

A post-Algol system showing eclipses of a Bp shell star and a 'hot low-mass dwarf' discovered in V658 Carinae

Norbert Hauck

Abstract: *A study of the eclipsing binary V658 Car has revealed a prototype candidate for a post-Algol system. Analysing and modelling its peculiar light curve has enabled a reliable estimation of the parameters of its stellar components indicating a clearly detached configuration and a normal solar metallicity. The Bp- resp. Bpe-type primary star ($T_{\text{eff}} \sim 16000$ K) should have a mass of $4.48 \pm 0.33 M_{\text{sun}}$ and a radius of $2.48 \pm 0.05 R_{\text{sun}}$. The secondary star having an upper limit of $0.25 \pm 0.05 M_{\text{sun}}$ and a radius of $1.65 \pm 0.03 R_{\text{sun}}$ is significantly hotter ($T_{\text{eff}} \sim 22200$ K) and hence representing a new kind of stellar object, which might be called a 'hot low-mass dwarf'. It appears to be a former Algol loser in its rapid contraction phase, i.e. between its mass-transferring and final white dwarf stage. Moreover, the unusual geometry of the system seen edge-on allows for an unprecedented probing of the entire equatorial gas disk surrounding the primary star, which in itself is expected to be one of the fastest rotating non-degenerate magnetic stars found to date. [English and German version available via www.bav-astro.eu/rb/rb2016-4/1.html (or pdf)].*

The motivation for this study of V658 Car (HD 92406) has been the challenge to unravel its enigmatic light curve presented by Otero et al. [1] for an eclipsing binary having an orbital period of 32 days (Fig. 1). Skiff's catalogue [2] cites several spectral type classifications: e.g. Stephenson et al. [3] attributed MK-type A1lab and mentioned spectral variability, Houk et al. [4] classified it as a Bp shell star, Giesekeing [5] as A0p, and e.g. Henize [6] registered H-alpha emission. Moreover, we have spectral type (B5V)p shell from the Buscombe catalogue [7].

In addition to the available data from the ASAS-3 sky survey new photometric data in passbands UBV_{C} and $H\alpha$ have been collected with an internet-controlled 0.5m-reflector telescope in Siding Spring, Australia. Each time 5 to 7 CCD images have been binned in passbands BVI_{C} in order to control scintillation effects. Comparative stars have been HD 303181, HD 92272 and HD 92630 in an angular distance of 3', 12' and 18', respectively.

The *Binary Maker 3* (BM 3) software (Bradstreet & Steelman, 2004) has been helpful in finding a solution for the peculiar light curve of V658 Car. It turned out in the modelling procedure that the short partial 'central' or 'inner' eclipses in phase 0 and 0.5 of a circular orbit require two stars both having a small ratio of radius/separation (R/a) in a clearly detached configuration, and cannot be generated by e.g. hot spots on larger stars. The dramatic shape of the light curve between these central star eclipses can be explained by the presence of a large equatorial excretion resp. 'decretion' gas disk (the 'primary disk' or 'disk 1') seen edge-on (a so-called 'shell') surrounding the primary Bp-type star, which is consistent with the Bp shell spectral classification by Houk et al. [4].

In the unique configuration of V658 Car the smaller secondary star is kindly working for us a 'natural probe' for investigating this primary star's disk resp. 'shell'. Apparently, the gas disk is luminous and has light absorbing properties as well, as we can see in the broad light curve dips outside the short secondary and primary central star eclipses (Fig. 1). The loss of light towards the primary central eclipse in phase 0 starts at clear turn-off points and is significant and progressive, when the light of the hotter secondary star is partially absorbed by an increasing fraction of the semi-transparent gas disk, which causes a gradual loss of total light of 10, 24 and 25% in passbands V, H α and U, respectively, even before the central primary eclipse has started. Towards secondary minimum in phase 0.5 we see a less significant loss of total light (~3.5% in V and 6.9% in H α and I $_C$), when the secondary star partially eclipses the disk having a darker outer and a luminous inner region. All these features require our secondary star to be the hotter component of the binary. Moreover, the first and last contacts of the excretion disk eclipse appear a bit unsymmetrical to mid primary minimum in phase 0, i.e. this disk might be slightly eccentric.

Only visible in passband H α has been a prolongation of the primary eclipse by ~1.2 days, which is interpreted here as the primary's excretion disk eclipsing a Roche-lobe-sized H α -emitting low-density gas region surrounding our hot companion star. The considerable loss of total H α -light during this eclipse is indicating a complete occultation of an equally flat-shaped ring or disk ('secondary disk' or 'disk 2'). The secondary disk as well as gas being located between the primary disk and Lagrange point L $_1$ generating a kind of extended dark spot should also contribute to the loss of light in the secondary minimum. On one occasion half amplitudes of up to about 0.04 mag in 4 days have been measured during maximum light in passband H α only, which are regarded as a sign of sporadic fluctuations of H α -emission/absorption. Loss of mass resp. angular momentum of the primary star is an explanation for the observed decrease of the orbital period (see Table 1).

The disk of our Bp resp. Bpe star is considered to be consistent with the flat and concavely shaped equatorial gas disks known from Be stars, which have been the subject of a detailed review by Rivinius et al. [8]. According to this, our primary star is expected to be a fast rotator being completely covered by the rim of its large excretion resp. 'decretion' disk seen edge-on. Moreover, the effective temperature T_{eff} of the disk should be about 60% of the primary star's T_{eff} .

Modelling complicated disk-containing binaries normally exceeds the possibilities of the BM 3 software. Nevertheless, it enabled a light curve solution for the partial central star eclipses and allowed to add the considerable amount of disk light as third light L $_3$. The mean T_{eff} of 9600 K for the inner part ('pseudo-photosphere') of the disk fits to the spectral types of A0p given by Giesekeing [5] and A1lab attributed by Stephenson et al. [3], and this includes luminosity class lab in the sense of indicating a low atmospheric pressure at the source of light. Equally well does the T_{eff} of the primary of 16000 K fit to the (B5V)p shell MK-type cited in the Buscombe catalogue [7]. The T_{eff} values of our three components give at a known [7] B-V colour index of -0.03 mag minus a colour excess of 0.15 mag a mean T_{eff} of about 15700 K for the system.

Modelling of V658 Car's central eclipses has to take into account the different levels of absorption resp. light of its components, i.e. the primary star being permanently covered by half of its gas disk, the secondary star being eclipsed by the entire gas disk diameter at primary minimum only, and the loss of disk light at the secondary minimum. Therefore, the stars have been modelled in parallel runs with lowered apparent T_{eff} correlating with the observational flux, i.e. the primary star with 14530 K, the secondary star only at primary eclipse with 18050 K (and full 22200 K at secondary eclipse), and disk V-light L_3 of 0.61 at primary and 0.46 at secondary eclipse (for total star light = $L_1 + L_2 = 1$). The computed light curves have achieved a σ_{FIT} of 12 and 13 mmag to the ASAS data in primary and secondary minimum, respectively (Fig. 2).

Finding the important mass ratio q of such a multiple component system is not a simple task, as being demonstrated by the vague results from radial velocity measurements [5]. Fortunately, the light curve of V658 Car allows us to 'see' the physical diameter of the rotating primary gas disk, and hence also the required minimum size of the Roche lobe of the primary star. The surprisingly low mass ratio q ($= M_2/M_1$) of not more than 0.0564 (0.045 – 0.070) as an upper limit then follows from its direct correlation to the size of the Roche lobe for the last contact of the gas disk eclipse in phase 0.117 ± 0.004 determined from the UBVI_C light curves. In the light of the mass transfer discussed above we can expect the primary's Roche-lobe size being not much larger than the primary disk, and, therefore, the actual mass ratio q being quite close to this upper limit.

Our primary star could now be compared with stellar models at its T_{eff} of 16000 K, its R_1/a being known from the modelling and this mass ratio q . Such a primary star having 4.48 solar masses fits into the main-sequence band of a stellar model (without rotation) of the Geneva group of Ekström et al. [9] at a solar metallicity of $Z = 0.014$. Its radius of 2.48 R_{\odot} is only 8% larger than the zero-age-main-sequence (ZAMS) radius for its mass, which is in line with the expectations for a post-Algol system. The successful fit of the larger primary's R_1/a into the stellar model does exclude any alternative solution making the secondary star to the larger component of the binary.

The parameters of the secondary component have been determined by comparison with the primary star, and resulted in a surprising combination of an upper limit of 0.25 ± 0.05 solar masses, 1.65 ± 0.03 solar radii and a T_{eff} of about 22200 K. Hence, our companion star obviously does belong to a completely new class of stellar objects never seen before, which e.g. might be called 'hot low-mass dwarfs' being thereby clearly delimited from known hot massive dwarfs and cool low-mass dwarfs. In the context of our binary system it appears logical that our w.r.t. its properties *twisted dwarf* should represent a former mass-losing Algol component in its rapid contraction phase after the end of mass-transfer to the gainer, and being on its evolutionary track to become finally a low-mass white dwarf. The results are presented in the tables. The error ranges are based on an estimated standard error of 5% for primary star's T_{eff} .

As far as known to the author, no comparably clear example of the long-sought post-Algol binary system has been discovered to date. In the first group of other possible post-Algol candidates, theta Tuc [10] and KIC 10661783 [11] contain a hypothetical mass-loser still being relatively close to Roche-lobe filling and still having a lower T_{eff}

than the gainer. They have higher mass ratios q of 0.09 and might yet be in the phase of episodic slow mass transfer between intermittently incomplete Roche-lobe filling of the loser. Both author teams tried to clarify the situation by searching for circumstellar matter and line emissions, however, without success. Anyway, if these binaries should turn out to be real post-Algols, they would only represent a very early phase of the loser contraction after the end of mass transfer. In the second group of post-Algol candidates the hypothetical losers have already passed this contraction phase. They merely contain star remnants like hot subdwarfs or white dwarfs making the assessment of their previous evolution a difficult task; see e.g. beta Crt [12]. A general overview and discussion is given by Eggleton [13].

In comparison to the Be-star review by Rivinius et al. [8] V658 Car appears to contain the first B-type star that allows determining the entire physical diameter of its equatorial gas disk, independently of the size of the emitting region. In order to be able to generate such a disk mainly by centrifugal force, we can expect for our Bp resp. Bpe star a similar fractional rotation value W of at least 0.6 resp. 60 % of the critical break-up value as depicted for Be star examples in Fig. 9 of [8], which is exceptional for such a magnetic star. Because of its magnetism our peculiar star type might show 'patches' having different chemical abundances and thus generating visible rotational variability. Therefore, a period analysis of the ASAS photometry V-data at maximum light has been performed. It has revealed a nearly sinusoidal brightness variation having an amplitude of 0.014 mag at a significant period of 0.33975(2) days corresponding at an equatorial radius of $2.74 \pm 0.06 R_{\odot}$ and a mass of $4.48 M_{\odot}$ to an equatorial rotational velocity of 408 ± 8 km/s resp. 73% of the critical rotation value. For Be stars having our luminosity class V we get from Rivinius [14] a similar statistical mean value of 77 ± 8 % of the critical rotation. Therefore, our detected period might well represent our primary star's rotation and has been adopted as such. HR 7355 and 48 Lib are the only examples of magnetic B-type stars found having with 358 and 400 km/s a comparably large rotational velocity [15]. Moreover, this feature is regarded as a logical consequence of the former mass transfer and spin-up our primary star has received from its companion star in an Algol-type binary scenario.

The study of V658 Car has led to surprising discoveries inviting to further observations and confirmations. Finally, this unique binary perfectly representing the long-sought missing final part of the evolutionary track of Algol systems might be classified as a post-Algol prototype.

Acknowledgements:

This research has made use of the Simbad and VizieR databases operated at the Centre de Données astronomiques de Strasbourg, France, <http://cdsarc.u-strasbg.fr/> and the All Sky Automated Survey ASAS database, <http://www.astrouw.edu.pl/asas/>.

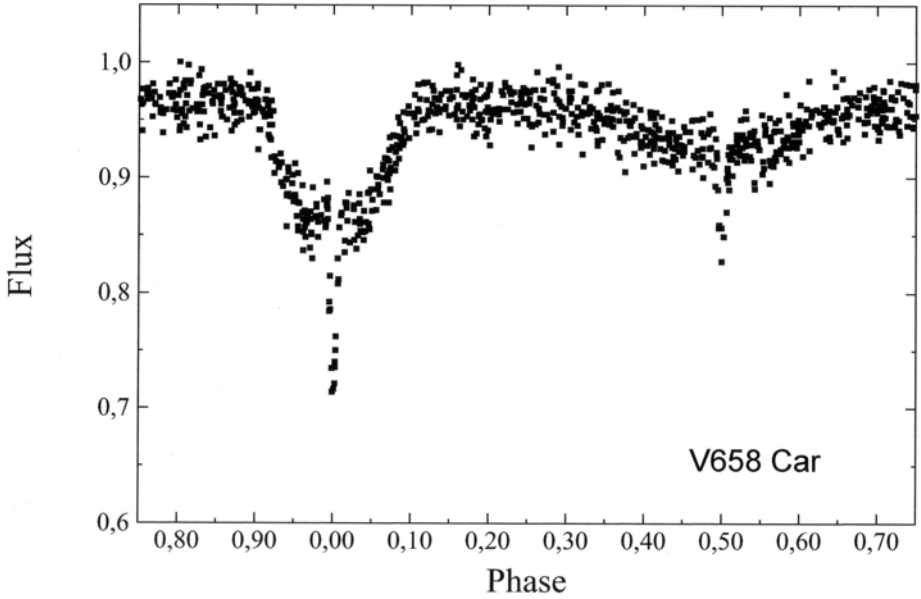


Fig. 1: The peculiar light curve of V658 Car from 888 ASAS data points in passband V

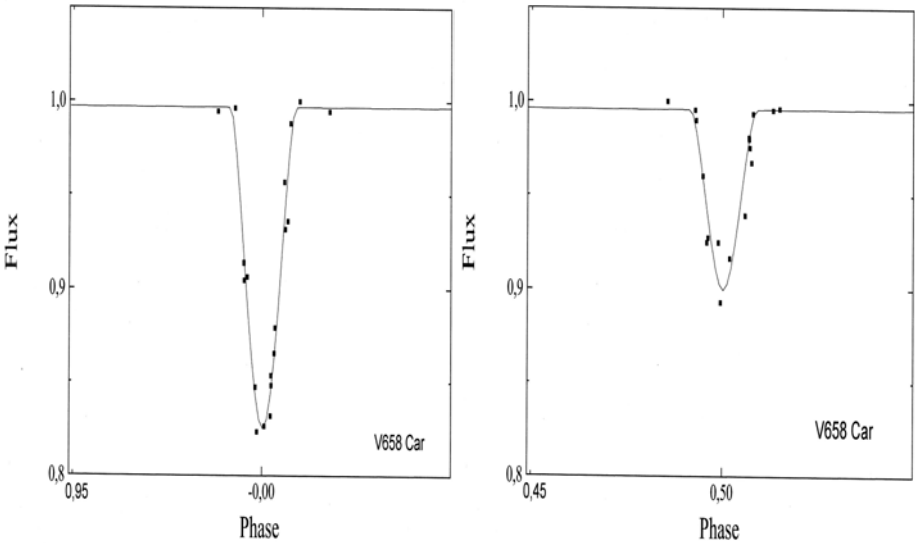


Fig. 2: Computed light curves for ASAS data of the central star eclipses of V658 Car

Table 1: Parameters of binary system V658 Car

Epoch [HJD]	2452786.436(5)	mid primary minimum, from [1], improved
Period [days]	32.1855(5)	for JD 2451900 – 2455040
Period [days]	32.1837(2)	for HJD 2454926.5994 – 2457597.8494
Total light/PM/SM [Vmag]	9.12/9.44/9.27	PM/SM = Primary/Secondary Minimum
Light loss up to PMC [%]	25/14/10/9/24	in UV _I cH α up to PM Contact
Light loss up to SMC [%]	2.9/3.5/6.9/6.9	in UV _I cH α up to SM Contact
Minimum duration [hours]	13.9	partial eclipse
Orbital inclination i [deg]	88.61 ± 0.03	
Orbital radius a [R _o]	71.40 ± 1.69	for R _o = 696342 km; circular orbit
Mass ratio q (M ₂ /M ₁)	≤ 0.0564	$\leq (0.0455 - 0.0699)$
Distance [pc]	948 ± 20	calculated for A _v = 0.48 mag

Table 2: Parameters of components of V658 Car

Parameter	Primary star	Secondary star	Disk 1	Disk 2
Spectral type	B5Vpe shell		A0/1	
Temperature T _{eff} [K]	16000 ± 800	22200 ± 1100	9600 ± 500	
Radius R (volume) [R _o]	2.48 ± 0.05	1.65 ± 0.03	46.24 ± 1.33	11.8 ± 0.8
Luminosity (bol.) [L _o]	363 ± 15	592 ± 24	104 ± 4	
Brightness (abs.) [VMag]	-1.67	-2.20	-2.25	
V-light at maximum [%]	33.4 covered	32.5	34.1	
Mass [M _o]	4.48 ± 0.33	$\leq 0.25 \pm 0.05$		

References:

- [1] S.A. Otero et al., IBVS **5586**, (2005)
- [2] B.A. Skiff, General Catalogue of Stellar Spectral Classifications, (2014); CDS catalogue B/mk
- [3] C.B. Stephenson et al., Luminous stars in the Southern Milky Way, Publ. Warner & Swasey Obs. **1**, part 1, (1971)
- [4] N. Houk et al., Catalogue of two dimensional spectral types for HD stars, **1**, (1975)
- [5] F. Giesekeing, A&AS **43**, 33, (1980)
- [6] K.G. Henize, ApJS **30**, 491, (1976)
- [7] W. Buscombe, 13th General Catalogue of MK Spectral Classification, (1998)
- [8] T. Rivinius et al., A&A Review **21**, 69, (2013)
- [9] S. Ekström et al., A&A **537**, 146, (2012)
- [10] K. De Mey et al., A&A **336**, 527, (1998)
- [11] H. Lehmann et al., A&A **557**, 79, (2013)
- [12] M.R. Burleigh et al., MNRAS **327**, 1158, (2001)
- [13] P. Eggleton, Evolutionary processes in binary and multiple stars, Cambridge University Press, (2006)
- [14] T. Rivinius et al., A&A **459**, 137, (2006)
- [15] T. Rivinius et al., MNRAS **429**, 177, (2013)

Ein post-Algol-Bedeckungssystem aus einem Bp-Hüllenstern und einem „heissen massearmen Zwerg“, entdeckt in V658 Carinae

A post-Algol system showing eclipses of a Bp shell star and a 'hot low-mass dwarf' discovered in V658 Carinae

Norbert Hauck

Abstract: *A study of the eclipsing binary V658 Car has revealed a prototype candidate for a post-Algol system. Analysing and modelling its peculiar light curve has enabled a reliable estimation of the parameters of its stellar components indicating a clearly detached configuration and a normal solar metallicity. The Bp- resp. Bpe-type primary star ($T_{\text{eff}} \sim 16000$ K) should have a mass of 4.48 ± 0.33 Msun and a radius of 2.48 ± 0.05 Rsun. The secondary star having an upper limit of 0.25 ± 0.06 Msun and a radius of 1.65 ± 0.03 Rsun is significantly hotter ($T_{\text{eff}} \sim 22200$ K) and hence representing a new kind of stellar object, which might be called a 'hot low-mass dwarf'. It appears to be a former Algol loser in its rapid contraction phase, i.e. between its mass-transferring and final white dwarf stage. Moreover, the unusual geometry of the system seen edge-on allows for an unprecedented probing of the entire equatorial gas disk surrounding the primary star, which in itself is expected to be one of the fastest rotating non-degenerate magnetic stars found to date. [English and German version available via www.bav-astro.eu/rb/rb2016-4/1.html (or pdf)].*

Der Anlass zu dieser Studie von V658 Car (HD 92406) lag in der Herausforderung, seine rätselhafte Lichtkurve zu erklären, die von Otero et al. [1] für einen Bedeckungsveränderlichen mit einer Bahnperiode von 32 Tagen vorgestellt worden war (Abb. 1). Skiff's Katalog [2] zitiert diverse Spektraltypen: z.B. Stephenson et al. [3] nannten den MK-Typ A1 lab und erwähnten spektrale Variabilität, Houk et al. [4] sahen einen Bp-shell Stern, Giesecking [5] einen A0p, und z.B. Henize [6] registrierte H-alpha Emission. Zudem haben wir Typ (B5V)p shell vom Buscombe-Katalog [7].

Die von ASAS-3 vorliegenden Daten wurden mit neuen photometrischen UBVI_C- und H α -Daten ergänzt, die mit einem per Internet kontrollierten 0.5m-Spiegelteleskop in Siding Spring, Australien, erhalten wurden. Zur Reduzierung von Szintillationseffekten wurden im BVI_C jeweils 5-7 CCD-Bilder gebinnt. Als Vergleichssterne dienten HD 303181, HD 92272 und HD 92630 in Winkeldistanzen von 3', 12' und 18'.

Die *Binary Maker 3* (BM 3)-Software (Bradstreet & Steelman, 2004) war bei der Suche nach einer Lösung der sonderbaren Lichtkurve von V658 Car hilfreich. Bei der Modellierung stellte sich heraus, dass die kurzen, partiellen „zentralen“ oder „inneren“ Bedeckungen in Phase 0 und 0.5 der Kreisbahn zwei Sterne mit kleinem Radienverhältnis R/a in einer deutlich getrennten Konfiguration erfordern, und nicht durch z.B. Hot Spots auf grösseren Sternen erzeugt werden können. Die dramatische Form der Lichtkurve zwischen diesen zentralen Sternbedeckungen kann durch eine den Bp-Primärstern umgebende grosse äquatoriale Exkretions- bzw. „Dekretions“-Gasscheibe (Primärscheibe=Disk 1) in edge-on- bzw. Kantenlage (die sogenannte Hülle oder shell) erklärt werden. Dies stimmt mit der Bp-shell Klassifikation von Houk et al. [4] überein.

In der einzigartigen Konfiguration von V658 Car arbeitet der kleinere Sekundärstern freundlicher Weise als „natürliche Sonde“ zur Untersuchung dieser Primärsternscheibe bzw. -hülle. Offensichtlich hat die Gasscheibe sowohl lichtemittierende als auch absorbierende Eigenschaften, wie wir den breiten Einsenkungen der Lichtkurve ausserhalb der kurzen, zentralen Sternbedeckungen entnehmen können (Abb. 1). Der Lichtverlust zum zentralen Hauptminimum in Phase 0 hin beginnt mit scharfen Abknickpunkten und ist signifikant und zunehmend, wenn das Licht des heisseren Sekundärsterns auf seiner anwachsenden Weglänge durch die halbtransparente Gasscheibe teilweise absorbiert wird. Dies bewirkt bereits vor Beginn des zentralen Hauptminimums einen Lichtverlust des Systems von 10% im V, 24% im H α und 25% im U. Zum Nebenminimum in Phase 0.5 hin sehen wir einen geringeren Gesamtlichtverlust von 3.5% im V und 6.9% im H α und I c , wenn der Sekundärstern zunächst die dunkleren äusseren und dann die helleren inneren Regionen der Scheibe partiell bedeckt. All diese Merkmale erfordern einen im Vergleich zum Primärstern heisseren Sekundärstern. Da die ersten und letzten Kontakte der Gasscheibenbedeckung etwas unsymmetrisch zur Phase 0 liegen, könnte die Scheibe leicht exzentrisch sein.

Nur im H α -Band sichtbar war eine Verlängerung des Hauptminimums um ~ 1.2 Tage, welche als die Bedeckung einer den Sekundärstern umgebenden, Rochelobe-begrenzten und H α -emittierenden Gasregion geringer Dichte durch die Primärscheibe interpretiert wird. Der dabei beobachtete beträchtliche Verlust von H α -Gesamtlicht spricht für die komplette Verdunkelung eines ebenfalls flachen Rings oder Scheibe („Sekundärscheibe/Disk 2“). Die Sekundärscheibe sowie zwischen der Primärscheibe und dem Lagrangeunkt 1 befindliches Gas, das einen ausgedehnten dunklen Fleck erzeugen könnte, dürften ebenfalls zum Lichtverlust im Nebenminimum beitragen. Nur im H α -Band wurden im Maximum bei einer Gelegenheit innerhalb von 4 Tagen Halbamplituden von etwa 0.04 mag gemessen, d.h. Anzeichen sporadischer H α -Emissions-/Absorptionsfluktuationen. Der Masse- bzw. Drehmomentverlust des Primärsterns ist eine Erklärung für die beobachtete Periodenverkürzung (Tab.1).

Die Scheibe um unseren Bp- bzw. Bpe-Stern wird als vergleichbar mit den bekannten flachen und konkav geformten äquatorialen Gasscheiben um Be-Sterne betrachtet, die Gegenstand eines detaillierten Reviews von Rivinius et al. [8] waren. Demnach sollte unser Primärstern mit hoher Geschwindigkeit rotieren und komplett von der Felge seiner edge-on gesehenen grossen Äquatorscheibe bedeckt sein. Zudem sollte die effektive Temperatur T_{eff} der Scheibe etwa 60% der T_{eff} des Primärsterns betragen.

Die Modellierung komplizierter Doppelsterne mit Scheiben übersteigt die normalen Möglichkeiten der BM3-Software. Dennoch gestattete sie eine Lichtkurvenlösung für die partiellen zentralen Sternbedeckungen unter Berücksichtigung des beträchtlichen Scheibenlichtanteils als drittes Licht L_3 . Die mittlere T_{eff} des inneren Teils der Scheibe („Pseudo-Photosphäre“) von 9600 K passt zu den Spektraltypen A0p von Giesking [5] und A1 lab von Stephenson et al. [3], und dies inklusive der Leuchtkraftklasse lab im Sinne eines niedrigen atmosphärischen Drucks an der Lichtquelle. Zugleich passt die T_{eff} des Primärsterns von 16000 K gut zum im Buscombe-Katalog [7] angegebenen MK-Typ (B5V)p shell. Die T_{eff} -Werte unserer 3 Komponenten ergeben bei dem aus [7] bekannten Farbindex B-V von -0.03 mag minus einem Farbexzess von 0.15 mag eine mittlere T_{eff} des Systems von etwa 15700 K.

Die Modellierung der zentralen Bedeckungen von V658 Car muss die verschiedenen Niveaus der Absorption bzw. des Lichts seiner Komponenten berücksichtigen, d.h. die permanente Bedeckung des Primärsterns durch seine halbe Scheibe, die nur im Hauptminimum stattfindende Bedeckung des Sekundärsterns durch den ganzen Gasscheibendurchmesser, und den Lichtverlust dieser Scheibe im Nebenminimum. Beide Sterne wurden daher in parallelen Läufen mit gemäss dem beobachteten Fluss verminderten, scheinbaren T_{eff} modelliert, d.h. der Primärstern mit 14530 K, der Sekundärstern nur im Hauptminimum mit 18050 K (und vollen 22200 K im Nebenminimum). Das V-Licht der Scheibe wurde mit einem L_3 von 0.61 im Haupt- und 0.46 im Nebenminimum eingegeben (bei Sternlicht $L_1 + L_2 = 1$). Die berechneten Lichtkurven erreichten ein σ_{FIT} von 12 bzw. 13 mmag in den Minima (Abb. 2).

Die Bestimmung des wichtigen Massenverhältnisses q eines solchen Mehrfachkomponentensystems ist keine leichte Aufgabe, wie die vagen Resultate von Radialgeschwindigkeitsmessungen [5] zeigen. Glücklicherweise gestattet uns die Lichtkurve von V658 Car den physischen Durchmesser der rotierenden Primärsternscheibe zu *sehen*, und damit auch die erforderliche Mindestgrösse des Roche-Lobes des Primärsterns. Daraus ableitbar ist das überraschend niedrige Massenverhältnis q (M_2/M_1) von ≤ 0.0564 (0.045 – 0.070) für den aus den UBV_IC –Lichtkurven ermittelten letzten Kontakt der Gasscheibenbedeckung in Phase 0.117 ± 0.004 . Der vermutete Gastransfer zur Sekundärscheibe lässt erwarten, dass der Roche-Lobe nicht viel grösser als die Gasscheibe ist, und unser q nahe an der genannten Obergrenze liegt.

Unser Primärstern konnte nun mit seiner T_{eff} , seinem aus der Modellierung bekannten Radienverhältnis R_1/a und diesem Massenverhältnis q mit Sternmodellen verglichen werden. Er passt bei 16000K T_{eff} und einer Masse von 4.48 M_{\odot} bei einer solaren Metallizität von $Z = 0.014$ in das Hauptreihenband des Modells (ohne Rotation) der Genfer Gruppe von Ekström et al. [9]. Sein Radius von 2.48 R_{\odot} ist nur 8% grösser als der ZAMS (Alter Null der Hauptreihe)-Radius für seine Masse und liegt damit im Rahmen der Erwartungen für ein post-Algolsystem. Der erfolgreiche Fit des Primärsterns mit seinem grösseren R_1/a in das Sternmodell schliesst Alternativlösungen aus, die den Sekundärstern zur grösseren Komponente des Doppelsterns machen.

Die Parameter des Sekundärsterns wurden durch Vergleich mit dem Primärstern erhalten und ergaben die überraschende Kombination einer Obergrenze von $0.25 \pm 0.06 M_{\odot}$, $1.65 \pm 0.03 R_{\odot}$ und eine T_{eff} von etwa 22200 K. Unser Begleitstern gehört somit offensichtlich zu einer ganz neuen und noch nie gesehenen Gruppe stellarer Objekte, die z.B. als „heisse massearme Zwerg“ bezeichnet werden könnten. Dies würde sie sowohl von den bekannten heissen massereichen Zwergen als auch von den kühlen massearmen Zwergen klar abgrenzen. Im Kontext unseres Doppelsternsystems erscheint es logisch, dass unser in Bezug auf seine Eigenschaften *verdrehte Zwerg* eine früher masseabgebende Algolsystemkomponente in seiner schnellen Kontraktionsphase nach Ende des Massetransfers zum Doppelsternpartner darstellt, und sich nun zu einem massearmen weissen Zwerg entwickelt. Die Resultate sind in den Tabellen dargestellt. Die Fehlergrenzen basieren auf einer geschätzten Standardabweichung von 5% für die T_{eff} des Primärsterns.

Soweit dem Autor bekannt, wurde bis heute kein dem V658 Car vergleichbar klares Beispiel des langgesuchten post-Algolsystems entdeckt. Zur ersten Gruppe anderer möglicher post-Algol-Kandidaten gehören theta Tuc [10] und KIC 10661783 [11], die einen hypothetischen Masseverlierer enthalten, der seinen Roche-Lobe noch nahezu ausfüllt und noch eine niedrigere T_{eff} als der Massegewinner hat. Beide weisen ein höheres Massenverhältnis q von 0.09 auf und könnten sich noch in der Phase episodischen, langsamen Massetransfers mit zeitweiligen Unterbrechungen durch unvollständige Roche-Lobe-Ausfüllung befinden. Beide Autorentams haben versucht, die Situation durch Suche nach zirkumstellarer Materie und Emissionslinien zu klären, jedoch ohne Erfolg. Selbst wenn sich diese Systeme als echte post-Algols erweisen sollten, würden sie lediglich eine sehr frühe Phase der Kontraktion des Masseverlierers nach Ende des Massetransfers darstellen. In der zweiten Gruppe von post-Algol-Kandidaten haben die hypothetischen Masseverlierer ihre Kontraktionsphase bereits durchlaufen. Sie enthalten nur noch Sternreste wie weisse Zwerge oder heisse Unterzwerge, die die Einschätzung ihrer vorherigen Entwicklung zu einer schwierigen Aufgabe machen; siehe z.B. beta CrI [12] und die Diskussionen von Eggleton [13].

Im Vergleich zum Be-Stern-Review von Rivinius et al. [8] scheint V658 Car der erste B-Stern zu sein, der die Bestimmung des gesamten physischen Durchmessers seiner äquatorialen Gasscheibe erlaubt, unabhängig von der Grösse der emittierenden Region. Zur Erzeugung einer solchen Scheibe sollte unser Bpe-Stern mit für einen magnetischen Stern ungewohntem $\geq 60\%$ des kritischen break-up Wertes rotieren (s. Abb. 9 in [8]). Der Magnetismus unseres pekuliären Sterns kann Flecken unterschiedlicher chemischer Konzentrationen und daher u.U. sichtbare Rotationsvariabilität erzeugen. Bei der Periodenanalyse der ASAS-Daten im Maximallicht wurde eine nahezu sinusförmige Helligkeitsänderung mit einer Amplitude von 0.014 mag bei einer signifikanten Periode von 0.33975(2) Tagen gefunden, die bei dem Äquatorradius von $2.74 \pm 0.06 R_{\odot}$ und einer Masse von $4.48 M_{\odot}$ einer äquatorialen Rotationsgeschwindigkeit von 408 ± 8 km/s bzw. 73% des kritischen Wertes entspricht. Dieser passt zum von Rivinius [14] für Be-Zwerge genannten statistischen Mittelwert von $77 \pm 8\%$ der kritischen Geschwindigkeit, und wurde daher als die Primärsternrotation angenommen. Die einzigen gefundenen Beispiele magnetischer B-Sterne mit vergleichbar schneller Rotation sind HR 7355 mit 358 km/s und 48 Lib mit 400 km/s [15]. Die schnelle Rotation wird als logische Konsequenz des früheren Massetransfers und der Rotationsbeschleunigung angesehen, die unser Primärstern in einem Algolsystem-Szenario von seinem Doppelsternpartner erhalten hat.

Die Studie von V658 Car hat zu überraschenden Entdeckungen geführt, die zu weiteren Beobachtungen und Bestätigungen einladen. Letztendlich könnte dieser Doppelstern, der den langgesuchten, fehlenden letzten Entwicklungsabschnitt der Algolsysteme so perfekt repräsentiert, als post-Algol-Prototyp klassifiziert werden.

Danksagungen:

This research has made use of the Simbad and VizieR databases operated at the Centre de Données astronomiques de Strasbourg, France, <http://cdsarc.u-strasbg.fr/> and the All Sky Automated Survey ASAS database, <http://www.astrow.edu.pl/stras/>.

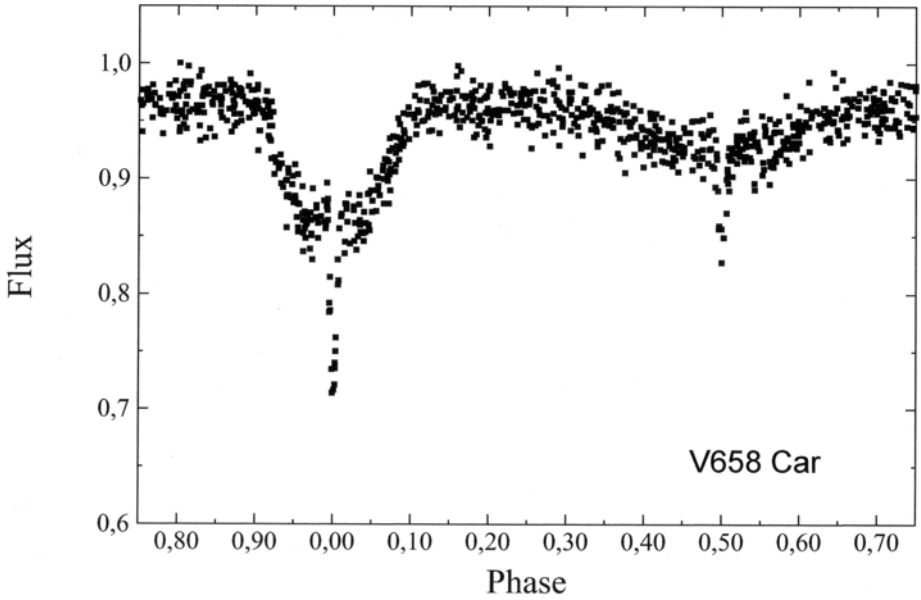


Abb.1: Die sonderbare Lichtkurve von V658 Car aus 888 ASAS V-Datenpunkten

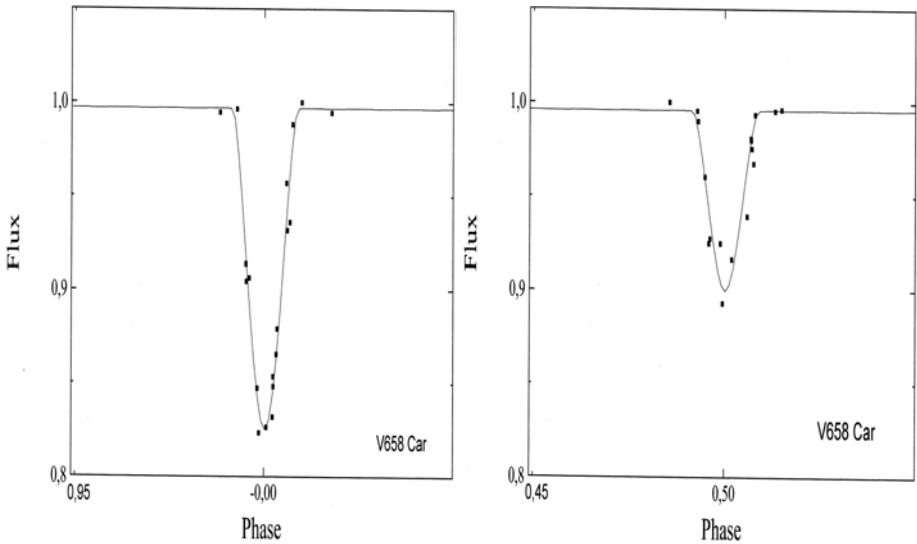


Abb. 2: Berechnete Lichtkurven für ASAS-Daten der zentralen Sternbedeckungen

Tabelle 1: Parameter des Doppelsternsystems V658 Car

Epoche [HJD]	2452786.436(5)	Mitte Hauptminimum, von [1], verbessert
Periode [Tage]	32.1855(5)	für JD 2451900 – 2455040
Periode [Tage]	32.1837(2)	für HJD 2454926.5994 – 2457597.8494
Max. Licht/HM/NM[Vmag]	9.12/9.44/9.27	HM/NM = Haupt-/Nebenminimum
Lichtverlust bis HMK [%]	25/14/10/9/24	in UV _I C _H α bis zum HM Kontakt
Lichtverlust bis NMK [%]	2.9/3.5/6.9/6.9	in UV _I C _H α bis zum NM Kontakt
Minimumdauer [Stunden]	13.9	partielle Bedeckung
Bahnneigung i [Grad]	88.61 ± 0.03	
Bahnradius a [Ro]	71.40 ± 1.69	für Ro = 696342 km; Kreisbahn
Masseverhältnis q(M ₂ /M ₁)	≤ 0.0564	≤ (0.0455 – 0.0699)
Entfernung [pc]	962 ± 20	berechnet für A _v = 0.48 mag

Tabelle 2: Parameter der Komponenten von V658 Car

Parameter	Primärstern	Sekundärstern	Disk 1	Disk 2
Spektraltyp	B5Vpe shell		A0/1	
Temperatur T _{eff} [K]	16000 ± 800	22200 ± 1100	9600 ± 500	
Radius R (volumen) [Ro]	2.48 ± 0.05	1.65 ± 0.03	46.24 ± 1.33	11.8 ± 0.8
Leuchtkraft (bol.) [Lo]	363 ± 15	592 ± 24	101 ± 4	
Helligkeit (abs.) [VMag]	– 0.28	– 0.10	– 0.11	
V-Licht im Maximum [%]	32.5 bedeckt	33.6	33.9	
Masse [Mo]	4.48 ± 0.33	≤ 0.25 ± 0.06		

Literatur:

- [1] S.A. Otero et al., IBVS **5586**, (2005)
- [2] B.A. Skiff, General Catalogue of Stellar Spectral Classifications, (2014); CDS catalogue B/mk
- [3] C.B. Stephenson et al., Luminous stars in the Southern Milky Way, Publ. Warner & Swasey Obs. **1**, part 1, (1971)
- [4] N. Houk et al., Catalogue of two dimensional spectral types for HD stars, **1**, (1975)
- [5] F. Giesekeing, A&AS **43**, 33, (1980)
- [6] K.G. Henize, ApJS **30**, 491, (1976)
- [7] W. Buscombe, 13th General Catalogue of MK Spectral Classification, (1998)
- [8] T. Rivinius et al., A&A Review **21**, 69, (2013)
- [9] S. Ekström et al., A&A **537**, 146, (2012)
- [10] K. De Mey et al., A&A **336**, 527, (1998)
- [11] H. Lehmann et al., A&A **557**, 79, (2013)
- [12] M.R. Burleigh et al., MNRAS **327**, 1158, (2001)
- [13] P. Eggleton, Evolutionary processes in binary and multiple stars, Cambridge University Press, (2006)
- [14] T. Rivinius et al., A&A **459**, 137, (2006)
- [15] T. Rivinius et al., MNRAS **429**, 177, (2013)