

# なゆた望遠鏡MALLSによるBe星 $\delta$ Scorpii、 $\pi$ Aquariiの中分散分光観測

石田 光宏<sup>1†\*</sup>  
<sup>1</sup>横浜市立戸塚高等学校

## Medium resolution Spectroscopic Observations of Be stars $\delta$ Scorpii and $\pi$ Aquarii with the Nayuta Telescope MALLS

Mitsuhiro ISHIDA<sup>1†</sup>  
<sup>1</sup>Yokohama Municipal Totsuka High School,  
2-27-1 Gumizawa, Totsuka-ku, Yokohama-shi, 245-0061, Japan  
<sup>†</sup>mi06-ishida@city.yokohama.jp

(Received 2023 October 31; accepted 2023 November 29)

### 概要

長年、Be星 ( $\gamma$  Cas型変光星)の測光・分光観測が行われているが、星周円盤への角運動量輸送機構 (連星系の場合、伴星の寄与もあるのか) 等、明らかになっていないことも多い。2018年9月から学校天文台にある小口径望遠鏡+低分散分光器を用いて、複数のBe星の分光モニター観測を行った。観測結果より「Be星の伴星が近星点を通過するときの潮汐力で円盤がリング化する」という仮説を立てた(石田 2022, Stars and Galaxies, 5, 10)。これを検証するため、兵庫県立大学西はりま天文台のなゆた望遠鏡を用い、Be星 $\delta$  Scoと $\pi$  Aqrにおいて、それぞれの伴星が近星点を通過した時と後で中分散分光観測を行った。BeSS databaseの解析結果も合わせると、円盤のリング化は見られなかった。学校天文台での観測と合わせると、 $\delta$  Scoの円盤は、有効温度が下がって膨張していると予想され、今後は消滅に向かう可能性がある。 $\pi$  Aqrの円盤は、近星点前後で円盤の有効温度が変化する傾向がある。これらより、Be星の円盤への角運動量輸送機構に、伴星が大きく影響を与えている可能性がある。

### Abstract

Although photometric and spectroscopic observations of Be stars ( $\gamma$  Cas-type variable stars) have been carried out for many years, there are many things that remain unclear, such as the mechanism of angular momentum transport to the circumstellar disk (in the case of binary systems, is there also a contribution from the companion star). Spectroscopic monitoring observations of several Be stars were performed using the Small Aperture Telescope + low-dispersion spectrograph at the school observatory starting in September 2018. As a result, we hypothesized that “the disk is ringed by tidal forces when the Be star’s companion passes through the perihelion point” (石田 2022, Stars and Galaxies, 5, 10). To test this hypothesis, we performed medium-dispersion spectroscopic observations of Be stars  $\delta$  Sco and  $\pi$  Aqr using the Nayuta Telescope at the Nishi-Harima Observatory, University of Hyogo, during and after the periastron passage of their respective companion stars. Combined with the results of the BeSS database analysis, no ring formation of the disk was observed. Combined with the observations at the School Observatory, the disk at  $\delta$  Sco is expected to be expanding due to a decrease in effective temperature, and may be headed for extinction in the future. In the disk of  $\pi$  Aqr, the effective temperature of the disk tends to change around the perihelion. From these results, it is possible that the companion star has a significant effect on the angular momentum transport mechanism of the Be star to the disk.

**Key words:** emission-line—Be Star—optical astronomy—spectroscopic

## 1. Introduction

Be星( $\gamma$  Cas型変光星)は、光度階級がIII-VのB(一部OまたはA)型星のうち、過去に一度でも水素の輝線がみられた星として定義される(野本ほか 2009)。1866年、イタリアの天文学者セッキ神父(P.A. Secchi)が $\gamma$  Casのスペクトル中に水素の輝線を発見した(Secchi 1867)。この星が最初のBe星である。

Be星は変光星であり、爆発型変光星(eruptive variables)

に分類される。数百  $\text{km s}^{-1}$ で自転していることが知られており、赤道周りに星周円盤を作り、そこから水素輝線が観測される(Struve 1931)。円盤の半径は、過去の観測、シミュレーションからおおよそ星半径の10倍程度であることが知られている(Jaschek & Jaschek 1993)。輝線の形は、星の自転軸側から見るとシングルピーク、軸と赤道の間でダブルピーク、赤道側から見るとダブルピークの中心に鋭い吸収線が見られるものとなる(Struve 1931)。Be星はB型星に現れる過渡的現象と考えられており、ある時期には輝線が消失してB型星に戻ることもある(Kogure 1990)。なお、B型星の約10–15%がBe星と見積られている(Merrill 1933)。

\* Last update: August 22, 2019

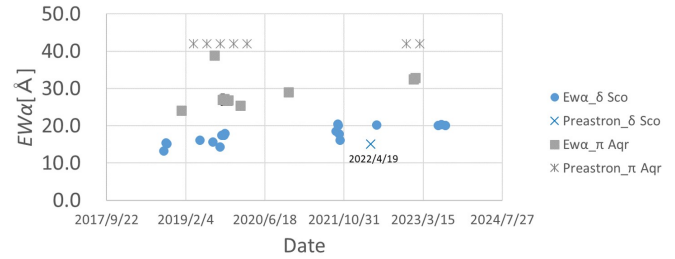
1900年代前半より、様々なBe星において等級、水素をはじめとする様々な原子の輝線強度、等価幅等のモニター観測が行われており円盤の性質、生成・消滅のメカニズムが議論されている。近年のシミュレーションにより、Be星が粘性円盤を形成し、その円盤が中心天体からの質量減少に対応して膨張すること、質量減少が止まると、円盤は徐々に消滅することなどが報告されている(Carciofi et al. 2013)。しかし、中心星からの円盤放出メカニズムや、円盤への角運動量輸送機構(連星系の場合、伴星の寄与あるのか)、中心天体の質量減少のメカニズムなど分かっていないことも多い。

Be連星系に関する研究として、Šteflらは、複数のBe星( $\tau$  Tau, 4 Her,  $\epsilon$  Cap,  $\phi$  Per,  $\psi$  Per,  $\nu$  Gem)においてV/R(輝線ダブルピーク紫[V], 赤[R]強度比)の変動と連星軌道周期との相関を調べ、数天体で良い相関があることを報告した(Štefl et al. 2007)。Pollmann and Vollmann (2014)では、Be星プレオネ(ガス殻星, B8V<sub>ne</sub>)の高分散分光観測で、伴星の近星点(periastron)通過前後でV/Rが変動することが報告された。この現象は、片平順一氏や本田敏志氏の同天体の観測(2013年–2015年)でも確認されており、両氏はperiastron通過後に円盤が元に戻ることから伴星の潮汐力の影響を指摘している(本田, 片平 2018)。

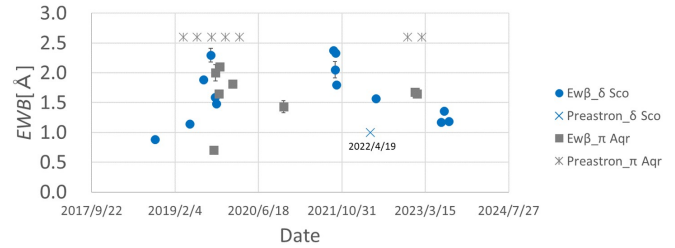
筆者は2018年9月より、勤務校の天文台にある小口径(2018年9月–2020年3月: 30 cm, 2020年4月–現在: 35 cm)望遠鏡 + 低分散分光器Alpy600(中心波長650 nmでの波長分解能 $\sim$ 600)を用いて、水素輝線等価幅に加え、観測の報告が少ないバルマー逓減率(本研究ではH $\alpha$ とH $\beta$ の輝線等価幅の比) $D_{34}$ の変動を調べた。その結果、有意な変動を示すBe星( $\delta$  Sco,  $\pi$  Aqrなど)が見つかり(図1)、それぞれの伴星のperiastron通過時期と照合したところ、 $D_{34}$ はperiastron前で減少傾向、後で増加傾向であることが分かった(石田 2022)。ここから「伴星がperiastronを通過する時に円盤がリング化(i.e. 主に円盤の内側からでるH $\beta$ のEW $\beta$ が小さくなり、 $D_{34}$ が増加する)」という仮説を立てた(石田 2022)。この仮説の検証には、分光器の分解能を上げ、periastron前後で、主に円盤の内側から出るH $\beta$ 輝線の裾の幅が小さくなっていくかを測定する必要がある。

本研究では、石田 (2022)でバルマー逓減率 $D_{34}$ に有意な変動があった $\delta$  Sco,  $\pi$  Aqrの中分散分光観測を行う。それぞれの天体の性質を表1に示す。 $\delta$  Scoは、伴星のperiastron通過時期である2000年に $\gamma$  Cas型の増光をし、B型星からBe星になった天体として知られている(Miroshnichenko et al. 2001)。H $\alpha$ 輝線等価幅(以下EW $\alpha$ 、H $\beta$ も同様)とV等級の長期的な観測により、円盤は2000年から2005年に形成、2005年から2006年に一次消失した後は変動期となり、2010年に直近では最後の円盤形成が起こり、2011年からほぼ定常状態となっていると考えられている(Suffak et al. 2020)。これらの現象が、およそ11年周期でperiastronを通過する伴星の影響であるかは不明(Suffak et al. 2020)であり、2022年のperiastron前後で円盤がどのように振る舞うかは確認されていない。 $\pi$  Aqrは、X線でも明るいBe星( $\gamma$  Cas analog)に分類され、伴星が白色矮星だとすると、X線放射をうまく説明できるという報告がある(Tsujimoto et al. 2023)。また、過去の分光観測により、EW $\alpha$ は1950年から1990年は強く、1996年から2000年に弱くなり、2014年1月にEW $\alpha$ が0になり円盤が消失したが、それ以降は順調に成長していることが報告されている(Naze et al. 2019, 直近のEW $\alpha$ の推移は図1aも参照)。

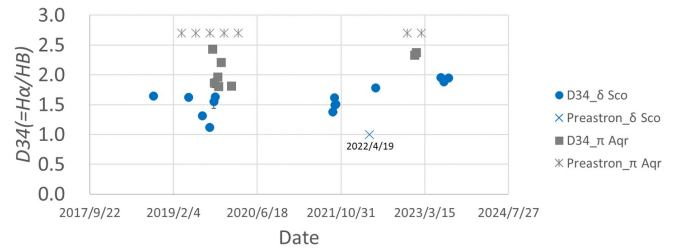
表1に示すように、 $\delta$  Scoの伴星軌道周期、離心率は、多



(a) Plot of EW $\alpha$  and periastron.



(b) Plot of EW $\beta$  and periastron.



(c) Plot of  $D_{34}$  and periastron.

**Fig. 1.** Variations in EW $\alpha$ , EW $\beta$  and  $D_{34}$  of  $\delta$  Sco and  $\pi$  Aqr. The data are the most recent additions to the 石田 (2022). See 石田 (2022) for the calculation method of each physical quantity.

くの観測報告があるプレオネのそれらより大きく、 $\pi$  Aqrでは、逆にプレオネより小さい。軌道要素が異なる天体を分光観測することで、良い比較材料となることが期待される。

## 2. Observations and data reduction

観測は、兵庫県立大学西はりま天文台(兵庫県佐用郡佐用町)で行った。観測装置は、有効口径2m「なゆた望遠鏡」の可視光中低分散分光器Medium And Low-dispersion Long-slit Spectrograph (MALLS)である。MALLSは波長分解能 $\sim$ 7500(中心波長550 nm, スリット幅1''.2)であり、設定は、スリット幅が0''.8、Gratingが1800 l mm<sup>-1</sup>、観測波長域がH $\alpha$ , H $\beta$ (一部, Mg I)中心から400 Åの範囲である。観測は、天体の伴星がperiastronを通過する時とperiastronから離れた時期に行った。観測ログを表1に示す。解析には、天体画像処理ソフトウェアIRAFを使用し、一次処理(ダーク引き、フラット補正、一次元化、波長校正、規格化)を行った。処理したデータを、Microsoft Excelに出力し、各輝線のピーク強度(ダブルピークの場合、R側かV側で大きい方)、ピーク強度が半分になる波長を読み取り、半値幅(Full Width at Half Maximum, FWHM)を測定した。当初、ガウシアン関数などでのフィッティングを想定したが、輝線

の形が複雑であったため、前述の手法をとった。ただし、ダブルピークの強度差が大きい輝線は、測定不可であった。

### 3. Observation Result

#### 3.1. Nayuta Telescope

「なゆた望遠鏡(以下なゆた)」で得られたスペクトルをそれぞれ図2( $\delta$  Sco)、図3( $\pi$  Aqr)に示す。

$\delta$  Scoに関して、periastron通過時と通過後で、 $H\alpha$ 線、 $H\beta$ 線のFWHMに大きな変化はなかった(図6a)。一方、スペクトルの強度や形状に変化があり、 $H\alpha$ は輝線強度が減少しており、 $H\beta$ はダブルピークからシングルピークに近い形となっていた。 $H\alpha$ 線、 $H\beta$ 線の中心波長がシフトしていたり、スペクトルの形状に変化が見られる点は、過去の観測でも報告されている(e.g. Suffak et al. 2020、図4も参照)。中心波長のシフトは、 $\delta$  Scoの公転運動によるもので、伴星の軌道周期とおおよそ連動している(図4a, b)。V/Rの変動を含めたスペクトルの形状変化は、伴星の影響も大きいと予想されるが、説明には、詳細なモデルが必要である(Suffak et al. 2020)。図2cと図3cは、 $H\beta$ の撮像の際に同時に含まれている5016 ÅのHe I輝線で、過去の報告例が少ないものである(He I輝線で、過去に報告が多かった6678 Åは、今回連続成分に埋もれていた。5876 Åは、観測波長の範囲外)。2回の観測ともダブルピークとなっており、輝線強度は2回目の観測で増加していた。

$\pi$  Aqrに関して、FWHMは $\delta$  Sco同様、大きな変化はなかった(図6b)。スペクトルの強度や形状に関しては、 $H\alpha$ は大きな変化はなかったが、6564 Å付近の吸収線が2回目の観測で深くなっていた。 $H\beta$ はダブルピークのV強度が上昇し、R強度が減少した。He Iは2回の観測で見えておらず、5167 ÅのMg I(おそらく5166 ÅのFe Iもブレンドされている)は2回の観測で大きな変化はなかった。

#### 3.2. Analysis of BeSS database

観測期間以外でのFWHMの変動を探るため、Be星のアーカイブデータが多数存在するBe Star Spectra database(以下BeSS)<sup>1</sup>からもスペクトルデータを取得した。データを選ぶ条件は、波長分解能が同じもの、なるべく同一観測者によるものとした。データ一覧を表2、表3にそれぞれ示す。解析手法は、なゆたで得られたスペクトルと同様である。

$\delta$  Scoに関して、前回のperiastron(2011.7.3)からおよそ10年間にわたるスペクトルを図4に示す。また、 $\pi$  Aqrは条件に合うデータが少なかったが、periastronとそこから離れた日のスペクトル過去2周期分を図5に示す。

## 4. Discussion

#### 4.1. $\delta$ Sco

なゆたとBeSSによるFWHMの測定結果を図6aに示す。10年スケールで見ると $H\alpha$ 輝線、 $H\beta$ 輝線ともにperiastron(2011年)から離れると減少し、次のperiastron(2022年)に近づくと増加する傾向が見られた。これは、2011年のperiastron通過時を中心に観測していたAhmad et al. (2015)らの結果と調和する。これより、円盤がケプラー回転していると考え、periastronに近い時期ほど、円盤の密

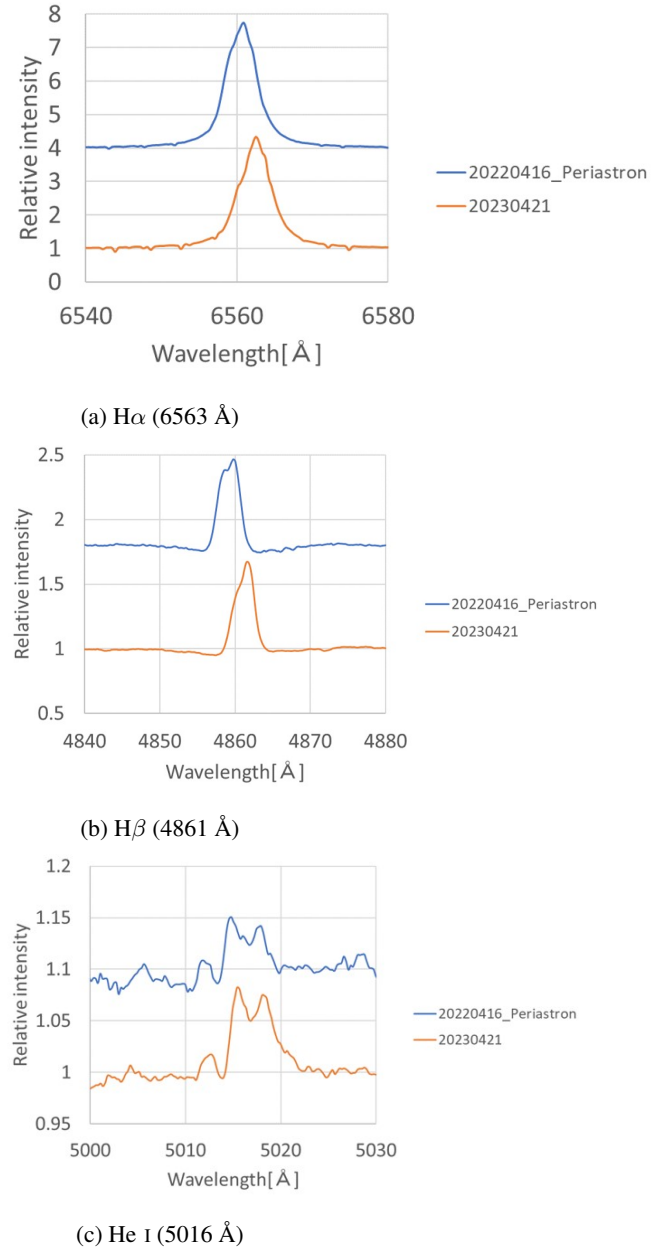


Fig. 2. Spectra of  $\delta$  Sco obtained with the Nayuta telescope.

<sup>1</sup> BeSS database (<http://basebe.obspm.fr/basebe/>)

**Table 1.** Characteristics of Targets & Observation log.

Object	$\delta$ Sco	$\pi$ Aqr
V [mag]	1.59–2.32 <sup>a</sup>	4.42–4.87 <sup>a</sup>
Spectral type	B0.3IVe <sup>b</sup> + B1–3V <sup>c</sup>	B1III–IVe <sup>d</sup>
Companion star type	main sequence star <sup>c</sup>	white dwarf star <sup>d</sup>
Orbital period of companion star	10.8092 ± 0.0005 yr <sup>d</sup>	84.07 ± 0.02 d <sup>e</sup>
Periastron epoch	2000.9.15, 2011.7.3 <sup>f</sup>	1996.8.23 <sup>e</sup>
Eccentricity	0.9403 ± 0.008 <sup>e</sup>	very small or absent <sup>g</sup>
Observation date1	2022.4.16 <sup>p</sup>	2023.8.8–9 <sup>p</sup>
Observation date2	2023.4.21–22	2023.9.12
Exposure time	5 s	30 s
Number of obtained frames	5	5

(p) periastron

(a) aavso (<https://www.aavso.org/>)

(b) Balona and Dziembowski (1999)

(c) Miroschnichenko et al. (2013)

(d) Tsujimoto et al. (2023)

(e) Slettebak (1982)

(f) Meilland et al. (2011)

(g) Bjorkman et al. (2002)

**Table 2.** List of BeSS database ( $\delta$  Sco)

Observations date	Observer
2011.7.14 (periastron)	Thierry GARREL
2012.5.12	Thierry GARREL
2013.5.11	Thierry GARREL
2015.4.12	Christian Buil
2017.4.9	Olivier GARDE
2019.6.12	Olivier GARDE
2020.8.14	Olivier GARDE

Spectral resolution  $\sim$  11000**Table 3.** List of BeSS database ( $\pi$  Aqr)

Observations date	Observer
2022.9.3 (periastron)	Joan Guarro Fló
2022.11.9	Joan Guarro Fló
2022.11.25 (periastron)	Joan Guarro Fló
2022.12.28	Joan Guarro Fló

Spectral resolution  $\sim$  8500

度が増大すると解釈でき、石田 (2022) で立てた仮説「伴星がperiastronを通過するときの潮汐力で円盤がリング化する」は成り立たない。この結果と低分散分光観測の結果を合わせて、円盤構造を考察する。

図1よりperiastronを通過してもEW $\alpha$ は頭打ちが続き、 $D_{34}$ は増加(EW $\beta$ は減少)している。 $D_{34}$ は円盤の有効温度と関連があり、 $D_{34}$ が上がるということは、有効温度の低下を表す。今回のなゆたでの観測でFWHMはあまり変化がなかった(図6a)が、もし2011年のperiastron後(図6a)から予想される密度の変化-periastron後の密度の減少-を考えると、今後円盤は冷えて膨張し、消滅に向かう可能性があるのではないか。いずれにしても、 $\delta$  Scoの円盤の角運動量輸送機構に伴星が寄与している可能性があると考えられる。水素以外の輝線変動からも円盤構造を考察する。He I輝

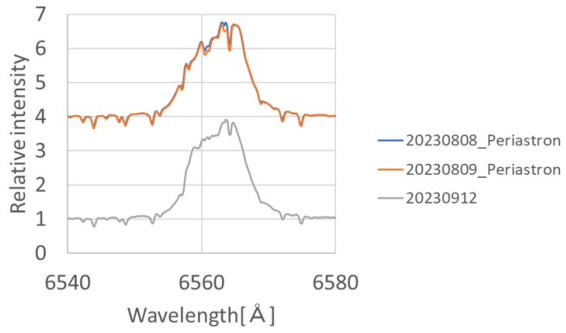
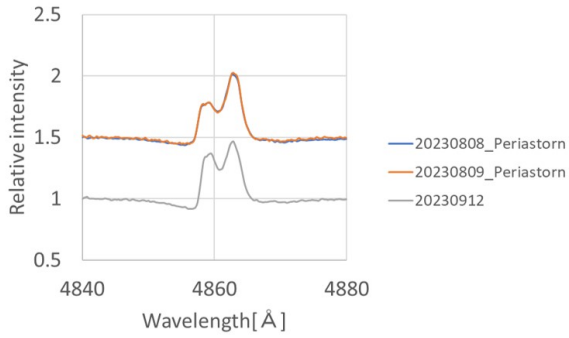
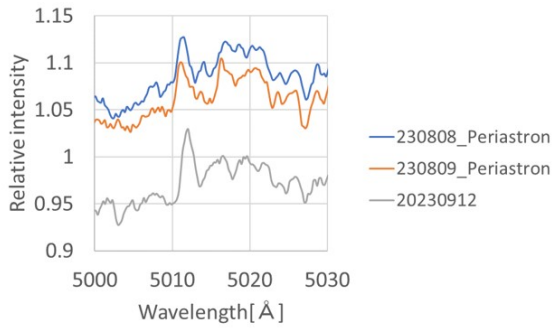
線(5016 Å)の検出は、水素輝線放射領域より高温領域があることを示唆する。また、過去2回のperiastron通過後に、ピーク強度の増大が確認されている(図2c、図4c)。Mg I輝線(5167 Å)の検出は、水素輝線放射領域より低温領域があることを示唆する。スペクトルの形状について、ダブルピークからシングルピークになる時期が、水素輝線と異なっていた。水素輝線は2013–2015年であったのに対し(図4a, b)、Mg I輝線は2017年頃であった(図4d)。これらの結果より、円盤において、HeやMgは水素とは異なる場所から放出されていると推測される。

#### 4.2. $\pi$ Aqr

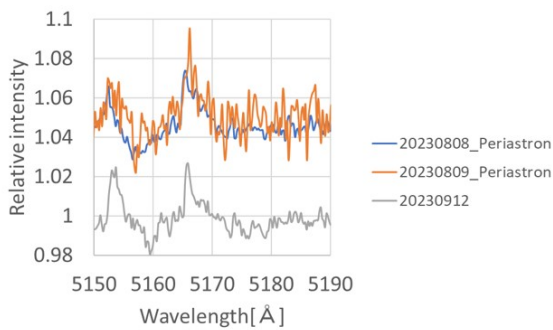
なゆたとBeSSによるFWHMの測定結果を図6bに示す。2023年のなゆたでの観測期間では大きな変化はなかったが(図3a, b)、BeSSから得られたスペクトルでは、H $\alpha$ 輝線のFWHMはperiastronに関係なく減少傾向が続いた。H $\beta$ 輝線では、ダブルピークの強度差が大きいものが多く、測定不可であった。periastron時の円盤のリング化の検証は難しいが、図1cの $D_{34}$ の変動(periastron前で減少傾向、後で増加傾向、石田 2022の図に詳細あり)は、円盤の有効温度がperiastron前で高く、periastron後で低くなることを示唆している。スペクトルの強度や形状に関して、BeSSから得られたスペクトルでは、periastronに関係なくH $\alpha$ 、H $\beta$ 輝線ともにダブルピークのR強度が上昇し、V強度が減少した。長期的な観測により、H $\alpha$ のV/R変動周期は、伴星の軌道周期(およそ84.1日)とほぼ一致することが確認されており(Zharikov et al. 2013)、H $\alpha$ 輝線のFWHMの変動も、伴星が円盤に影響を与えていることが示唆されるが、周期性があるかは不明である。

H $\alpha$ 、H $\beta$ 輝線以外の2輝線の変動についても考察する。He I輝線(5016 Å)は、なゆたでの観測期間には見られなかったが(図3c)、BeSSから得られたスペクトルでは、顕著に見えており(図5c)、 $\pi$  Aqrの円盤にも高温領域が存在する時期があることを示唆している。periastron前後での強度変化は見られず、伴星との相関は不明である。BeSSから得られたHe I輝線スペクトルの形状に大きな変化はなかつ

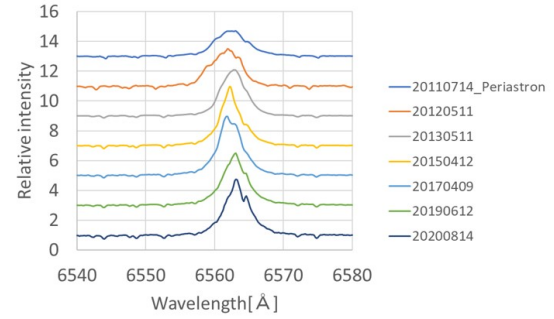
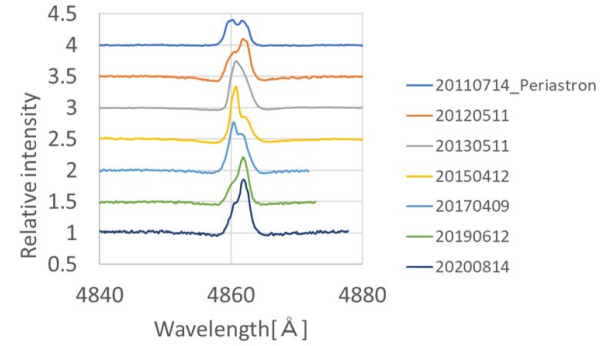
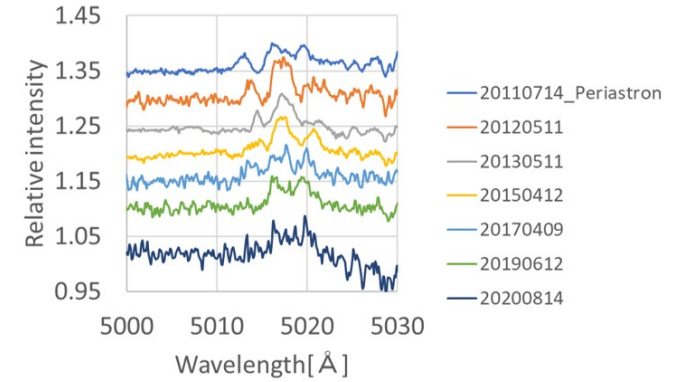


(a)  $H\alpha$  (6563 Å)(b)  $H\beta$  (4861 Å)

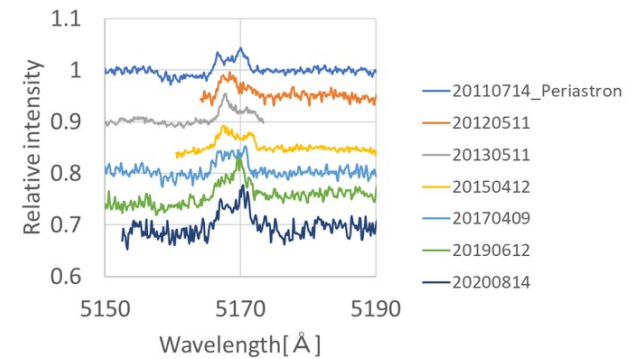
(c) He I (5016 Å)



(d) Mg I (5167 Å)

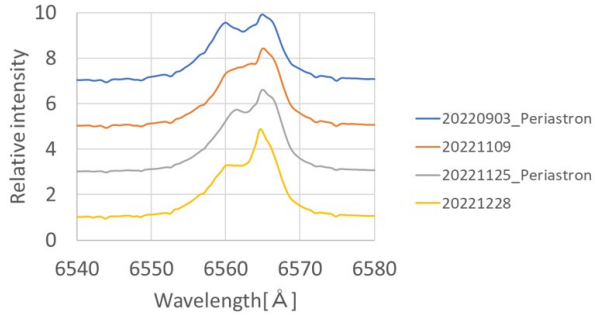
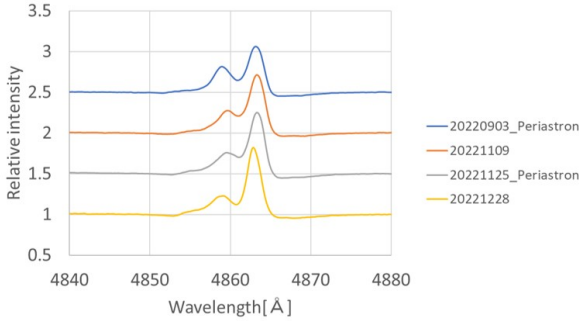
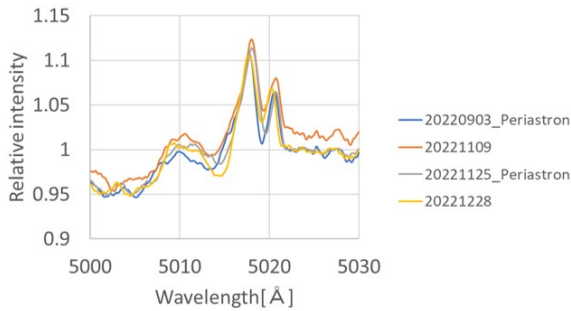
(a)  $H\alpha$  (6563 Å)(b)  $H\beta$  (4861 Å)

(c) He I (5016 Å)

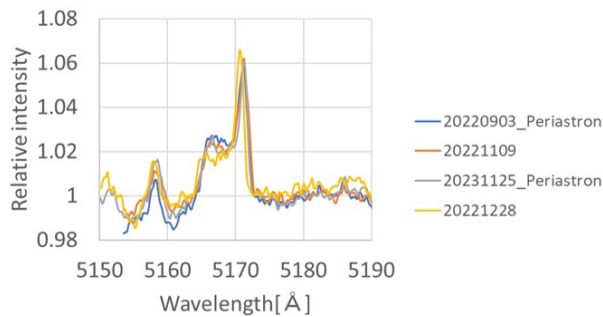


(d) Mg I (5167 Å)

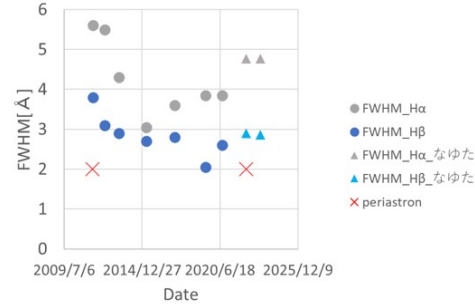
**Fig. 3.** Spectra of  $\pi$  Aqr obtained with the Nayuta telescope.**Fig. 4.** Spectra of  $\delta$  Sco obtained with the BeSS database.

(a) H $\alpha$  (6563 Å)(b) H $\beta$  (4861 Å)

(c) He I (5016 Å)



(d) Mg I (5167 Å)

**Fig. 5.** Spectra of  $\pi$  Aqr obtained with the BeSS database.(a)  $\delta$  Sco(b)  $\pi$  Aqr**Fig. 6.** Plot of FWHM of H $\alpha$  and H $\beta$ . Circles are obtained with the BeSS database, triangles are obtained with the Nayuta.

たが、中心部の吸収線が、periastron通過後に浅くなる現象が見られた。これはBe星プレオネのH $\alpha$ 輝線観測でも報告されている(本田, 片平 2018)が、詳しいメカニズムはわかっていない。

Mg I輝線(5167 Å)のスペクトルの形状は、なゆたで観測した2023年はV > R、BeSSから得た2022年はV < Rであるが、それぞれの期間で大きな変化はなかった。

## 5. Summary

本研究の内容を以下にまとめる。

1. Be星の円盤が、periastronを通過するときリング化するかを検証するため、2022年4月から2023年9月の期間に、兵庫県立大学西はりま天文台のなゆた望遠鏡に搭載のMALLSを用い、 $\delta$  Sco、 $\pi$  Aqrの中分散分光観測を行った。
2.  $\delta$  Scoの観測データとBeSSより、periastron前後のFWHMを測定した。その結果から、periastronに近い時期ほど、円盤の密度が増大すると解釈でき、periastronでリング化するとは言えない。これと、低分散分光観測から得られたEW $\alpha$ 、EW $\beta$ 、 $D_{34}$ の最新の結果を合わせると、2022年のperiastron通過後、円盤は冷えて膨張し、消滅に向かう可能性がある。また、He I輝線(5016 Å)、Mg I輝線(5167 Å)の検出・変動より、円盤の高温–低温に渡る温度分布が示唆され、これらは水素とは異なる場所から放出されている可能性があると考えられる。
3.  $\pi$  Aqrにおいて、H $\beta$ 輝線では、ダブルピークの強度差が大きいものが多く、FWHMの測定が不可であり、periastron時の円盤のリング化の検証ができなかった。periastronに対応する $D_{34}$ の変動は、円盤の有効温度がperiastron前で高く、periastron後で低くなる

ことを示唆している。He I輝線(5016 Å)、Mg I輝線(5167 Å)の検出は、 $\delta$  Scoの円盤温度分布と矛盾しない。

4. 2.と3.より、Be星の円盤への角運動量輸送機構に、伴星が影響を与えている可能性がある。

### Acknowledgment

本研究を進めるにあたり、様々な方々から多くの助言をいただいた。まず、共同利用観測を受け入れていただいた兵庫県立大学西はりま天文台のスタッフの方々には、深謝したい。特に戸塚都研究員、高山正輝研究員には、観測時、技術的なサポートをいただいた。また、本田敏志准教授、大島誠人研究員には観測時のサポートだけでなく、円盤構造の解釈について有益な助言をいただいた。他にも、藤井貢さん(藤井黒崎観測所)には、筆者のようなアマチュアでも自宅で天体画像処理ソフトウェアIRAFを使用できる環境構築に助言をいただいた。最後に、この研究は、フランスのムードン天文台LESIAで運用されているBeSSデータベースを利用しています(<http://basebe.obspm.fr>)。ここに感謝の意を表します。

This work has used of the BeSS database, operated at LESIA, Observatoire de Meudon, France: <http://basebe.obspm.fr>

### References

- Ahmad, N., Zainuddin, M. Z., Yahya, M. S., Malasan, H. L., Buil, C. 2015, *NewA*, 36, 80
- Balona, L.A., Dziembowski, W. A. 1999, *MNRAS*, 309, 221
- Bjorkman, K. S., Miroshnichenko, A. S., McDavid, D., & Pogrosheva, T. M. 2002, *ApJ*, 573, 812
- Carciofi, A. C., Rocha, R., Leandro. 2013, *msao.conf*, 57
- Jaschek, C., & Jaschek, M. 1993, *A&AS*, 97, 807
- Kogure, T. 1990, *Astrophysics and Space Science*, 163, 7
- Meilland, A., et al. 2011, *A&A*, 532, 80
- Merrill, P. W. 1933, *PASP*, 45, 198
- Miroshnichenko, A. S., et al. 2001, *A&A*, 377, 485
- Miroshnichenko, A. S., et al. 2013, *ApJ*, 766, 119
- Naze, Y., et al. 2019, *New Astronomy*, 73, 101279
- Pollmann, E., & Vollmann, W. 2014, *BAVSR*, 63, 149
- Secchi, A. 1867, *Astronomische Nachrichten*, 68, 63
- Slettebak, A. 1982, *ApJS*, 50, 55
- Štefl, S., Okazaki, A. T., Rivinius, T., Baade, D. 2007, in *ASP Conf. Ser.*, 361, ed. S. Štefl et al. (San Francisco: ASP), 274
- Struve, O. 1931, *ApJ*, 73, 94
- Suffak, M. W., Jones, C. E., Tycner, C., Henry, G. W., Carciofi, A. C., Mota, B. C., Rubio, A. C. 2020, *ApJ*, 890, 86
- Tsujimoto, M., Hayashi, T, Morihana, K., Moritani, Y. 2023, *PASJ*, 75, 177
- Zharikov,, S. V., et al. 2013, *A&A*, 560, A30
- 石田 光宏 2022, *Stars and Galaxies*, 5, 10
- 野本 憲一 他. 編. 2009, シリーズ現代の天文学 7 恒星 (東京都: 日本評論社)
- 本田 敏志, 片平 順一 2018, 第23回天体スペクトル研究会集録, 53