

水素輝線等価幅とバルマー逓減率のモニタリングから探るBe星の円盤構造

石田 光宏¹

¹横浜市立戸塚高等学校 〒245-0061 神奈川県横浜市戸塚区汲沢2丁目27番1号

Disk structure of Be stars Monitoring the equivalent width of the hydrogen emission lines and the Balmer decrement

Mitsuhiro Ishida¹

¹Yokohama Municipal Totsuka High School, 2-27-1 Gumizawa, Totsuka-ku, Yokohama-shi, Kanagawa 245-0061, Japan
mi06-ishida@city.yokohama.jp

(Received 2022 October 31; accepted 2022 December 21)

概要

長年、Be星（カシオペア座 γ 型変光星）の測光・分光観測が行われているが、未だに星周円盤の生成・消滅のメカニズムは明らかになっていない。そこで、2018年9月から2020年3月まで、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。得られたスペクトルから水素輝線等価幅、バルマー逓減率（ $H\alpha/H\beta$ ）を計算し、時間変動などを調べた。その結果、バルマー逓減率に有意な変動がある天体を複数確認した。この現象を説明するため、「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。

Abstract

For many years, photometric and spectroscopic observations of Be stars (γ -type variable stars in Cassiopeia) have been carried out, but the mechanism of the formation and extinction of the circumstellar disk is still unclear. Therefore, from September 2018 to March 2020, we performed spectroscopic monitoring observations of several Be stars using the Small Aperture Telescope + Low Dispersion Spectrograph at the School Observatory. From the obtained spectra, we calculated the hydrogen emission line equivalent widths and Balmer decrement ($H\alpha/H\beta$), and investigated the time variability and so on. As a result, we identified several sources with significant variations in the Balmer decrement. To explain this phenomenon, we hypothesized that the disk is ringed by the tidal force of Be's companion star as it passes the perihelion point.

Key words: emission-line—Be Star

1. Introduction

Be星（カシオペア座 γ 型変光星）は、光度階級がIII–VのB(O, 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 他. 2009)。1866年、イタリアの天文学者セッキ神父(P. A. Secchi)が γ 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。

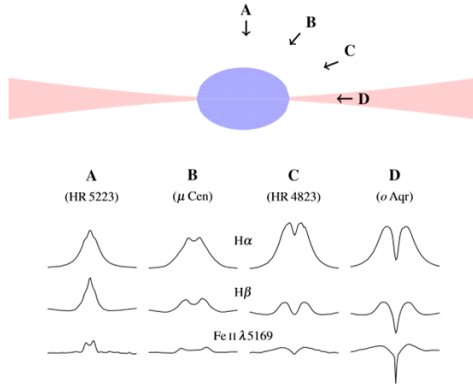
Be星は変光星であり、変光周期が数か月から数十年(以上)と言われ、爆発型変光星(eruptive variables)に分類される。数百 km s^{-1} で自転していることが知られており、赤道周りに星周円盤を作り、そこから水素輝線が観測される。星周円盤の半径は、およそ星半径の10倍程度であることが知られている。輝線は、星の自転軸と観測者の視線方向とのなす角度でシングルピークやダブルピークとなる(図1)。これらの違いで、Be-pole on（ポールオン星）、Be star（Be星）、Be-shell（ガス殻星）などと呼ばれる。Be星はB型星に現れる過渡的現象と考えられており、ある時期には輝線が消失してB型星に戻ることもある。なお、B型星の約10–15%がBe星と考えられている(Merrill 1933)。

Be星の星周円盤の生成・消滅のメカニズムには単独星起源説と連星系起源説がある。前者は、星の高速自転に

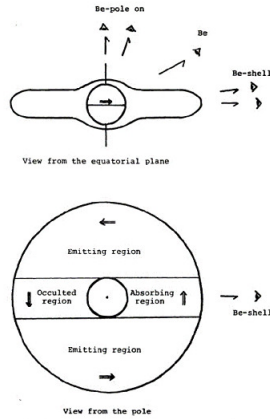
よって星の赤道付近からガスが外側へ噴出し、円盤が形成されるという説である。しかし、回転だけでは円盤の形成は不十分で、他に磁場や非放射恒星パルス等の放出のメカニズムの必要性が指摘されている(Porter & Rivinius 2003)。後者の説はBe星が全て分光連星だと仮定(Kriz & Harmanec 1975)し、伴星からLagrange点を通して主星に流れ込んだガスによって回転円盤状の星周圏が形成されるというものである(Plavec & Polidan 1976)。しかし、伴星が未発見のBe星も多い。

現在に至るまで、様々なBe星の長期的な測光・分光観測が行われている。まず、図2(a)にBe星のプロトタイプである γ Casの $H\alpha$ 輝線等価幅($EW\alpha$)のおよそ40年に渡る観測結果を示す(Pollmann et al. 2014)。この天体では、数十年に渡る変動が確認されている。また図2(b), (c)に示すように、 $EW\alpha$ とV等級に正の相関があることも発見されている(相関係数 ~ 0.86)。Pollmannらは、 $EW\alpha$ の変動が星周円盤の大きさや密度の変動を表す指標であり、それが星の明るさの変動も引き起こすと主張している。

γ Cas以外のBe星についても、長期的な観測の報告がある。 δ Scoは、2001年に増光し、B型星からBe星になった天体として知られている。この天体では、 $EW\alpha$ のおよそ10年周期の変動が確認されている(Pollmann et al. 2016)。



(a) The shape of the observed emission lines (Rivinius et al. 2013).



(b) Be star's perihelion and observer's relationship to the star (Kogure & Hirata 1982).

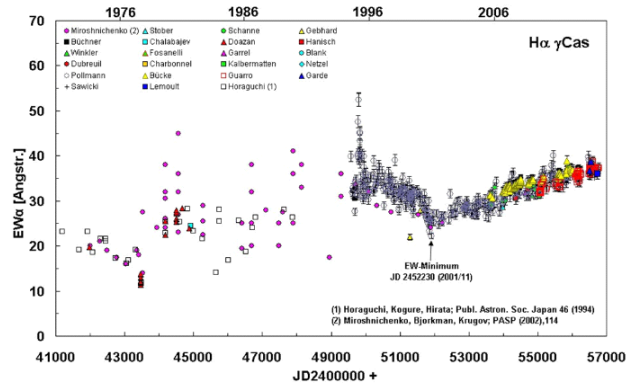
Fig. 1: The structure of a Be star.

また、アマチュア天文家の藤井 貢氏の観測により、 EW_{α} と V 等級の間に正の相関があることも指摘されている。 π AqrはX線でも明るいBe星であり、2014年1月に EW_{α} 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る (Naze et al. 2019)。

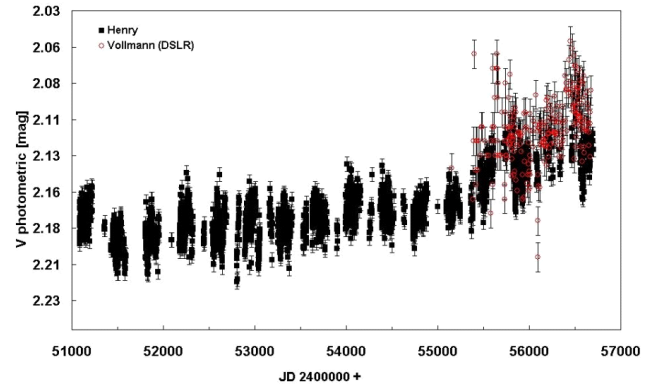
このように、様々なBe星の長期的な測光・分光観測データは得られているが、未だに円盤の生成・消滅などのメカニズムはよく分かっていない。しかし、それらを解明するには、これまでと同様、長期的な分光・測光観測が有力な手段であることに変わりはない。本研究では、観測を分光観測に絞り、より多くのBe星をモニタリングすることで円盤のメカニズムを探ることを目的とする。具体的には、 EW_{α} に加え、報告例が極めて少ない $H\beta$ 輝線等価幅(EW_{β})と、バルマー輝線の放射流束の相対値であるバルマー減率の変動も調べる。

2. Observations and data reduction

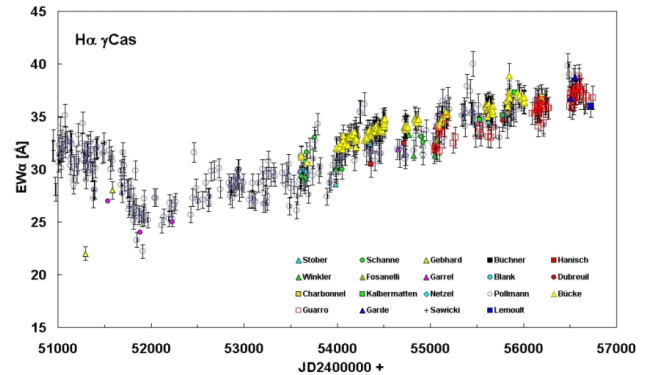
観測は、筆者の前任校である横浜市立横浜サイエンスフロンティア高等学校（神奈川県横浜市鶴見区）の天文台で行った。観測の様子を図3に示す。観測にはタカハシ製の口径30 cm純カセグレン式望遠鏡、SBIG製の冷却CCDカメラST-402ME、Shelyak製の低分散分光器Alpy600(波長分解能 ~ 600 @ 650 nm)を用いた。



(a) Long-term variation of EW_{α}



(b) V magnitude



(c) EW_{α}

Fig. 2: Observation results of γ Cas (Pollmann et al. 2014)

観測期間は2018年9月から2020年3月までで、対象天体は δ Sco、 π Aqr、 ϕ Per、 ψ Per、66 Cyg、 β CMi、 κ Draである。1天体における観測時間は(10–30) s $\times$ 5枚で、合計43の分光データを得た(図6)。

解析には、すばる画像解析ソフトMakali¹⁾と、Microsoft Excelを使用した。まずMakali¹⁾を用いて生データからダークフレームを引き、規格化したフラットフレームで画像を割った。その後、背景光を引き、波長校正光源を使い、波長校正を行った。処理したデータをExcelに出力し、輝線部分をガウシアン関数でフィッティングし、波長で積分することでEWを得た。フィッティングには、Excelのソルバープログラムを用い、連続成分や輝線成分の高さ、中心波長、関数の幅を変数として、非線形最小二乗法で行った。EWの誤差に関しては、誤差伝搬の法則より算出した。得られたEWからバルマー通減率を算出した。バルマー通減率はバルマー輝線の放射流束 $F(Hn)$ ($n = 3(\alpha), 4(\beta), 5(\gamma), \dots$)の相対値として定義され、通常は $F(H\beta)$ に対する比が用いられる(小暮 2002)。これを測定することで円盤の物理状態を知る手がかりとなることが知られている。今回の観測から得られた水素輝線は $H\alpha$ 、 $H\beta$ のみであったため、バルマー通減率は、 $F(H\beta)$ に対する $F(H\alpha)$ の比(D_{34})を計算した。 D_{34} は以下の式で表される。

$$D_{34} = \frac{F(H\alpha)}{F(H\beta)} = G_\alpha \frac{W_E(H\alpha)}{W_E(H\beta)} \quad (1)$$

ここで、 G_α は連続光に対する放射流束の比で、変換係数と呼ばれる。Collins, Truax, and Cranmer (1991)は、モデル大気に基づき、 G_α をB型の分光サブクラスX ($X = 0, 1, 2, \dots, 9$)の関数として次のように表した。

$$G_\alpha = 0.333 + 6.67 \times 10^{-3} X \quad (2)$$

本研究でも上式を用いる。 W_E は輝線のための等価幅である。輝線は、吸収線の上に乗っていると考えられるので(図4)、光球吸収線の等価幅を W_s 、観測される等価幅を W_{ob} とすると

$$W_E = W_s - W_{ob} \quad (3)$$

となる。 W_{ob} は連続光より下(吸収線)で正、連続光より上(輝線)で負と定義される。 W_s は、藤井 貢氏によるモデル大気の計算値²⁾を使用した。藤井氏はB型主系列星の W_s を分光サブクラスXごとにシミュレートしている。

$$W_s(H\alpha) = 0.0198X^2 + 0.5727X + 1.7354 \quad (4)$$

$$W_s(H\beta) = 0.0159X^2 + 1.1206X + 2.2518 \quad (5)$$

このシミュレーションにおいて、モデル大気の作成にはSPTOOL (Takeda 1995)が、解析には天体画像処理ソフトウェアIRAF (アメリカ国立光学天文台(NOA)³⁾が利用されている。

3. Observation Result

3.1. Spectra

図5に今回得られたスペクトルの例を示す。観測対象の7天体全てから $H\alpha$ 輝線を検出することができ、そのうち5天

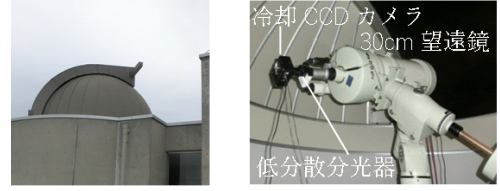


Fig. 3: Observatory exterior (left) and Telescope (right)

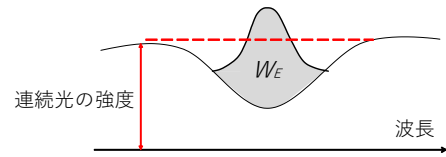


Fig. 4: schematic of W_E

体からは $H\beta$ 輝線も検出することができた。

3.2. $EW\alpha$ 、 $EW\beta$ 、 D_{34}

図6に天体ごとの $EW\alpha$ 、 $EW\beta$ 、 D_{34} を時系列に沿って示す。 $EW\alpha$ に関しては、どの天体も観測期間の2018年9月-2020年3月で大きな変動はなかった。一方、 $EW\beta$ では δ Sco、 π Aqr、 ϕ Perにおいて2–3倍程度の変動が確認された。この3天体に関して D_{34} をみると、1.5倍程度の変動であった。

4. Discussion

4.1. D_{34} の変動とperiastron epoch(近星点)

$EW\beta$ 、 D_{34} の変動の要因を考察する。Be星は、かつては単独星が多いと考えられていたが、現在は γ Cas (e.g. Harmanec et al. 2000)を初め、多くのBe星で伴星の存在が確認されている。Pollmann and Vollmann (2014)では、Be星プレオネ(ガス殻星, B8 V_{ne})の高分散分光観測で、伴星のperiastron epoch通過前後でV/R(輝線ダブルピーク紫[V]、赤[R]強度比)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、両氏は伴星の潮汐力の影響を指摘している(本田, 片平 2018)。本観測においても、伴星の影響が D_{34} の変動に関与していると予想し、図6の D_{34} にperiastron epochをプロットしたのが図7である(ただし、 δ Scoに関しては、長期的な観測をされている藤井 貢氏のデータも使用)。それぞれの天体の伴星の公転周期やperiastron epochを表1に示す。図7より、 D_{34} は、periastron epochの前で減少傾向、後で増加傾向であることが分かった。この現象は、伴星がperiastron epochに近づく、伴星

¹⁾ <https://makalii.mtk.nao.ac.jp>

²⁾ <https://www.asj.or.jp/nenkai/archive/2008b/pdf/A68c.pdf>

³⁾ 2019年10月1日にNSF国立光赤外線天文学研究所に統合された。したがって、現在はIRAFの配布も行っていない。

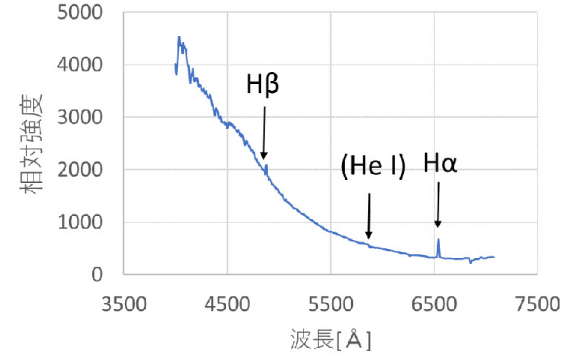
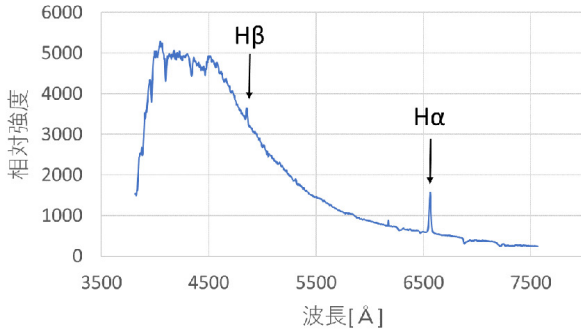
(a) δ Sco (2019.5.4)(b) ϕ Per (2020.3.17)

Fig. 5: Examples of obtained spectra.

Table 1: Orbital period and periastron epoch of companion star

Object name	δ Sco	π Aqr	ϕ Per
orbital period	10.8092 ± 0.0005 year	84.07 ± 0.02 day	126.6731day
periastron epoch	2000.9.15 & 2011.7.3	1996.8.23	2012.7.1
Reference	Meilland et al. 2011	Bjorkman et al. 2002	Gies et al. 1998

の潮汐で円盤がリング化(i.e. 主に円盤の内側から)でるH β のEW β が小さくなり、 D_{34} が増加)し、periastron epochから遠ざかると、元に戻るという解釈が可能ではないか(図8)。ただし、データ数が少ない点、観測の値だけで判断できるのか不明な点など、確証を得るにはさらなる調査が必要である。

4.2. D_{34} -EW α 図

小暮 智一氏はBe星の分光サブクラス(X)ごとに D_{34} -EW α 図を作り、その上に円盤大気の外径の理論曲線載せることで、円盤がリング化しているか否かを判別する手法を確立した(小暮 1967)。小暮氏は観測データの分布から、 D_{34} -EW α 図の特徴を以下のようにまとめている。

1. 観測点は図上に広く散らばるが、分布に下限があり、下限の傾きはXがすすむと大きい
2. 自転速度 $V \sin i$ が大きいと左、遅いと右or下に集まる傾向がある
3. 複数の測定値のある天体は、かなり大きい変化の軌跡を示す

図9が筆者の結果である。データ数が少ないので、Xご

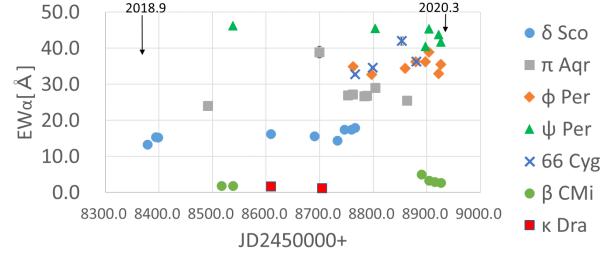
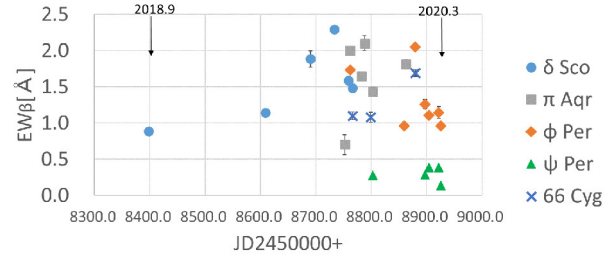
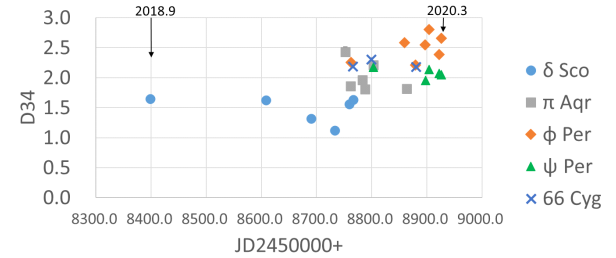
(a) EW α (b) EW β (c) D_{34}

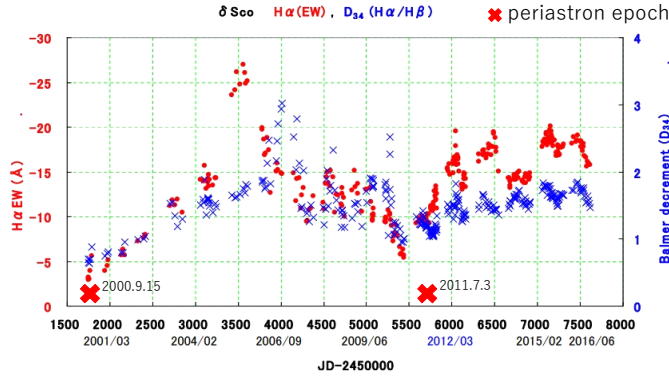
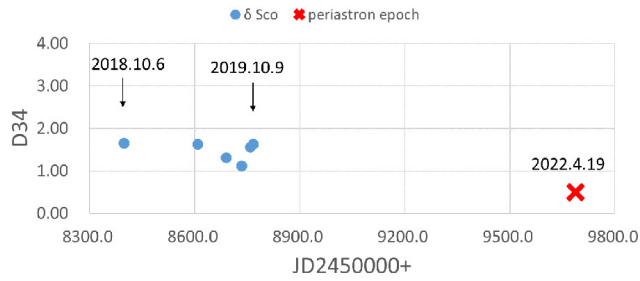
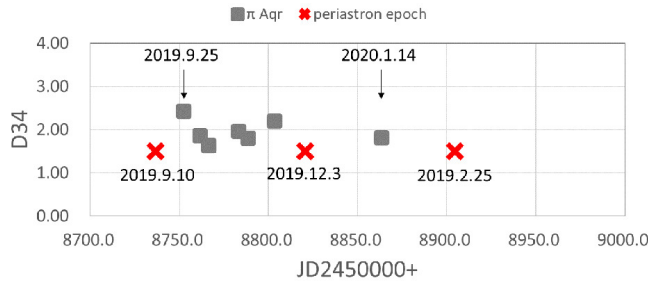
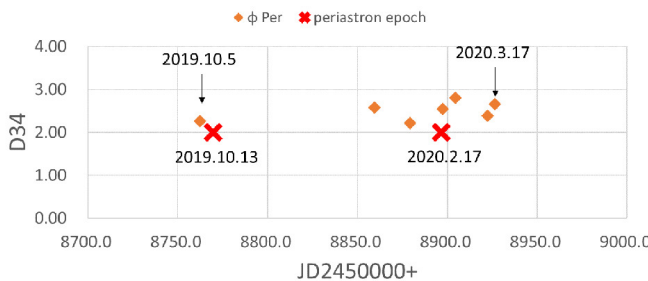
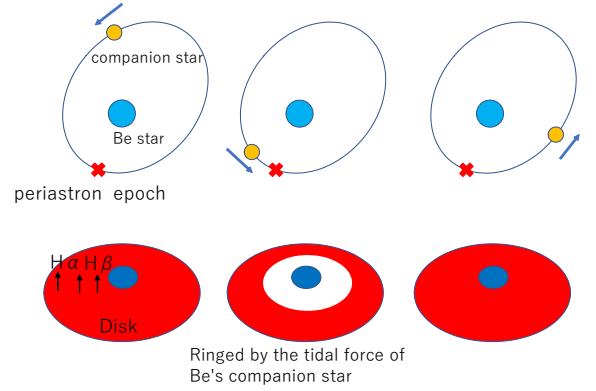
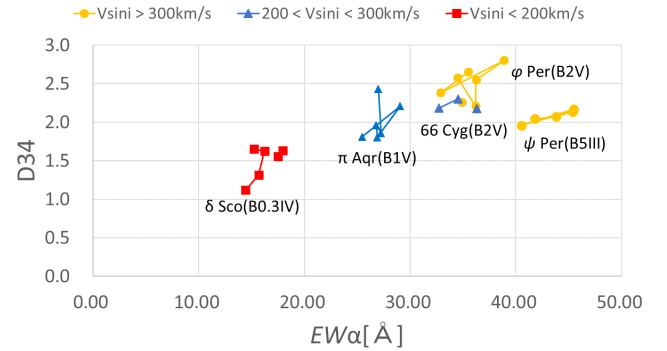
Fig. 6: Physical quantities obtained from the spectra.

とではなく、観測した天体全てを同じ図にプロットした。この図よりグラフの傾きはXがすすむと小さくなり、点の分布は $V \sin i$ が大きいと右上になっている。これは小暮氏がまとめた上記1.2.の傾向と逆になった。また、今回の観測から D_{34} とEW α におよそ正の相関があることが分かった。今後はデータ数を増やし、円盤大気の理論曲線と比較し、円盤がリング化している調べていく。

5. Summary

本研究の内容を以下にまとめる。

1. Be星の円盤構造を探るため、2018年9月から2020年3月まで、横浜市立横浜サイエンスフロンティア高等学校天文台において複数のBe星の低分散分光観測を行った。
2. 得られたスペクトルから、H α 輝線等価幅(EW α)、H β 輝線等価幅(EW β)、バルマー遅減率(D_{34})を測定した。観測期間中、EW α には大きな変動はなかったが、EW β と D_{34} に変動のある星を複数確認した。

(a) Observation of δ Sco by Mitsugu Fujii^a^a http://otobs.sakura.ne.jp/FBO/mutter/del_sco_2016_add.pdf(b) Observation of δ Sco in this study(c) π Aqr(d) ϕ Per**Fig. 7:** Relationship between D_{34} variation and periastron epoch**Fig. 8:** Interpretation of D_{34} variation.**Fig. 9:** D_{34} - $EW\alpha$ graph in this study

3. D_{34} の変動の要因について、Be星の伴星がperiastron epochに近づくと、伴星の潮汐で円盤がリング化し、periastron epochから遠ざかると、円盤が元に戻るというモデルを考えた。

4. 円盤がリング化しているか判断する手法として、小暮智一氏が考案した D_{34} - $EW\alpha$ 図を作成した。今回の観測で得られたデータの分布は、小暮氏のものと逆の傾向であった。また、今回の観測から D_{34} と $EW\alpha$ におよそ正の相関があることが分かった。

6. Acknowledgments

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。アマチュア天文家の藤井貢さん(藤井黒崎観測所)には、 δ Scoの観測データや、 D_{34} の計算に必要な物理量の計算式を使わせていただいた。また、筆者からの計算についての質問などにも丁寧に回答いただいた。小倉和幸先生(呉工業高等専門学校)、寺尾航暉先生(東北大学)、西浦慎悟先生(東京学芸大学)には、データ解析の仕方を教えていただいた。本田敏志先生(兵庫県立大学 西はりま天文台)、片平順一さん(中之島科学研究所)には、 D_{34} の変動や、それに伴う円盤構造の解釈について、貴重な助言をいただいた。河合広樹さん(中央大学)には、分光観測の技術的な指導をいただいた。ここに感謝の意を表したい。

References

- Bjorkman, K. S., Miroshnichenko, A. S., McDavid, D., & Pogrosheva, T. M. 2002, *ApJ*, 573, 812
- Collins G. W., II, Truax, R. J., & Cranmer, S. R. 1991, *ApJS*, 77, 541
- Gies, D. R., Bagnuolo, W. G., Jr., Ferrara, E. C., Kaye, A. B., Thaller, M. L., Laura, R., & Peters, G. J. 1998, *ApJ*, 493, 440
- Harmanec, P., et al. 2000, *A&A*, 364, 85
- Kogure, T., & Hirata, R. 1982, *Bulletin of the Astronomical Society of India*, 10, 281
- Kriz, S. & Harmanec, P. 1975, *Bulletin of the Astronomical Institute of Czechoslovakia*, 26, 65
- Meilland, A., et al. 2011, *A&A*, 532, A,80
- Merrill, P. W. 1933, *PASP*, 45, 198
- Naze, Y., et al. 2019, *New Astronomy*, 73, 101279
- Plavec, M. & Polidan, R. S. 1976, *IAU Symposium* 73, 289
- Pollmann, E. 2016, *IBVS*, 6179, 1
- Pollmann, E., & Vollmann, W. 2014, *BABSR*, 63, 149
- Pollmann E., Vollmann, W., & Henry, G. W. 2014, *IBVS*, 6109, 1
- Porter J. M., & Rivinius, T. 2003, *PASP*, 115, 812
- Rivinius, T., Carciofi, A. C., & Martayan, C. 2013, *A&AR*, 21, 69
- Takeda, Y. 1995, *PASJ*, 47, 287
- Secchi, A. 1867, *Astronomische Nachrichten*, 68, 63
- 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
- 小暮 智一. 1967, *天文月報*, 60, 247
- 小暮 智一. 2002, *輝線星概論(宇宙物理学講座第4巻)*(東京都: とう書房), 第4章
- 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)