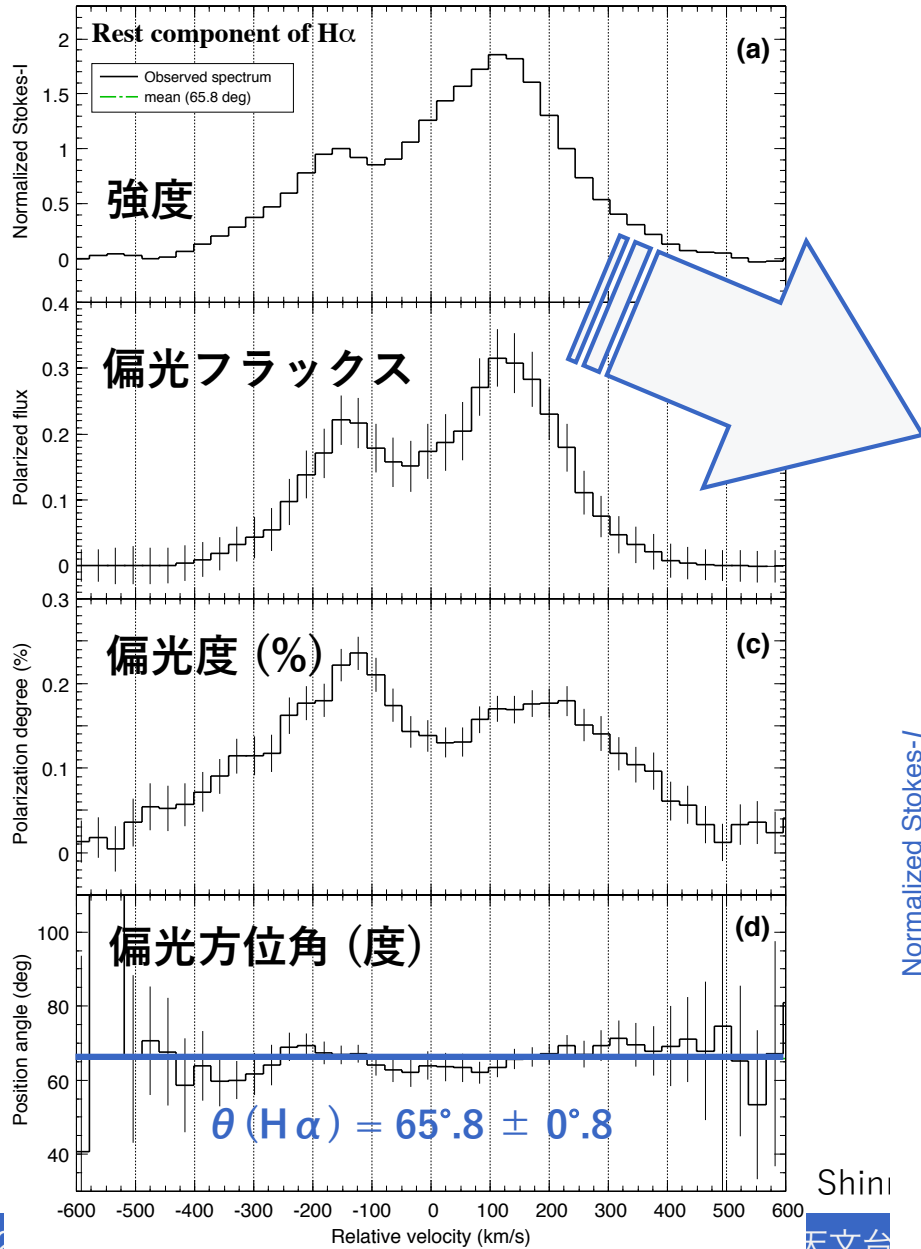
2) 強度と偏光フラックス

散乱体が膨張運動する場合



Shinnaka et al., in prep.

H α 放射源の推定

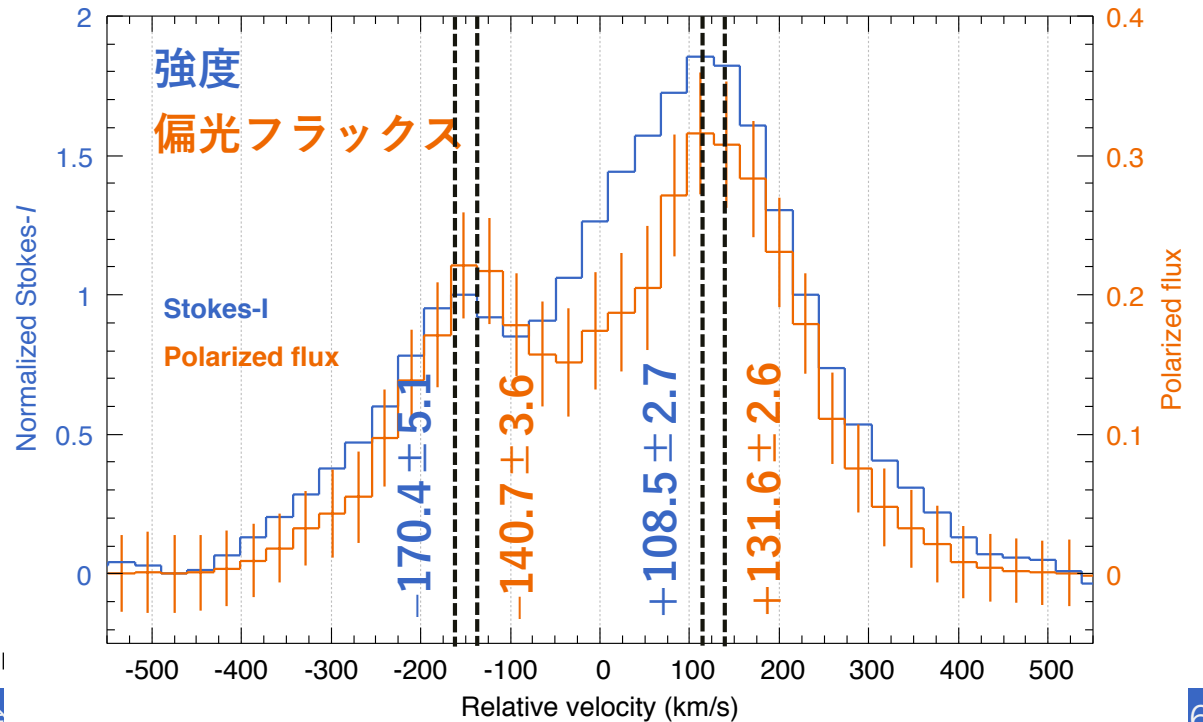


1) 偏光方位角

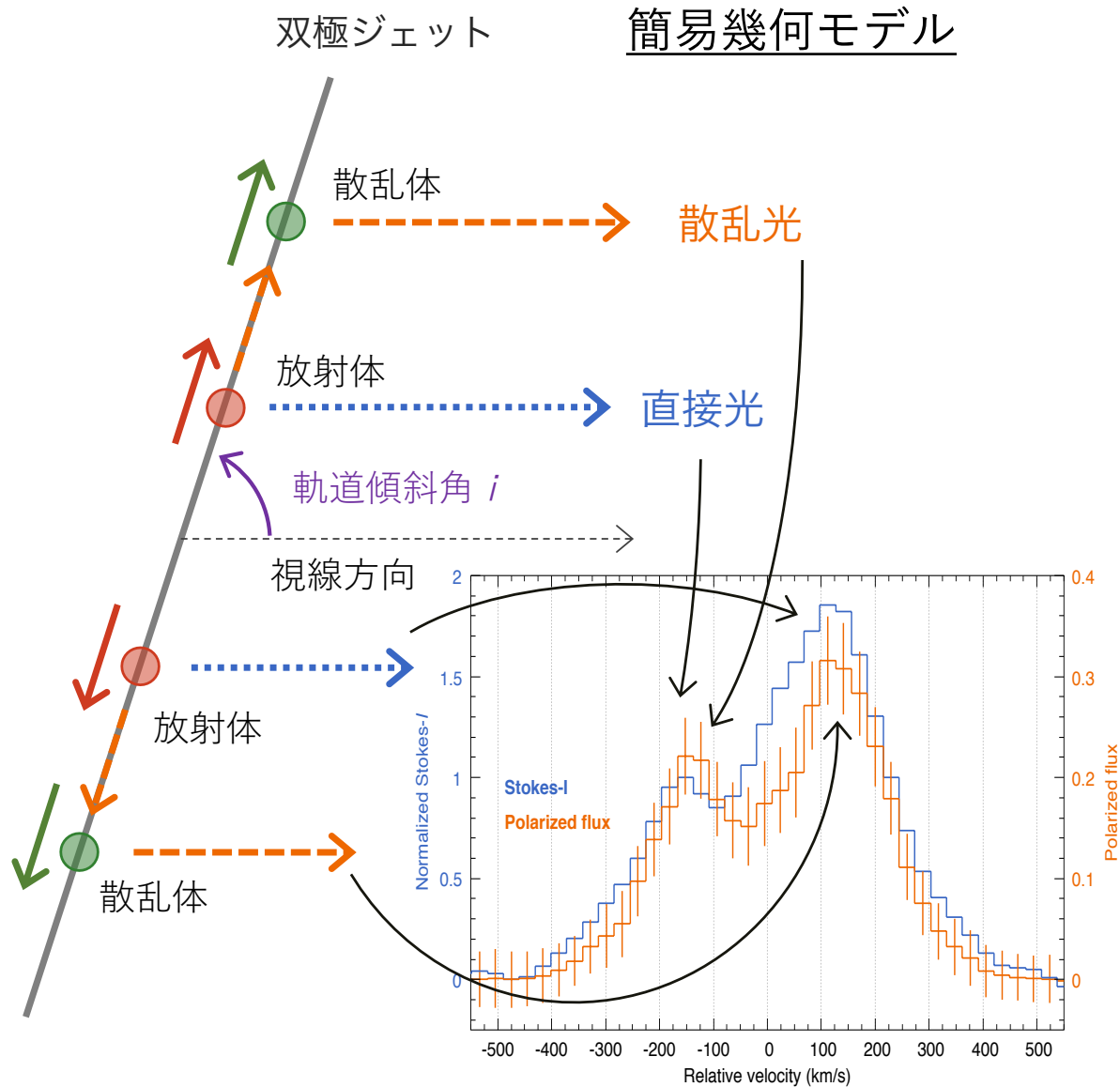
- あらゆる速度で**偏光方位角 $\sim 66^\circ$**
 → H α 線の散乱体は**軌道面と垂直 (156°)**に分布

2) 強度と偏光フラックス

- ダブルピーク → **2つ以上の速度成分**
- 偏光フラックスが全体的に**赤方偏移**
 → 散乱体が中心から**膨張運動**



H α の幾何と速度場の推定



モデルの仮定

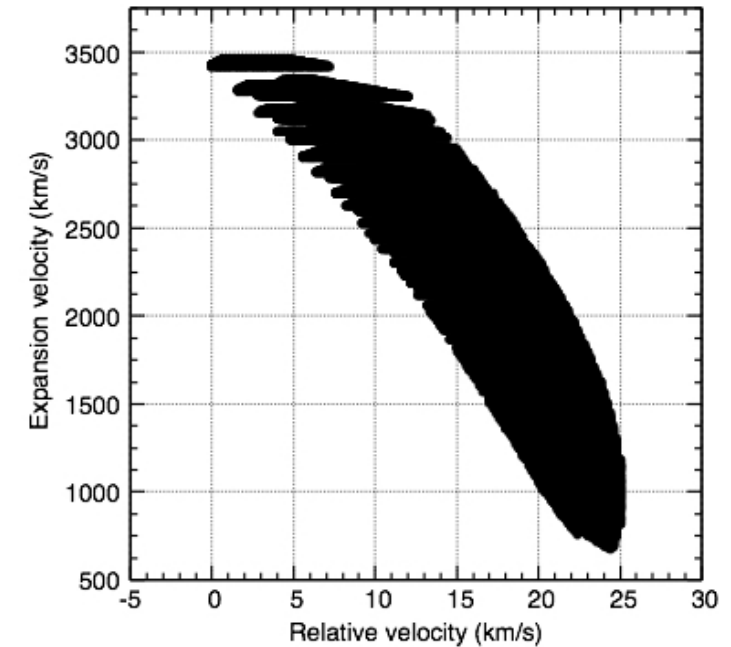
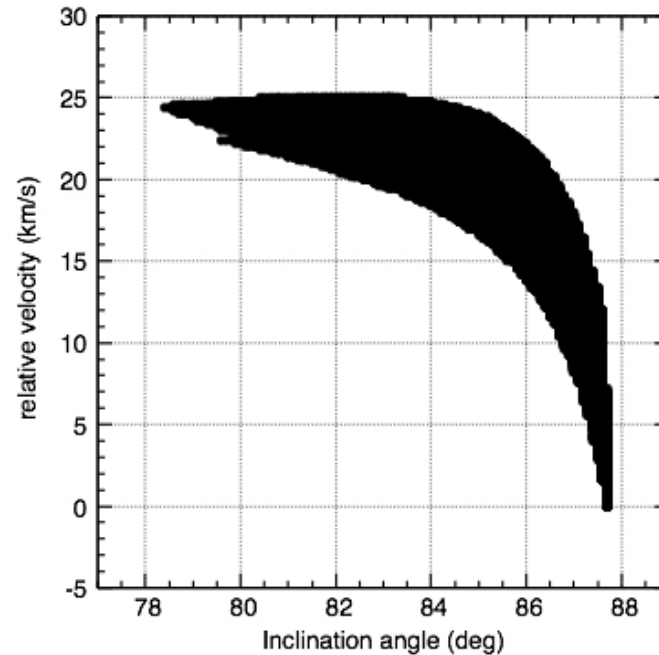
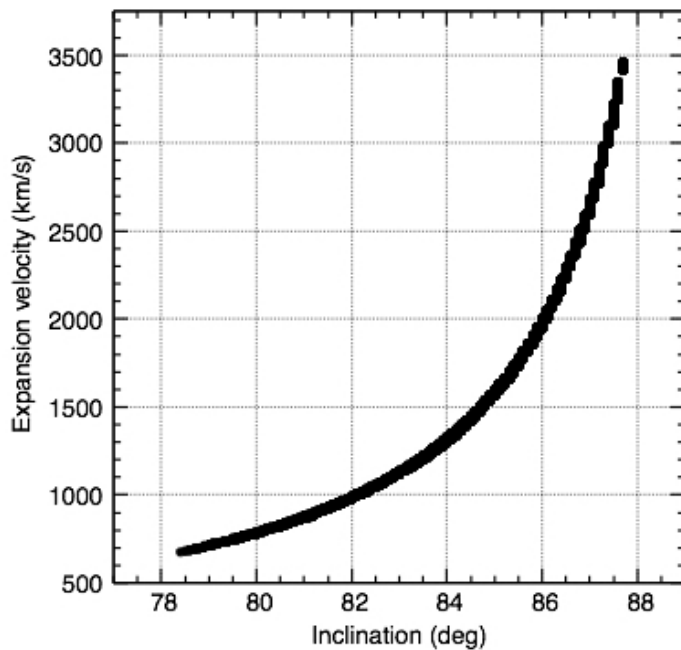
- 双極ジェットは軌道面と垂直に分布
- 放射体及び散乱体は動径方向に膨張運動
- アウトフローは光学的に薄い
(散乱光は1回散乱のみで生じる)

パラメータ

1. i : 放射体の軌道傾斜角 [$^{\circ}$]
($\pm 90^{\circ}$, 1° 刻み)
2. v_{exp} : 膨張速度 [km/s]
(0–10,000 km/s, 5 km/s 刻み)
3. Δv_{exp} : 加速度 [km/s]
(0–200 km/s, 1 km/s 刻み)

直接光は強度、
散乱光は偏光フラックスとみなし、
観測を再現する範囲を数値的に求める

計算結果



Shinnaka et al., in prep.

得られた各パラメータの範囲

- 軌道傾斜角 : $i = 78^\circ - 88^\circ$
- 膨張速度 : $v_{\text{exp}} = 670 - 3500 \text{ km/s}$
- 加速度 : $\Delta v_{\text{exp}} < 25 \text{ km/s}$

膨張速度と加速度は初導出

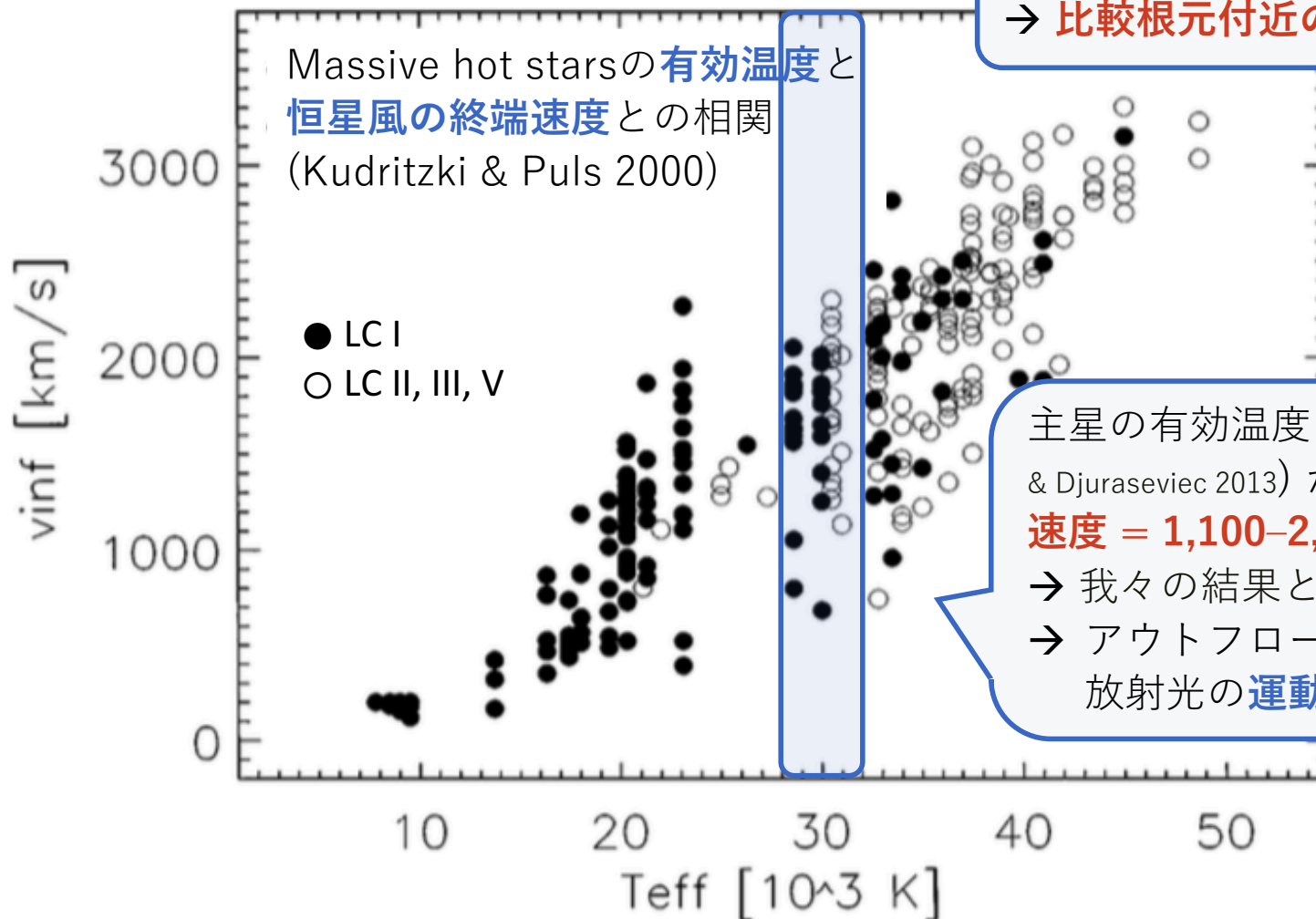
先行研究の範囲 ($83^\circ - 88^\circ$) と一致

参照: Wilson (1974); Hubeny & Plavec (1991);
Linnel et al. (1998, 2000); Zhao et al. (2009);
Mennickent & Djurasevic (2013)

議論

放射体の膨張速度： $v_{\text{exp}} = 670 - 3500 \text{ km/s}$

散乱体の加速度： $\Delta v_{\text{exp}} < 25 \text{ km/s}$

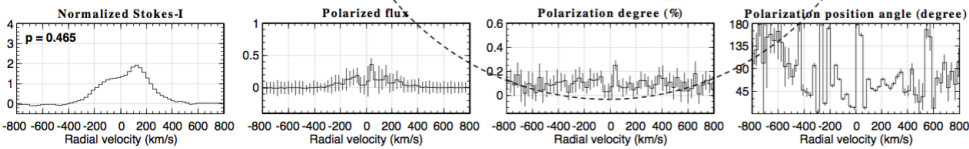
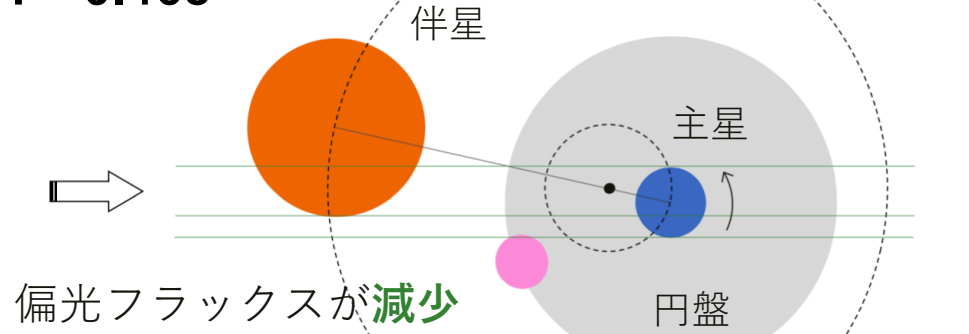


散乱体は放射体に対して**加速膨張**
 → **比較根元付近の加速している領域**

主星の有効温度 ($T=30,000 \pm 2,000 \text{ K}$; Mennickent & Djurasevic 2013) から推定される大質量星の**終端速度 = 1,100–2,300 km/s** (Kudritzki & Puls 2000)
 → 我々の結果と**矛盾しない**
 → アウトフロー中の散乱体の光吸収による放射光の**運動量の移動**で説明可能

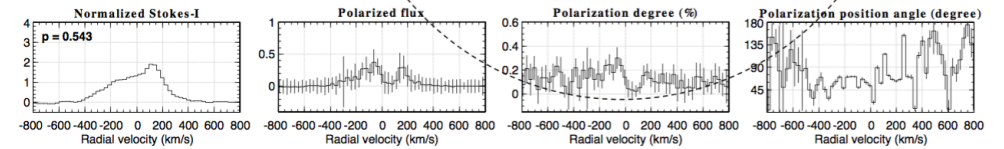
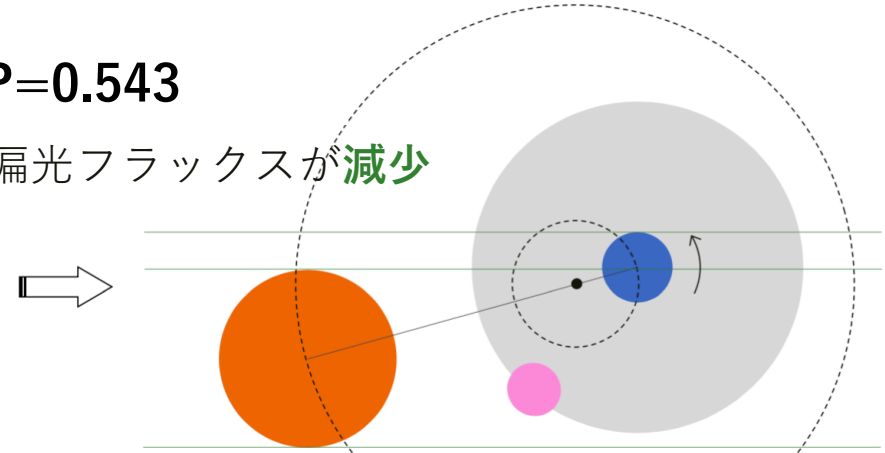
議論

$P=0.465$



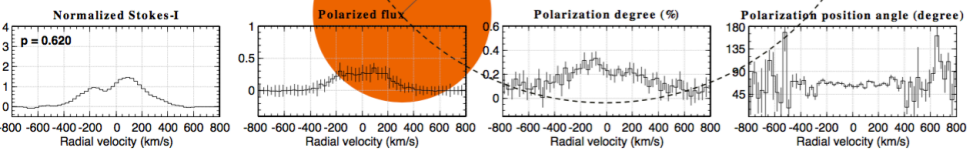
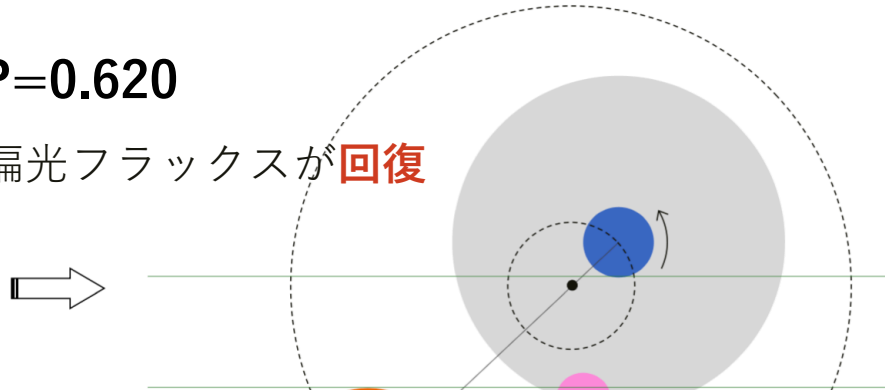
$P=0.543$

偏光フラックスが**減少**



$P=0.620$

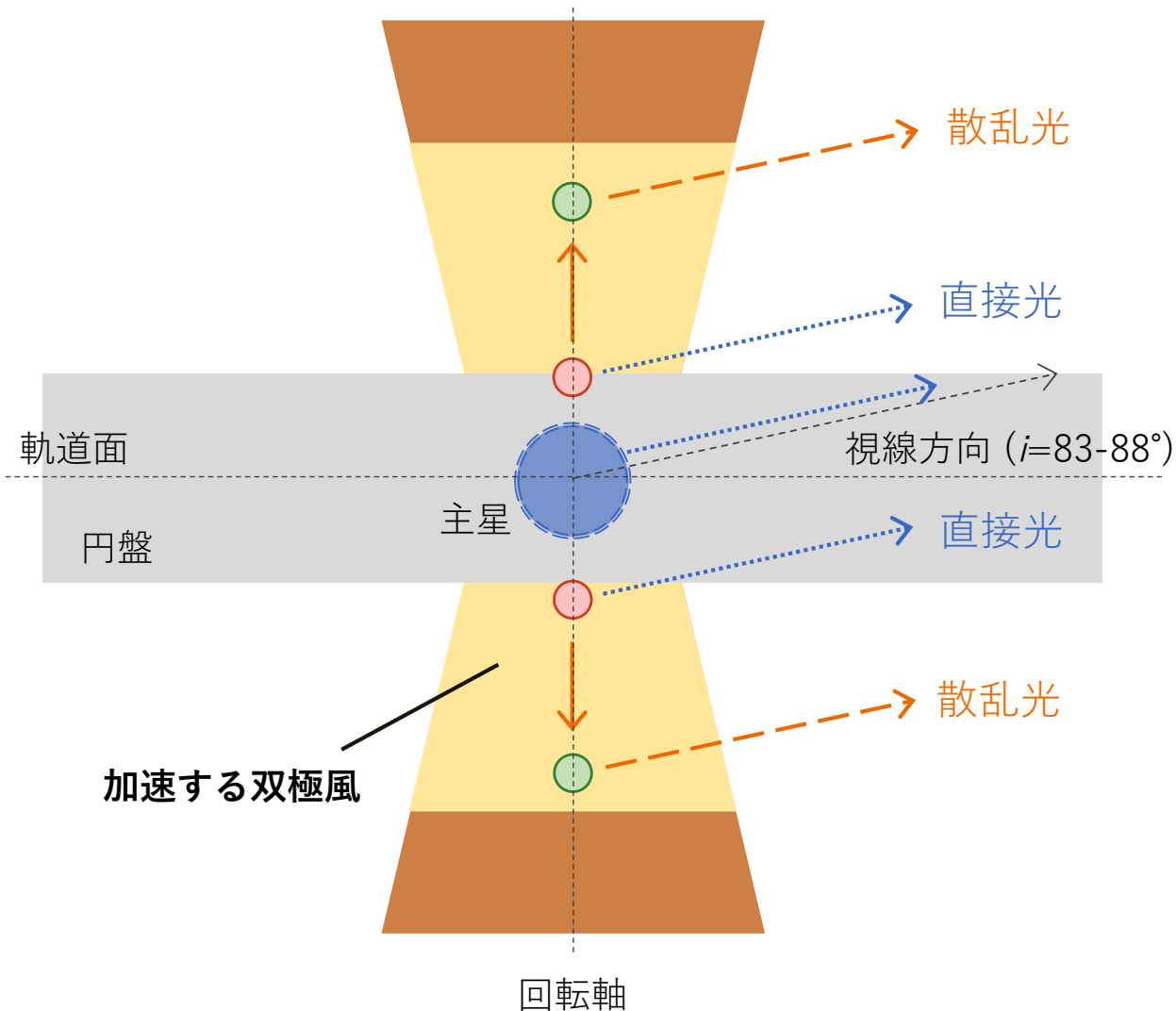
偏光フラックスが**回復**



- $P=0.465, 0.543$ において偏光フラックスが減少
 - 散乱源は伴星直径以下の幅
 - 主星付近に存在
- ➡ ジェットというよりは**恒星風??**

まとめと今後の展望

真横から見た主星と星周幾何



今回の観測により得られた 双極アウトフローの幾何のまとめ

- **主星近傍**に位置する
- **加速運動**している
→ 放射体の持つ運動量の散乱体への移動のメカニズムで説明可能
- 広がりには**伴星サイズ以下**
→ ジェットというよりは恒星風??

今後の展望

- **H α 線以外** (He I, O I, Si IIなど) についても詳細に解析を行い、**より系統的**な理解へ