

Die Phasen der Nova V1405 Cassiopeiae im Jahr 2021

Markus Kohl



Abb. 1: Die Lage der Nova V1405 Cas nahe M 52 und dem Blasennebel NGC 7635 (6.9.2021, 248x30 s)

Einleitung

Eine Nova entsteht nach der gängigen Lehrmeinung meist in einem System zweier sich eng umkreisender Partner eines Doppelsternsystems aus einem Weißen Zwerg und einem eher massearmen Stern, ähnlich unserer Sonne oder einem angehenden Roten Riesen. Beim Weißen Zwerg selbst kann keine effektive Kernfusion mehr stattfinden, weshalb er selbst so gut wie keine Energie mehr erzeugt. Der Begleitstern betreibt dagegen noch Kernfusion und überschreitet wegen seiner Nähe zum Weißen Zwerg seine Roche-Grenze.

Dadurch wird von ihm durch die Gravitation des Weißen Zwergs kontinuierlich Gas (insbes. Wasserstoff) abgezogen, das um den Zwergstern eine Akkretionsscheibe bildet. Aus dieser sinkt durch die Gravitation ständig Gas auf die Oberfläche des Zwergsterns herab. Es bildet sich eine Schicht aus aufgesammlter Materie, deren Druck im Inneren allmählich steigt, bis schließlich bei einer Temperatur von über 10 Mio. Kelvin das „Wasserstoffbrennen“ (Kernfusion: Wasserstoff-Helium) einsetzt. Dieses Gas dehnt sich aufgrund der hohen Gravitation vom Zwergstern nicht sofort wieder aus, was einen sofortigen Druckabfall zur Folge hätte. Vielmehr ist dieses Gas entartet, so bezeichnet, weil über einen sehr großen Temperaturbereich hinweg der Druck lange

Zeit konstant bleibt, so dass die Temperatur stetig ansteigen kann. Die Fusionsreaktionen werden immer heftiger, bis es schließlich zu einer heftigen Explosion kommen kann, wenn der entstehende Druck nicht mehr durch die Gravitation des Weißen Zwergs kompensiert wird. Bei diesem „Thermonuklearen Runaway“ (TNR) wird ein Teil der in der Fusion befindlichen Wasserstoffschicht mit einer Geschwindigkeit von mehreren Tausend km/s ins All geschleudert. Dieser Prozess dauert ca. 100 s. Das ist der Moment, in dem die Nova aufleuchtet [6], [9].

Der physikalische Mechanismus, der den Massenauswurf während der Nova-Eruption selbst und in der Folge dieses „Primärausbruchs“ den weiteren Masseverlust antreibt, ist immer noch nicht vollständig aufgeklärt. Verschiedene Modelle beschreiben ein einzelnes ballistisches Ereignis gefolgt von kontinuierlichen Sternwinden, eine allgemeine Wechselwirkung der beteiligten Sternhüllen oder eine Kombination mehrerer dieser Prozesse [2], [9].

Im späteren Verlauf der Ausbrüche, wenn die anfängliche nukleare Explosion in ein eher stationäres H-Brennen (CNO-Zyklus) übergegangen ist, scheint sich ein strahlungsgetriebener Sternwind von der dann extrem heißen Oberfläche des Weißen Zwergsterns einzustellen, wobei die Rolle des Begleitsterns bei diesen Prozessen noch nicht völlig klar ist. Man nimmt an, dass die Temperatur der Schicht, von welcher der Sternwind angetrieben wird, nach und nach immer höher wird, bis die Fusion aufgrund des dadurch relativ schnell abnehmenden Wasserstoffgehalts schließlich wieder erlischt. Als Folge kühlt das Gesamtsystem rasch wieder ab. Die Endgeschwindigkeit des entstehenden Sternwinds hängt wohl stark von der Temperatur der treibenden Schicht ab [10].

Die Nova V1405 Cassiopeiae

Das Jahr 2021 bescherte allen geeigneten Beobachtern eine recht helle Nova, die über Monate hinweg verfolgt werden konnte. Daher war sie spektroskopisch für Amateur-Astronomen mehr als interessant und ist es (im Januar 2022) immer noch.

Die Nova V1405 Cassiopeiae wurde am 18.3.2021 durch den japanischen Amateurastronomen Yuji Nakamura nahe des Sternhaufens Messier 52 entdeckt, Koordinaten: RA 23h 24min 48s, Dec: +61° 11' 15''.

In Abbildung 1 ist die Lage der Nova mit gelben Linien markiert.

In der folgenden Abbildungen 2 und 3 findet sich ein Vergleich vom 16.11.2014 (lange vor Entdeckung der Nova) und dem 29.3.2021. Das Bild vom März 2021 wurde in der Dämmerung aufgenommen und ist daher viel kürzer belichtet, als das Bild aus dem Jahr 2014, weshalb viel weniger Sterne zu sehen sind.

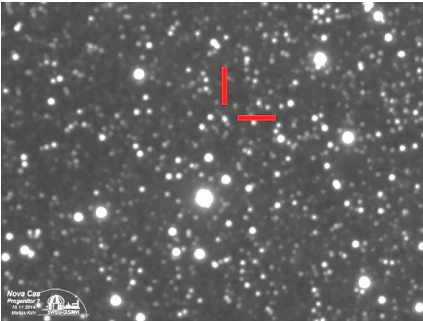


Abb. 2: Region der Nova am 16.11.2014

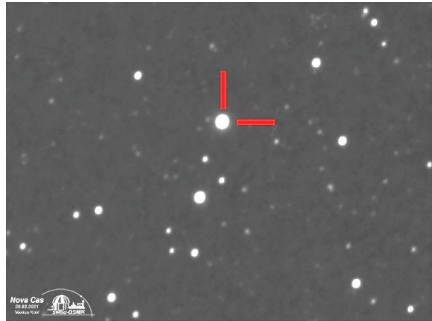


Abb. 3: Die Nova Cas am 29.3.2021, 8.1 mag

Photometrie der Nova

Die Helligkeit der Nova wurde zum Zeitpunkt der Entdeckung auf 9,6 mag geschätzt und zeigte im Laufe der Monate starke Schwankungen mit mehreren Maxima und Zwischenmaxima, deren Peaks im Laufe der Zeit schwächer zu werden schienen. Anhand eigener Messungen in der ersten Beobachtungsphase (März/April) konnte eine schon früher erprobte Messmethode zur Helligkeitsbestimmung mittels zweier Referenzsterne geprüft werden [13]. Diese kam sehr gut an die Helligkeitswerte heran, die von der AAVSO veröffentlicht wurden, so dass sich meine Bemühungen in der Folge auf die spektroskopische Beobachtung beschränkten. Zum Vergleich wird die AAVSO-Helligkeitskurve [11] später noch herangezogen. In der Folge sind drei Bilder dargestellt, anhand derer ich die Helligkeit zu Beginn meiner Beobachtungen messen konnte:

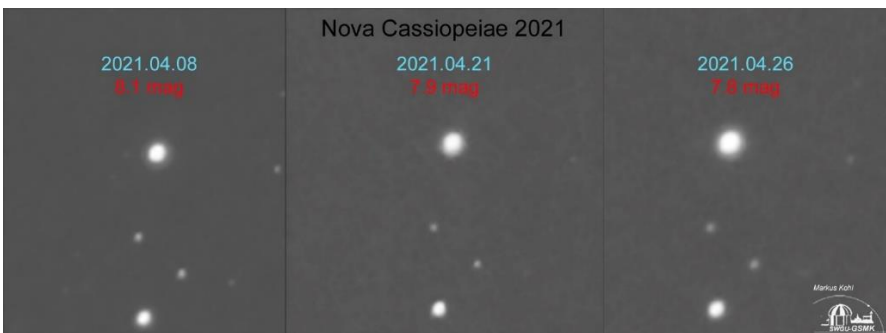


Abb. 4: Zunahme der Helligkeit im April gemessen mit zwei Vergleichssterne außerhalb des Bildfelds

Spektroskopie der Nova

Durch einem Shelyak-Alpy 600 Spektrographen mit Guiding-Modul (Spalt 10μ) an einem Skywatcher Esprit 150 ED-APO und einer ZWO ASI071 Pro-Kamera habe ich die Nova seit 26.3.2021 über 50 Mal spektroskopisch aufgenommen. Dabei wurden jeweils 120-150 Subframes zu je 20 s Belichtungszeit im Programm Fitswork gestackt und nur in

Luminanz entwickelt, um das vorhandene Restrauschen der Farbkamera zu minimieren. Die nichtlineare Wellenlängenkalibrierung erfolgte mit der Software RSpec von „Field Tested Systems“. Als Referenz leisteten aus praktischen Gründen die Emissionslinien des Be-Sterns „Tsih“ (Gamma Cassiopeiae) gute Dienste, weil dessen Dekretionsscheibe 2020/21 ein ausgiebig untersuchtes Objekt einer von mir geleiteten Jugend-forscht-Gruppe war. Dieser Stern ist nicht zuletzt wegen seiner relativ nahen Position zur Nova zur „Ein-Stern-Kalibrierung“ der Montierung gut geeignet.

Ziel war nicht nur, die Spektren qualitativ zu untersuchen, sondern auch die radiale Expansionsgeschwindigkeit v_{rad} der Gashülle zu bestimmen und die zeitliche Entwicklung dieser Geschwindigkeit zu dokumentieren.

Da sich die Gashülle schnell ausdehnt, ist das Spektrum des uns zugewandten Hüllenbereichs blauverschoben, die von uns abgewandte Seite zeigt ein rotverschobenes Spektrum. Es resultiert eine deutliche Verbreiterung der Linien. Als erster Vergleich wurden Linien im Sonnenspektrum verwendet, die im Vorfeld zu Testzwecken erstellt wurden. Die schmalsten Linien im Sonnenspektrum kamen auf eine Breite von 1-2 Pixeln, so dass dieser Wert vereinfacht als Instrumentengrenzwert angenommen wurde. Mit einer Dispersion von 2,5 Å/Pixel wurde so ein Wert für die spektrale Auflösung ($R \approx 900$) ermittelt. Ohne Fehlersubtraktion ergibt sich zwar nur eine relative, d.h. immer noch vom Instrument abhängige Verbreiterung. Da aber stets das o.g. Instrumentarium in gleicher Anordnung angewendet wurde, konnte der Verlauf der Entwicklung von v_{rad} recht gut abgeschätzt werden. Dabei waren meine Werte immer etwas kleiner, als Vergleichswerte professioneller Astronomen aus derselben Phase. Ferner ist auch zu beachten, dass die gemessenen Geschwindigkeiten evtl. nicht das Gesamtsystem darstellen, sondern aufgrund wechselnder optischer Dichte verschieden tiefe Gasmedien abbilden (s. später).

Aus der Verbreiterung der Linien gegenüber einer theoretisch „ruhenden“ Linie kann mit dem nicht relativistischen Doppler-Effekt ($v_{rad} \ll c$) die Expansionsgeschwindigkeit berechnet werden:

$$v_{rad} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \cdot c$$

Hierbei gilt mit Maßen in Angström (Å):

v_{rad} = radiale Komponente der Expansionsgeschwindigkeit

$\Delta\lambda$ = einseitige Verbreiterung der Linie in Å (gemessen am sog. PCygni-Profil, s.u.)

λ_0 = Wellenlänge der „ruhenden“ Linie, z.B. H α 6562,8 Å

c = Lichtgeschwindigkeit (299792,458 km/s)

Eine Besonderheit ist bei Sternen mit sich ausdehnender Hülle, dass viele Linien ein sog. P-Cygni-Profil aufweisen:

Es entsteht aus einer Überlagerung der Absorptionslinie in direkter Sichtlinie zum Stern durch die Emissionslinie derselben Wellenlänge, die durch Anregung der Atome der expandierenden Gashülle verursacht wird.

Erklärung: Die abgestoßene Gashülle bewegt sich in alle Richtungen vom Stern fort. Der Doppler-Effekt wirkt sich bei dem Teil, der sich auf den Beobachter zu bewegt in einer Blauverschiebung aus. Hier wird das vom Stern ausgehende Licht weitgehend in der Gashülle absorbiert (und gestreut), weshalb sich eine blauverschobene Absorptionslinie zeigt. Von dem Teil der Hülle, der von uns weg expandiert, wird ein Strahlungsüberschuss in Form einer breiten Emissionslinie empfangen. Von der Emissionslinie bleibt oft nur der rotverschobene Anteil ungestört sichtbar, der blauverschobene Anteil kann die Absorption nicht oder nur teilweise überkompensieren [9].

In RSpec hat man ein Werkzeug, mit dem die Messung der P-Cygni-Profile gut durchgeführt werden kann (Abb. 5). Das Spektrum wurde nach der Wellenlängen-Kalibrierung mit einem Polynom 3. Ordnung durch das geglättete Kontinuum dividiert („Normierung auf 1“). Die dargestellten blauen Messlinien wurden genau auf das Absorptions-Minimum (links) und das Emissions-Maximum (rechts) positioniert und die so gemessene Differenz $\Delta\lambda$ der Wellenlängen als Wert für die Linienverbreiterung verwendet.

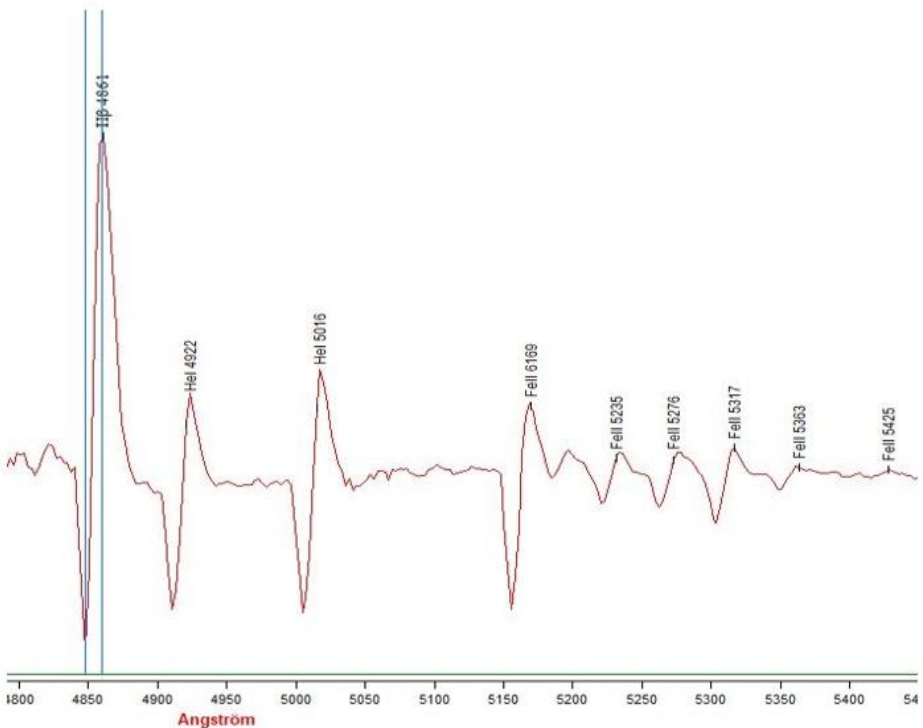


Abb. 5: Messung der Wellenlängen-Differenz $\Delta\lambda$ bei der H-Beta-Linie in RSpec

Neben weiteren Einflussgrößen ist das Radienverhältnis von Stern und abgestoßener Hülle für die Ausprägung des P-Cygni-Profiles ausschlaggebend. Bei Hüllen mit weniger als 1,5 Sternradien überwiegt die Absorption, bei Hüllen größer als etwa 5 Sternradien ist der Absorptionsanteil in der Regel verschwindend klein [9]. Die Absorptionen der P-Cygni-Profile waren bei der Nova Cas in verschiedenen Phasen unterschiedlich ausgeprägt (s. Vergleich später). Das kann somit ein Resultat des Radius der Gashülle sein oder mit einer sich ändernden Dichte der im Spektrum sichtbaren Hüllenregion erklärt werden. Vermutlich blickte man an unterschiedlichen Tagen unterschiedlich „tief“ in die Gashülle. Das würde in erster Erklärung bedeuten, dass die Hüllenbereiche nicht immer gleich dicht oder gleich angeregt waren.

Bei der Berechnung durch Vermessung aller jeweils sichtbaren P-Cygni-Profile wurde für jeden Tag ein Mittelwert gebildet. Dies erfolgte einmal für alle messbaren Balmer-Linien des Wasserstoffs, einmal für alle erkennbaren He I-Linien und schließlich für die Fe II-Emissionen, soweit sichtbar. Dabei schien die H-Alpha-Linie eine Sonderstellung zu haben, weshalb diese in einer Tabelle stets auch einzeln eingetragen und grafisch dargestellt wurde. I.d.R. zeigte diese für sich isoliert gemessen, höhere Werte von v_{rad} , als der Durchschnitt der Balmer-Serie als Ganzes.

Weiterhin konnte dies das Maß des jeweils am weitesten nach unten und nach oben abweichenden Geschwindigkeitswertes als Fehlergrenze verwendet werden.

Interessant ist der Vergleich der gemessenen Geschwindigkeit mit der Helligkeitsentwicklung, für welche die bestmögliche Quelle herangezogen wurde: Die Helligkeitskurve der Nova Cas, die von der AAVSO erhalten werden kann [11]. So ergab sich folgende Entwicklung für die scheinbare Expansionsgeschwindigkeit im Vergleich zur Helligkeit:

Die Geschwindigkeit schien also bereits kurz nach Entdeckung der Nova zunächst abzunehmen. Den ersten beiden Maxima folgte etwas zeitlich versetzt jeweils ein Anstieg der Geschwindigkeit besonders der H-Alpha-Linie. Im November nahm die Helligkeit kontinuierlich ab, begleitet von einem allmählichen Anstieg der gemessenen Expansionsgeschwindigkeit. Für die H-Alpha-Linie ergibt sich, wie oben schon erwähnt, augenscheinlich fast immer ein höherer Wert, als für den Durchschnitt der Balmer-Serie.

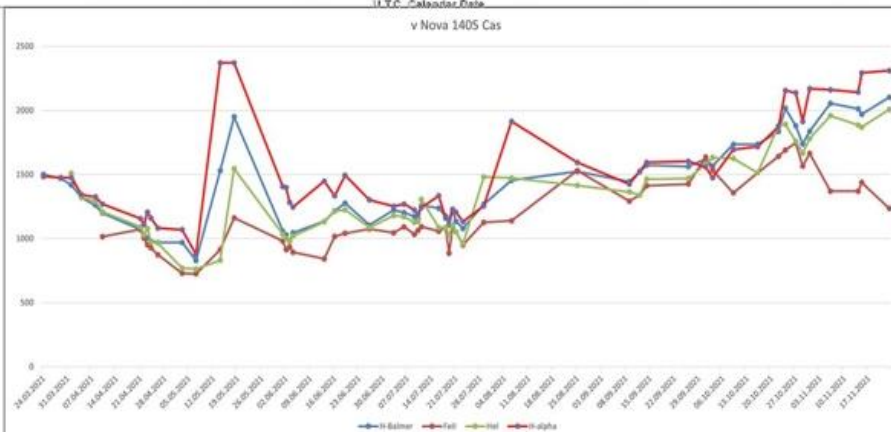
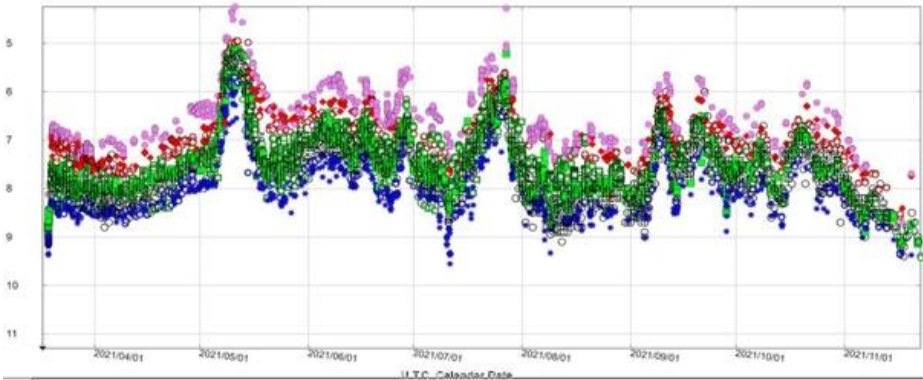


Abb. 6: Evolution der radialen Geschwindigkeit (unten) verglichen mit der AAVSO Helligkeitskurve (oben)

Qualitative spektrale Evolution der Nova

Die über 50 Spektren der Nova sollten aber noch mehr verraten: Wie entwickelt sich das Spektrum der Nova im Laufe der Zeit?

So habe ich die Daten genutzt, um alle Spektren parallel darzustellen. Tom Feld von RSpec war sehr geduldig und hat in dem neu entwickelten „Präsentations-Manager“ von RSpec statt 20 extra bis zu 100 Zeilen programmiert, um alle Spektren zeigen und vergleichen zu können.

In Abbildung 7 ist von unten nach oben chronologisch die gesamte Palette der Spektralkurven von März bis November eingetragen. Hierbei wurden die Spektraldiagramme „auf 1 normiert“, um die Entwicklung der Linien selbst unabhängig vom Kontinuum darzustellen.

Die jeweils Maximum-nächsten Spektraldiagramme sind zur besseren Übersicht gelb eingefärbt. Leider habe ich aufgrund des nicht immer zuverlässigen Wetters nicht alle Maxima 1:1 am gleichen Tag aufnehmen können.

Viele Linien, besonders gut erkennbar bei den Fe II- und He I-Profilen werden im Verlauf mehrmals stärker und schwächer. Ebenso verhält es sich mit den zugeordneten Minima der P-Cygni-Absorptionen.

Es gibt (mit etwas Unsicherheit) gegen Ende evtl. schon eine verbotene [NII]-Linie, die bei 5755 Å auftaucht. Sie ist in der Abbildung in roter Farbe beschriftet.

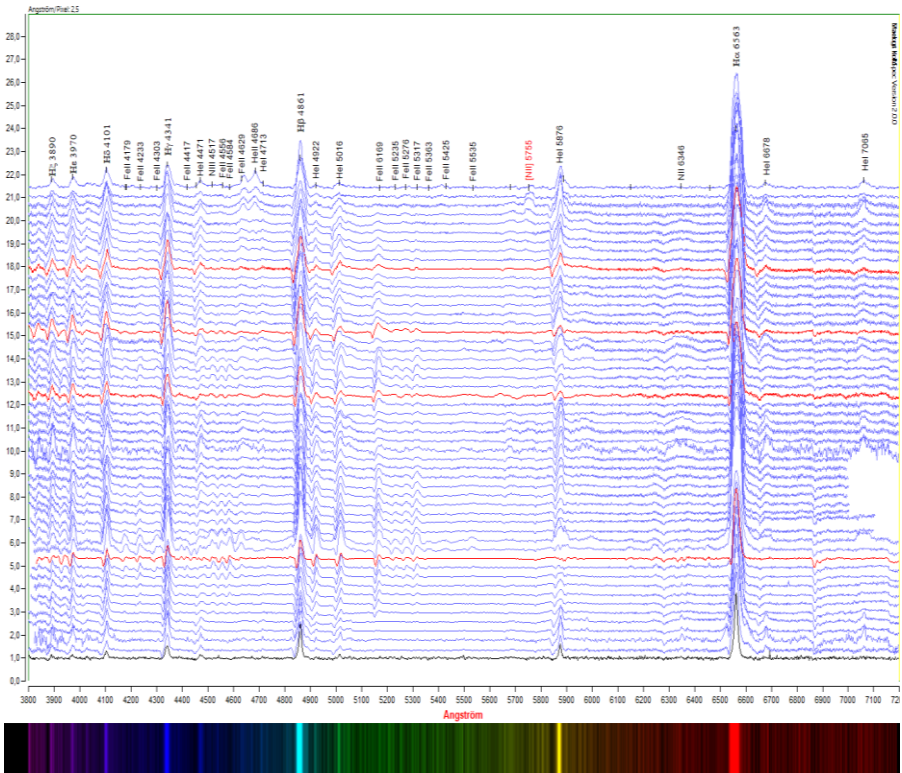


Abb. 7: Spektrale Evolution der Nova Cassiopeiae

Der Helligkeitsverlust im Laufe der Phasen nach den Maxima scheint jeweils durch die abnehmende Intensität des dabei im Spektrum sichtbaren Kontinuums (innere Bereiche der Gashölle) verursacht zu werden, wie später noch gezeigt wird. Die P-Cygni-Absorptionen sind in den letzten Spektren konstant schwach, aber nicht völlig verschwunden, ein Indiz für insgesamt abnehmende Dichte.

Nahe der Helligkeits-Maxima um den 10./11. Mai 2021 und 29. Juli 2021 soll in den folgenden Abbildungen (Abb. 8 und Abb. 9) jeweils das Spektrum vom Maximum (oder am nächsten daran) mit dem darauffolgenden Minimum verglichen werden um damit eine Klassifizierung der Nova Cas vorzunehmen und weitere Effekte darzustellen.

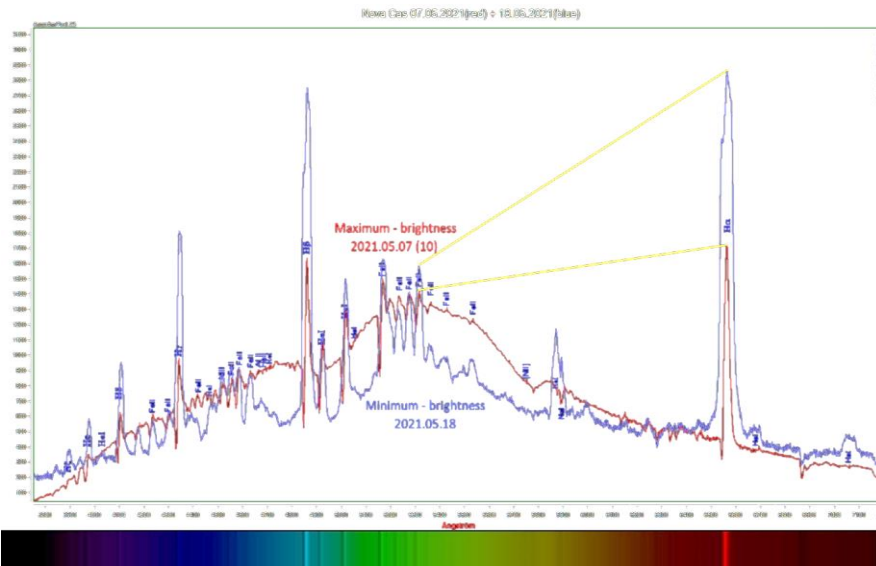


Abb. 8: Spektralvergleich des Maximums (7.5.2021) mit dem folgenden Minimum (18.5.2021)

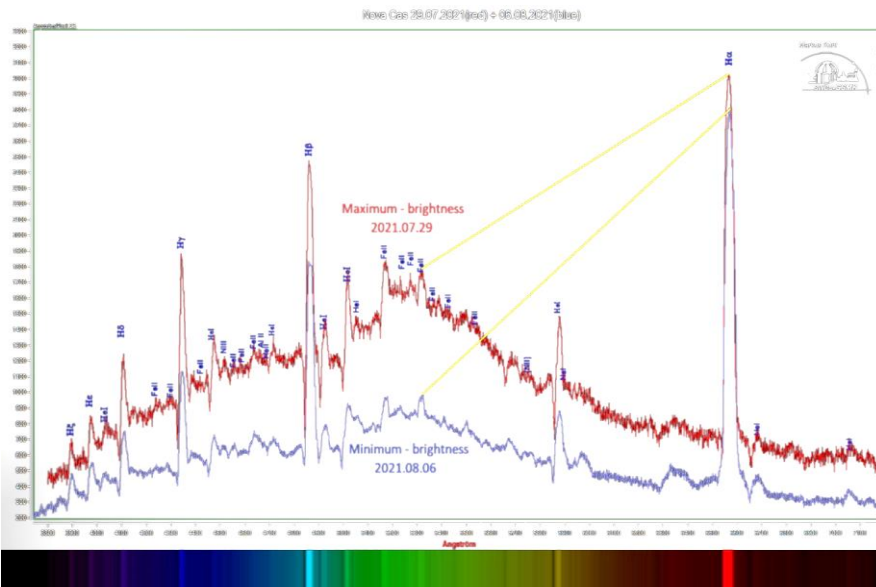


Abb. 9: Spektralvergleich des Maximums (29.07.2021) mit dem folgenden Minimum (06.08.2021)

Klassifizierung der Novae nach ihren Spektrallinien

Eine gängige Einteilung von Novae nennt drei Gruppen:

- *He/N-Novae* mit ausschließlich Linien von Wasserstoff, Helium und Stickstoff mit relativ breiten Linienprofilen (hoher HWZI-Wert = „Half width at zero intensity“)
- *Fe II-Novae*, bei denen neben den Linien des Wasserstoffs und Heliums besonders auffällige Linien des Eisens vorkommen. Deren Linienbreite ist in der Regel geringer als bei den He/N-Novae und charakterisiert durch relativ ausgeprägte -Cygni-Profile.
- *Hybride Novae*, bei denen beide Typen (He/N und FeII) parallel auftreten bzw. sogar mehrmals wechseln.

Gemäß der dokumentierten spektralen Evolution und der Spektralvergleiche Abbildung 7–9 kann die Nova V1405 Cas als *Hybride Nova* klassifiziert werden. Aufgrund der zeitlich recht ausgedehnten und lang andauernden Entwicklung etwa im Vergleich zur Nova Hercules (Juni 2021), die nur wenige Tage gut beobachtbar war und schnell ins Nebelspektrum überging, wird die Nova Cas gemeinhin als „langsame“ Nova eingestuft. Dafür würden auch die Expansionsgeschwindigkeiten sprechen: Bei der Nova Hercules im Jahr 2021 konnten mit der HWZI-Methode Werte von $v_{exp} \approx 5000\text{--}6000\text{ km/s}$ bestimmt werden, während die Werte der Expansionsgeschwindigkeit der Nova Cas im Bereich zwischen 1000 und 2000 km/s lagen. Das erklärt vermutlich, warum die Nova im Hercules schnell an Helligkeit verlor und recht schnell in das diffus nebulöse Stadium mit verbotenen Linien übergehen konnte. Schnell zeigten sich bei dieser Nova neben dem rasanten Helligkeitsverlust Linien des ionisierten Stickstoffs [NII] und Sauerstoffs [OIII] vergleichbar mit einem planetarischen Nebel. Die Nova Cas ist (Januar 2022) immer noch 9-10 mag hell.

Aus den obigen Abbildungen resultiert eine Antwort auf eine schon lang vor mir liegende Frage über die Farberscheinung von Novae (und Supernovae) - bezugnehmend auch auf einen Artikel zur Nova Cas in *Sterne und Weltraum* 01/2021 [6]. Bei Novae scheint die Gesamtfarbe ab dem Maximum jeweils zum nächsten Minimum deutlich in Richtung Rot zu wechseln, während im Maximum ein eher „bläulich-grünlich-weißes“ Sternscheibchen auf den Aufnahmen zu sehen ist (vgl. Abb. 10).

Der Grün-Rot-Farbindex ist gemäß [6] in den Phasen der Maxima am niedrigsten. Grün ist dann im gesamten Spektrum ziemlich dominant, wie die Spektren Abbildung 8 und 9 deutlich darlegen. Nach dem Maximum verringert sich die Helligkeit des Kontinuums, so dass das „Gesamtlicht“ wieder „roter“ wird, weil z.B. die erhabene H-Alpha-Linie die Farbe dominiert. Die vergleichenden gelben Linien in den Abbildungen 8 und 9 zeigen den Grün-Rot-Farbindex qualitativ. Ihre Steigung kann näherungsweise als anschauliches Maß für den Farbindex verwendet werden.

Erklärung: Das Kontinuum bildet vorwiegend die wenig transparenten Teile der inneren Expansionshülle ab. Es hat seine Helligkeit überwiegend im grünen Bereich des Spektrums und überwiegt im Maximum den Gesamteindruck der Farbe. Wird das Kontinuum schwächer erscheint mehr „Rot“.

Eliot Herman, ein Sternfreund aus Arizona, mit dem ich in diesem Zusammenhang in engem Kontakt stehe, hat die Farbänderung im Mai 2021 fotografisch schön abgebildet (Abb. 10).

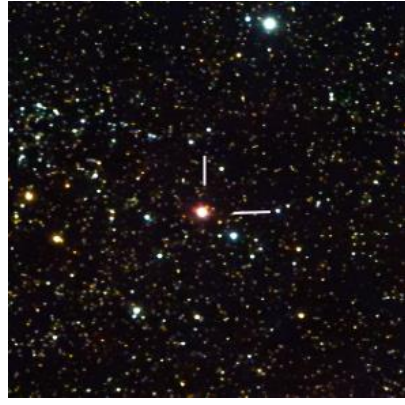
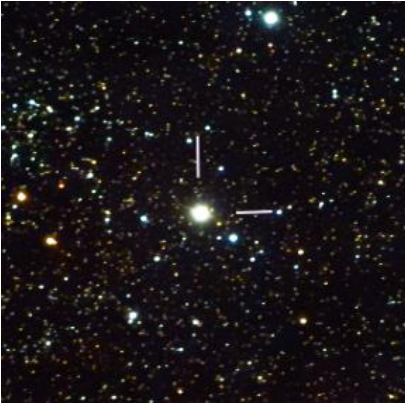


Abb. 10: Farbaufnahmen der Nova vom 11.5.2021 im Maximum mit 5,4 mag (links) und 21.5.2021 im zwischenzeitlichen Minimum bei 7,4 mag (rechts) (Fotos: Eliot M. Herman, Arizona [14]).

Ein weiterer Beleg für die Ursache des Farbeindrucks ist Eliot Herman mit Farbfilter- und Schmalband-Aufnahmen gelungen (Abb. 11).



Luminanz: 6,8 mag



Rot: 6,4 mag



Grün: 6,9 mag



Blau: 7,2 mag



H-Alpha: 5,9 mag



SiII: 6,9 mag



OIII: 7,2 mag

Abb. 11: Filter-Aufnahmen der Nova (rechts oben und Referenzstern HD220819 (linke untere Bildhälfte) (Fotos: Eliot M. Herman, Arizona [14]).

Anhand verschiedener Aufnahmen durch unterschiedliche Filter konnte die Helligkeit in verschiedenen Farbbereichen ermittelt werden. Die photometrischen Messungen vom 4.6.2021 (kleines Helligkeit-Zwischenmaximum, vgl. Helligkeitskurve) wurden mit dem Stern HD220819 als Referenzstern ermittelt.

Besonders bemerkenswert und auch gemäß diesen Aufnahmen ursächlich für die rötliche Gesamtfarbe ist die Dominanz in H-Alpha: Die Helligkeit in H-Alpha war z.B. am 4.6.2021 etwa eine Größenklasse höher, als in den anderen Wellenlängenbereichen.

Die genannten Abbildungen zeigen das Erscheinungsbild der Nova im Vergleich zum genannten Referenzstern in den verschiedenen Farbbereichen und die daraus berechneten Teilhelligkeiten mit der Methode aus [13].

Die Phasen der Nova Cassiopeiae

Im Laufe ihrer Entwicklung hatte die Nova mehrere Helligkeitsmaxima und Zwischenmaxima, die gemäß der Lichtkurve (Abb.6) beinahe periodische Merkmale aufwiesen. Man könnte 3 Hauptmaxima interpretieren, die jeweils von mindestens 3 mehr oder weniger ausgeprägten Nebenmaxima gefolgt wurden. Jeweils nach dem Maximum schien sich der Farbeindruck in Richtung Rot zu verändern.

Jeweils bei den Maxima (Mai, Juli, September) waren die Absorptionen der P-Cygni-Profile am tiefsten.

Nach den Maxima im Mai und Juli schien sich zudem eine beeindruckende Beschleunigung innerhalb der Balmer-Linien einzustellen, sichtbar insbesondere in der deutlichen Verbreiterung der H-Alpha-Linie (vgl. rote und blaue Spektralkurve in Abb. 8). Die mehrmalige Veränderung der scheinbaren Expansionsgeschwindigkeit ist in Abb. 6 dokumentiert.

Stößt ein mehrfach evtl. „pulsierend“ auftretender Prozess, der jeweils zu einem Helligkeitsmaximum führt, bestimmte Teile der Hülle an, so dass mit einer Zeitverzögerung von einigen Tagen nach dem Maximum im Spektrum eine Beschleunigung gemessen wird? Oder handelt es sich um ein Phänomen unterschiedlich dichter Medien, von denen das weniger dichte schneller ist und erst nach Abnahme der Dichte des langsameren Mediums im Spektrum wieder sichtbar wird, so dass dann im Spektrum dessen höhere Geschwindigkeit dominiert?

Das Spektrum zeigt im Vergleich wohl, wie oben schon angedeutet, jeweils gleichzeitig Entwicklungen in inneren und äußeren Bereichen des abgestoßenen Materials.

Handelt es sich physikalisch um mehrere "Abstoßungs-Ereignisse" vom Weißen Zwerg, die besonders im Kontinuum die Gesamthelligkeit der Nova im Laufe der Monate mehrmals erhöhen? Sehen wir eine vermeintliche Periode als Folge der gegenseitigen Umrundung der beiden Sternkomponenten?

Die unterschiedlichen, sich ständig verändernden P-Cygni-Profile (vgl. Abb. 8 und 9) verschiedener Linien sollten jedenfalls ein Indiz für Dichteveränderungen sein.

Im Folgenden sollen mögliche Erklärungen diskutiert werden.

Modelle der zeitlichen Entwicklung von Novae und ihrem Spektrum

1. Hachisu und Kato in Wischniewski [9]:

Nach dem TNR expandiert die äußere Schicht des Weißen Zwergs als optisch dichte (undurchsichtige) Hülle. Die Photosphäre vergrößert sich und damit steigt die Helligkeit rasant um bis zu 10-14 Größenklassen an. Die immer noch heiße Oberfläche des Weißen Zwergs erzeugt in dieser Phase genügend Strahlung, um die Gase der Hülle anzuregen oder zu ionisieren und einen Sternwind zu produzieren. Die Hülle besitzt prinzipiell zwei Bereiche: einen optisch dichten inneren Teil, dessen äußere Grenze die Photosphäre bildet. Das Gas außerhalb ist „dünnere“ und damit mehr oder weniger

durchsichtig [9]. Die Transparenz ist in verschiedenen Wellenlängenbereichen unterschiedlich.

Bei schnellen Novae (z.B. Nova Her 2021) bildet der Sternwind selbst die optisch dichte Hülle mit der Photosphäre. Durch die rasante Expansion (hier 5000 km/s) wird das Maximum schnell erreicht. Ebenso schnell führt die Expansion gleichzeitig mit einer Abnahme der nachströmenden Materie zu einer Dichteabnahme und zunehmenden Transparenz der Hülle, so dass die Helligkeit rasch wieder zurückgeht [9].

Bei einer langsamen Nova ist durch die geringere Massenverlustrate nur der innere Teil optisch dicht und expandiert langsamer. Mit abnehmendem Materiezufuhr von innen wird hier die innere optisch dichte Hülle zunehmend „dünnere“ und transparenter, die Photosphäre kleiner. Die Helligkeit nimmt dadurch eher langsam ab [9].

Dabei zeigen sich im Verlauf des Gesamt ereignisses verschiedene spektrale Phasen, die in der Literatur benannt werden und deren Übergänge fließend sein können, d.h. sie liegen zeitweise simultan vor:

- *Prämaximum-Spektrum* mit P-Cygni-artigen Spektrallinien besonders der Balmer-Serie
- *Hauptspektrum („Principal“)* beginnend kurz vor oder nach dem Maximum [2], [9]: charakterisiert durch weiter blauverschobene P-Cygni-Absorptionen und Emissionslinien des Wasserstoffs/Heliums, aber auch von Eisen
- *Diffuses („Enhanced“)* [2] oder *„Funkenspektrum“* [9]: Emissionsanteil der P-Cygni-Profilen nimmt zu, die Absorptionskomponente ist breiter und eher diffus und wird von der Emissionskomponente zunehmend kompensiert. Dabei spielen nach Wischniewski vermutlich „Turbulenzen in der Hülle“ eine Rolle [9].
- *Orionspektrum*: kurze Phase mit Absorptionslinien ähnlich von B-Sternen der Orion-Assoziation
- *Nebelspektrum*: Auftauchen von verbotenen Linien, z.B. [OIII], [NII] wie auch [FeII] bis [FeIV], ähnlich einem planetarischen Nebel.

Diese Phasen werden z.T. auch in den folgenden Modellen abgebildet:

2. Williams (2021) [5]:

Die Ursache der unterschiedlichen spektralen Klassen liegt in unterschiedlichen spektralen Komponenten mit zweierlei Herkunft (Weißer Zwerg und Begleitstern!) sowie dem oben schon erklärten „Optical Depth“-Phänomen (unterschiedliche optische Dichte der Gas-Medien in verschiedenen Phasen).

Williams sieht die Ursache der He/N-Linien im zugrunde liegenden Abstoßungsereignis vom Weißen Zwerg, welches durch den TNR als „Initial-Zündung“ verursacht wird. Die entstehenden Emissionslinien sind demzufolge von Rekombination und Fluoreszenzanregung verursachte H-, He- und N-Linien mit relativ hohem

Ionisationsgrad. Vor dem ersten dokumentierten Maximum der Nova Cas war ein He/N-Spektrum überwiegend, bei dem aber zunehmend auch Fe II-Linien auftraten (Abb. 7).

Die stärker werdenden Fe II-Linien haben nach Williams einen niedrigeren Anregungszustand. Dies deutet auf eine Stoßanregung der Elektronen hin. Die Fe II-Linien resultieren aus einer Kombination von Elektronenübergängen schwererer Elemente. Diese Form der Anregung ebenso, wie die prominenten P-Cygni-Absorptionsprofile, besonders bei den Fe II-Linien, lassen sich mit einer hohen Dichte des expandierenden Gases erklären. Das Vorkommen von Linien schwererer Elemente ist nach Williams typisch für einen stellaren Wind, der mutmaßlich eher vom Begleitstern ausgeht, als vom Weißen Zwerg. Dieser sollte ja eine Spektralklasse ähnlich unserer Sonne (oder später) haben.

Wir hätten es gemäß Williams also mit zwei Effekten zu tun: Dem Initialereignis (TNR vom Weißen Zwerg), welches eine erste Expansionshülle bildet. Trifft diese auf die äußeren Schichten des Begleiters, werden diese durch den Stoß/Schock beim Eintreffen aufgeheizt. Dadurch und angetrieben durch die Strahlung vom Weißen Zwerg wird ein Massenverlust des Begleitsterns initiiert. Der Massenverlust erfolgt gemäß Williams zu einem bedeutenden Teil in Form eines optisch dichten Sternwinds aus Material auch mit schwereren Elementen. Dies wird gemäß Williams durch die im Maximum deutlicher ausgeprägten Fe II-Linien mit klaren P-Cygni-Absorptionen untermauert (vgl. rote und blaue Graphen in Abb. 8 und 9).

Die Helligkeitsmaxima und das Fe II-Erscheinungsbild im Maximum sind gemäß Williams weniger das Resultat einer effektiven Temperatursteigerung, als vielmehr Folge des veränderten Radius der sichtbaren Photosphäre, welcher durch die Dichteverteilung des abgestoßenen Materials im jeweiligen Stadium bestimmt wird. Infolge der Expansion nimmt die optische Dichte dieses Materials ab, optisch weniger dichte Bereiche mit anderen Expansionsgeschwindigkeiten werden (wieder) sichtbar, es entsteht eher wieder der Eindruck einer He/N-Nova, die insgesamt an Helligkeit verliert. Der hybride Charakter der Nova wäre damit geklärt.

Es sei ein eigener Gedanke erlaubt: Folgt man dem Modell von Williams weiter, dürfte sich gemäß der Helligkeitskurve der Nova Cas dieses Szenario der Zu- und Abnahme der optischen Dichte mehrfach wiederholen. Entweder war der Sternwind nicht konstant, sondern eher „pulsierend“. Oder auch die Orbitalbewegung beider Sterne hat einen Einfluss auf die unterschiedlichen Bereiche, die im Spektrum erkannt werden können. Das möchte ich im folgenden Schaubild (Abb. 12) vereinfacht in Form eines Orbitalumlaufs darstellen. In Wirklichkeit werden sich bei einer angenommenen Umlaufzeit von viereinhalb Stunden [6] bis zum ersten Maximum zahlreiche gegenseitige Umrundungen abgespielt haben. Ob dabei die Neigung der Orbitalebene bezüglich unseres Blickfelds (Inklination) eine Rolle spielt, möchte ich bewusst offenlassen.

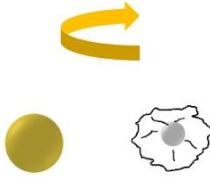


Abb. 12a: Initiale Hüllenabstoßung des Weißen Zwergs (TNR)- Photosphäre dehnt sich aus, die Nova wird sichtbar. Nova vom Typ He/N.



Abb. 12b: Begleitstern und Weißer Zwerg umrunden sich. Die abgestoßene Hülle dehnt sich weiter aus. Nova vom Typ He/N.

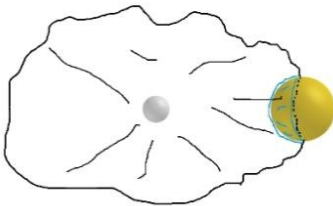


Abb. 12c: Die abgestoßene Hülle erreicht den Begleitstern und erzeugt beim Auftreffen einen Schock und Aufheizung (hellblau dargestellt). Der Sternwind zeigt durch Stoßanregung auch Fe II-Linien. Zunahme der Helligkeit Durch Vergrößerung des optisch dichten Bereichs.

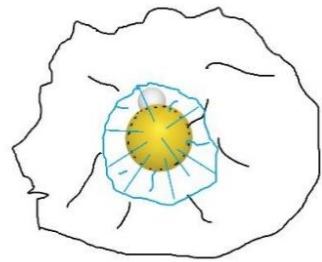


Abb. 12d: Im Spektrum sind beide Komponenten (größte optische Dichte). Das Fe II-Spektrum überwiegt jetzt neben dem immer noch sichtbaren He/N-Spektrum, P-Cygni-Absorptionen der Fe II-Linien sind tief. (Idee und Grafik: Markus Kohl)

Darin steckt vielleicht eine Erklärung für die mehreren fast periodischen Helligkeits-Maxima, die insgesamt aber an Intensität abgenommen haben. Ebenso wäre das mehrmalige Auftauchen und beinahe Verschwinden bestimmter Linien des Fe II-Spektrums (Abb. 7) ein Hinweis auf ein solches Modell.

3. Aydi et al. (2020) [2]:

Unterschiedliche Materie-„Flows“ vom Weißen Zwerg

Aydi et al. stützen sich in ihren Ausführungen auf zahlreiche Beobachtungen von Novae mit z.T. hochauflösender Spektroskopie und widersprechen weitgehend der Beteiligung des Begleitsterns als Ursache der Fe II-Linien. Nach ihren Ausführungen wäre um den Begleiter eine ungewöhnlich hohe Masse- und Energiemenge nötig, damit der von ihm ausgehende Masseverlust im Spektrum mit den eigentlichen Nova-Ejekta konkurrieren oder diese im Spektrum gar übertreffen könnte.

Bei Aydi werden sehr spezielle gemeinsame Merkmale der spektralen Entwicklung vieler Novae herausgestellt und alle im Wesentlichen auf den Weißen Zwerg

zurückgeführt. Dazu gehören drei Materieströme („Flows“), die zeitlich nachfolgend, aber auch simultan auftreten:

Der „Slow flow“: Vor dem eigentlichen Maximum zeigen nach den Ausführungen die Balmer–Linien Emissionsprofile mit blauverschobenen P-Cygni–Absorptions-Linien bei etwa 200–1000 km/s, korreliert mit der Geschwindigkeits-Klasse der Nova. Bei der Nova Cas ergaben sich aus meiner Messung vor dem Maximum aus dem Durchschnitt der Balmer-Linien Werte von $v_{\text{Rad}} = 1500$ km/s, bis zum Maximum gingen diese kontinuierlich auf unter 1000 km/s zurück, was sich gut mit Aydis Daten deckt.

Kurz nach dem optischen Peak erscheint gemäß Aydi et al. eine breite (schnelle) Emissions-Komponente mit Geschwindigkeiten wieder jenseits der 1000 km/s, die den sog. „Fast Flow“ im Spektrum abbildet.

In meiner Messung zeigte sich dies besonders bei H-Alpha, bei über 2300 km/s, während der Rest der Balmer-Linien nur einen geringfügigen Anstieg der Geschwindigkeit verzeichnen ließen. Hierbei sind nach dem Maximum die zugeordneten P-Cygni-Absorptionen eher schwach ausgeprägt (vgl. blaue Kurven in Abb. 8 und 9 sowie 13).

Als Besonderheit lässt sich in Übereinstimmung mit Aydi hier auch erkennen, dass die ursprüngliche langsame Absorption nicht verschwunden ist, sondern unterhalb der Spitze der breiten Emissionslinien als „Delle“ immer noch erkennbar ist (vgl. Abb. 13 für H-Alpha links und Fe II rechts). Dies stellt nach Aydi ein besonders stichhaltiges Argument für die zwei „Flows“ dar: Eine neue schnelle (breite) Emission, verursacht vom „Fast Flow“, mit gering ausgeprägten P-Cygni Absorptionen und die ursprüngliche „langsamere“ Emission (zurückzuführen auf den „Slow Flow“) mit deutlichen P-Cygni-Profilen.

Es handelt sich also um eine „Koexistenz“ zweier Komponenten im Spektrum, die ein Anzeichen für mindestens zwei physikalisch verschiedene Materie-Ströme („Flows“) sind. Einfach gesagt: Die „Delle“ nahe der Spitze zeigt, dass eine signifikante Menge des ursprünglichen Materie-Stroms immer noch vorhanden ist, während sich ein neuer Strom etabliert hat. Weiterhin ist zu bemerken, dass sich die schnelle Komponente vorübergehend sogar noch beschleunigt (vgl. Geschwindigkeitskurve, Abb. 6, bei der ich hier wohl vorwiegend die schnelle Komponente erfasst habe, weil ich mir über die Koexistenz der langsameren Komponente zu dieser Zeit noch nicht bewusst war).

Gestützt auf frühere Arbeiten anderer Autoren wird im Gegensatz zu Williams Artikel nur der Weiße Zwerg als Ursprung beider „Flows“ gesehen. Der langsamere Materiestrom hat seinen Ursprung im TNR als Initialereignis und kann wie eine aspherische Hülle modelliert werden, die sich an der Orbitalebene beider Sterne konzentriert. Innerhalb dieser Materiehülle bildet sich in der Folge ein relativ schneller strahlungs-getriebener Sternwind durch das kontinuierlich weiter „brennende“ nukleare Feuer an der Oberfläche des Weißen Zwergs. Der Sternwind ist bevorzugt bipolar zum Sternsystem orientiert, in der Orbitalebene wird ein Teil nach einer gewissen Zeit aber den äußeren Strom einholen. Die damit einhergehende Schockwelle bei der Kollision beider Ströme erhöht die optische Dichte des Gesamt-Systems und führt zu einem Helligkeitsmaximum. Gleichzeitig stellt sich gemäß Aydi beim optischen Peak eine

weitere Komponente („Intermediate“) ein, deren Geschwindigkeit zwischen der langsamen und schnellen Komponente liegt. Die Fe II-Linien hätten dann ihren Ursprung in der Stoßanregung bei der Kollision der Ströme selbst.

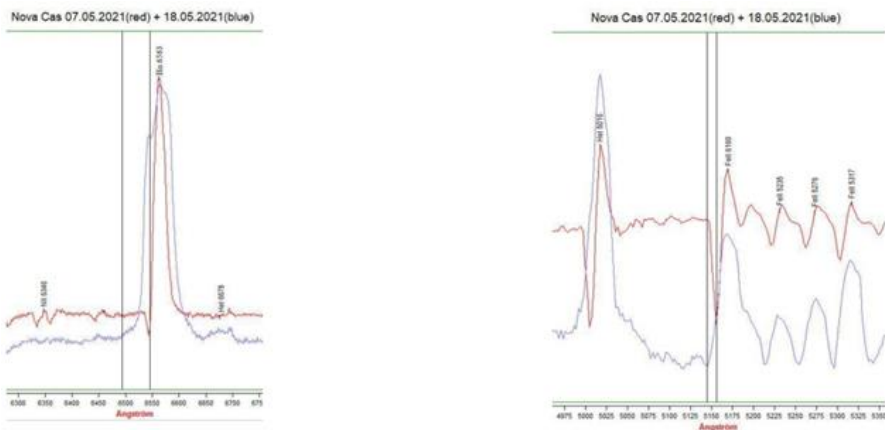


Abb. 13: Spektralvergleich des Maximums (7.5.2021) mit dem folgenden Minimum (18.5.2021): H-Alpha ist hier im Minimum höher, für die Gesamthelligkeit im Maximum überwiegt aber das Kontinuum! Die langsame P-Cygni-Absorptions-Komponente im breiten oberen Teil der blauen Kurve entspricht gut dem tiefen Tal in der roten Kurve. Die breite Basis der blau gefärbten H-Alpha Emission lässt sich nach Aydi auf die schnellere Komponente zurückführen. Auch bei den He I- und Fe II-Linien lassen sich in den P-Cygni-Profilen die schnelle und die langsame Komponente erkennen, wie im rechten Bild gezeigt ist.

Die schnellere Komponente expandiert jenseits des langsamen „Flows“ weiter und erhöht dabei sogar vorübergehend ihre Geschwindigkeit. Durch die Expansion nimmt ihre (optische) Dichte aber wieder ab und gibt den (spektroskopischen) Blick wieder frei auf die weiter innen liegenden langsameren Schichten. Die Helligkeit des Gesamtsystems nimmt in der Folge weiter ab und die Geschwindigkeit scheint sich zu reduzieren.

Sowohl die Helligkeits- als auch die Geschwindigkeitsentwicklung wäre auch hier ein Phänomen vorwiegend der optischen Dichte. Die fast periodischen Zwischenmaxima der Helligkeit der Nova Cas wären dann einer Art pulsierender Schwankung der optischen Dichte geschuldet. Welcher physikalische Prozess könnte das erklären?

Fazit und Grenzen

Alle Modelle sind in den von mir erstellten und aufbereiteten Spektren erkennbar, keines von ihnen aber ausschließlich. Für mich als (eigentlicher) Laie ein Grund, die Ursache in einer Kombination aus beiden Effekten zu vermuten. Mir scheint die Beteiligung des Begleiters insbesondere bei den Fe II-Linien am plausibelsten, das Auftreten der unterschiedlich „schnellen Komponenten“ spricht dagegen eher für das Modell der

verschiedenen „Flows“. Eine weitere tiefergehende Prüfung übersteigt meine Fähigkeiten und wohl auch die Kapazität meiner Ausstattung.

Weitere Entwicklung der Nova

Nach dem letzten Maximum Mitte Oktober, war die Materiedichte wohl effektiv zu gering, es folgten keine nennenswerten Maxima mehr. Die Nova verliert seitdem kontinuierlich an Helligkeit, die Gasdichte der Hülle(n) nimmt stetig ab und die Nova wechselt mutmaßlich ins Nebel-Stadium mit Linien aus „verbotenen Übergängen“, die auf eine geringe Dichte hinweisen, z.B. [NII] oder [OIII]. Diese Linien deuteten sich auf den zunehmend diffusen Spektren im November auch schon an (vgl. Abb. 14).

Während die Nova Cas sich also von November bis Dezember 2021 zum Nebelspektrum zu entwickeln schien, drohen nun die mutmaßlichen „verbotenen Linien“ von [OIII] bei 4959 A und 5007 A (grün beschriftet) zwischenzeitlich wieder zu verblassen (s. Vergleiche in Abb. 14 und 15). Andererseits entwickeln einige Linien wieder (mehr oder weniger deutliche) Absorptionen von P-Cygni-Profilen. Deutet dies auf eine wieder erhöhte Dichte von Teilen der Hülle hin? Wenn ja, wird die Helligkeit erneut zunehmen?

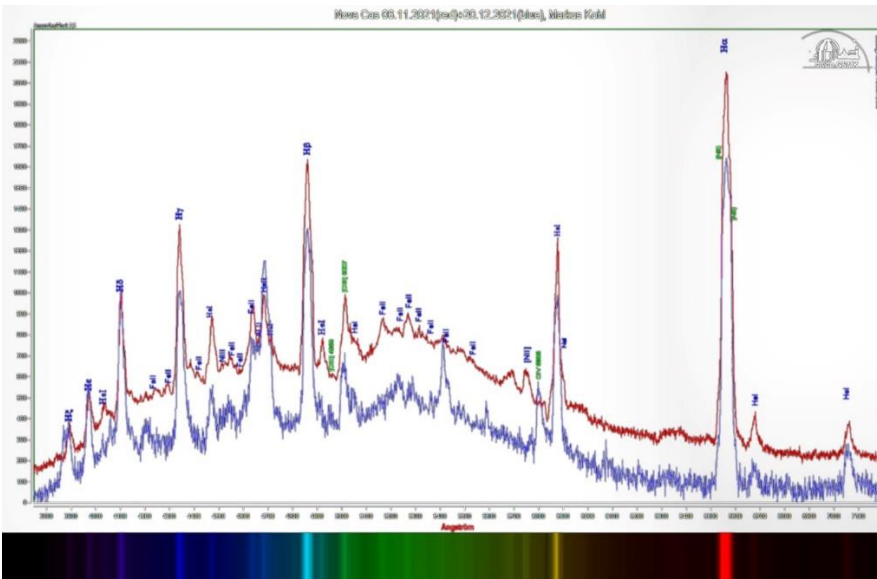


Abb. 14: Vergleich der Spektren vom 6.11.2021 und 20.12.2021: Anzeichen verbotener Linien?

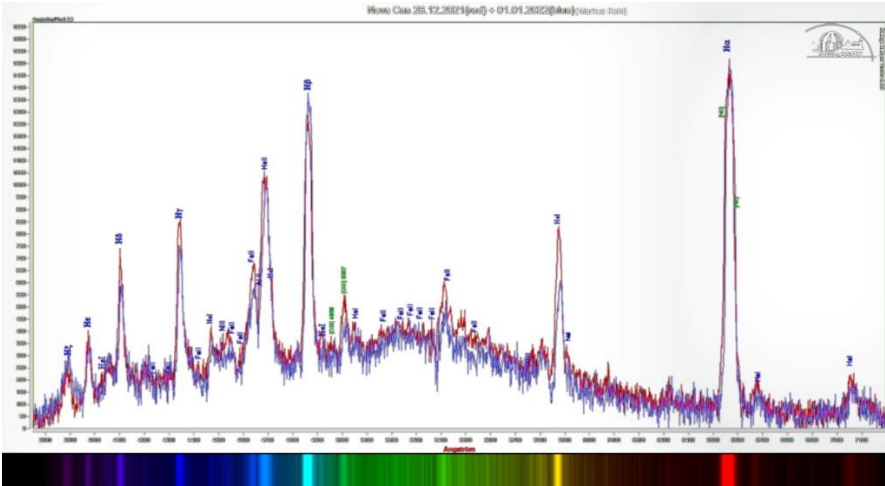


Abb. 15: Vergleich der Spektren vom 26.12.2021 und 1.1.2022: Anzeichen von P-Cygni-Profilen bei HeI und FeII

Quellen/Literatur/Bildnachweis

- [1] J. Kanipe, D. Webb: „Annals of the deep Sky“, Willmann-Bell, 2. Auflage 2017
- [2] E. Aydi, L. Chomiuk et al. “Early spectral evolution of classical novae: consistent evidence for multiple distinct outflows”, arXiv:2010.07481v1 [astro-ph.HE], Oct.2020
- [3] M.F.M. Trypsteen, R. Walker: “Spectroscopy for Amateur Astronomers” Cambridge University Press, 2017
- [4] R. Walker: “Spectral Atlas for Amateur Astronomers”, Cambridge University Press, 2017
- [5] R. Williams: „Origin of the He/N and FeII Spectral Classes of Novae“, The astronomical Journal, 144:98 (8pp), Oct. 2021
- [6] W. Vollmann, D. Bannuscher: “ Eine helle Nova in der Kassiopeia“, Sterne und Weltraum, 01/2022
- [7] Schulbuch: "Astronomie Plus", 1.Auflage, Cornelsen Verlag, Berlin
- [8] W. Winnenburger, "Einführung in die Astronomie", BI-Wissenschaftsverlag, 1990
- [9] E. Wischniewski, "Astronomie in Theorie und Praxis", 7. Auflage, Kaltenkirchen 2016
- [10] U. Bastian, schriftliche Auskunft per Mail vom 15.12.2021
- [11] AAVSO „Enhanced Lightcurve generator“; <https://www.aavso.org/LCGv2/>
- [12] Tom Field, <https://www.rspec-astro.com/> : Mündliche und schriftliche Auskünfte per E-Mail
- [13] M. Kohl: „Auf Hubble´s Spuren: Eine anschauliche fotometrische Analyse des ersten extragalaktischen Veränderlichen M31-V1“; <https://www.bav-astro.eu/rb/rb2019-1/14.pdf>
- [14] **Bildnachweis:** Abb. 10 und 11 mit freundlicher Genehmigung von Prof. Eliot M. Herman, Arizona
- [15] **Bildnachweis:** Alle weiteren Bilder und Grafiken stammen vom Autor