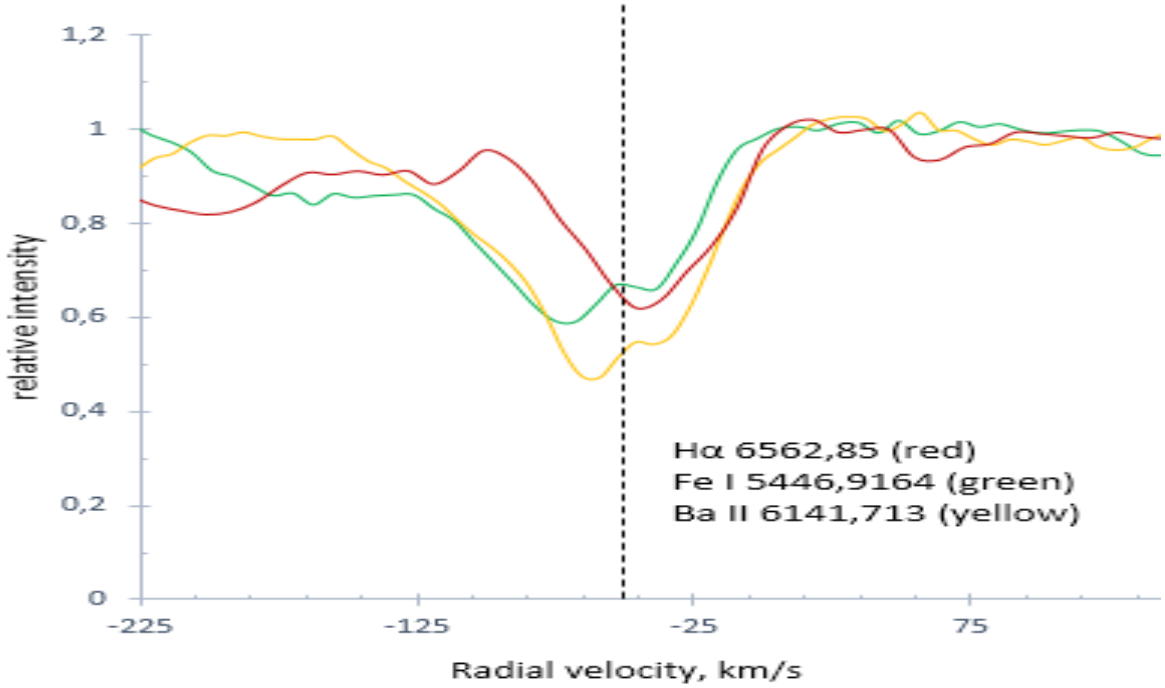
Auffälligkeiten und Veränderungen im Spektrum des gelben Hyperriesen ρ Cassiopeiae



Louisa Hofmann
Lilienstraße 42, 42369 Wuppertal
louisax-hofmann699@gmx.de

Carl-Fuhlrott-Gymnasium
Schülerlabor Astronomie
Jahrgangsstufe: Q1
Kursleiter: Bernd Koch

Abgabedatum: 29.05.19

Inhaltsverzeichnis

1.Vorwort ***4***
2.Grundlagen ***5***
2.1. Elektromagnetische Strahlung *5*
2.1.1. Polarisation *5*
2.2. Strahlungsdruck *5*
2.3. Licht *6*
2.4. Der Wellen-Teilchen-Dualismus *7*
2.5. Die Spektroskopie *8*
2.5.1. Wege zur Brechung des Lichtes *8*
2.6. Grundlagen der Spektroskopie *9*
2.7. Der Dopplereffekt *10*
2.7.1. Longitudinaler Doppler-Effekt *10*
2.7.2. Transversaler Doppler-Effekt *10*
2.7.3. Der Doppler-Effekt bei einem beliebigen Winkel *10*
2.7.4. Der Doppler-Effekt bei der Rotverschiebung *10*
2.8. Rotverschiebung und Blauverschiebung *11*
2.9. P-Cygni-Profil *12*
2.10. Pulsationsveränderliche Sterne *12*
2.10.1 Der Kappa Mechanismus *12*
2.10.2. Der Epsilon-Mechanismus *13*
3.Klassifizierung von Sternen ***14***
3.1. Das Hertzsprung-Russell-Diagramm ***14***
4.Gelbe Hyperriesen und rho Cas ***14***
4.1. Gelbe Hyperriesen *14*
4.2. rho Cassiopeiae *15*
4.2.1. Das Spektrum von rho Cas *17*
5.Experimenteller Teil ***17***
5.1 Die Sternwarte am Carl-Fuhlrott-Gymnasium und der Projektkurs Astronomie *17*
6. Technische Ausstattung ***18***
6.1. Das Teleskop (50cm Teleskop PlaneWave CDK20) *18*
6.2. 10 Micron Keypad *20*
6.3. Die GM4000HPS- Montierung *20*
6.4. Der BACHES Echelle Spektrograph *21*
7. Arbeitsauftrag/Ziel ***22***
8.Aufnahmen der Spektren ***22***
8.1. Die Programme *23*
8.1.1. 10Micron Keypad *23*
8.1.2. SpecTrack *23*
8.1.3. Anfahren des Zielsternes *24*
8.1.4. Aufnahme des Spektrum mithilfe von Maxim DL 5Pro *25*
9.Der Beobachtungsabend und der Ablauf ***26***
10. Kalibrieren der Spektren ***26***
10.1. Vorbereitung der Spektren – Kalibrierung (Windows und LINUX) *26*
10.2. Aufnahmezeit, Temperatur und andere wichtige Daten ermitteln: *26*

10.3. Heiße Pixel und kosmische Strahlung *29*
10.4. Vorbereitung auf LINUX *31*
10.5. Normierung der Daten *33*
10.6. Bearbeitung mit BASS *34*
10.6.1. Korrektur der x-Achse *34*
10.6.2. Korrektur der Erdbewegung *35*
11. Die Arbeit „Changes in the optical spectrum of the hypergiant Rho Cas due to a shell ejection in 2013“und meine Erkenntnisse ***36***
11.1. Vorwort zu dem wissenschaftlichen Referenzpaper/Skript *36*
11.2 Entdeckungen in der Referenzpublikation *37*
11.3. Zu Figur 2 aus der Referenzpublikation *37*
11.4. Meine Aufnahme von H-Alpha (16.10.18) im Vergleich zu den Aufnahmen aus der Arbeit *38*
11.5 Meine Messungen zu Hα am 16.10.18 ..... *40*
11.6. Das Verhalten von Barium - Figur 3 ..... *40*
11.7. Meine Aufnahmen von den Elementen aus Figur 4 im Vergleich zum Skript *42*
11.8. Meine Aufnahmen zu den Elementen aus Figur 6 im Vergleich zu dem Skript *44*
11.9. Schlußfolgerung des Skriptes und meine Schlußfolgerungen zu meinen Forschungen. . *46*
12. Fehlerdiskussion ***47***
13. Ausblick ***48***
14. Danksagung ***49***
15. Eigenständigkeitserklärung und Unterschrift ***50***
16. Verwendete Programme ***50***
17. Quellen ***50***

1.Vorwort

Schon seit meiner Kindheit interessiere ich mich für die Astrophysik und möchte das Universum verstehen lernen und neue Entdeckungen machen. Gerade außergewöhnliche Deep-Sky-Objekte, wie Neutronensterne, schwarze Löcher oder Magnete faszinieren mich sehr. Ich weiß schon seit meiner Kindheit, dass ich meinem Traum zu meinem Beruf machen möchte und wußte somit schon sehr früh, dass ich Astrophysik studieren und später in der Forschung tätig sein möchte. Neben verschiedener außerschulischen Kursen befaßte ich mich in meiner Freizeit auch schon immer stark mit den Themen und bekam immer mehr den Reiz, das Universum zu verstehen. Um für das Studium gut vorbereitet zu sein, bin ich im Sommer 2017 auf das Carl-Fuhlrott-Gymnasium gewechselt, um den Projektkurs Astronomie zu belegen und einen Physik-LK haben zu können. Obwohl der Projektkurs regulär erst in der Q1 (11 Klasse) angeboten wird, durfte ich bereits in der 10 Klasse an dem Projektkurs teilnehmen. Das CFG hat eine eigene Sternwarte, mit 7 Teleskopen, an denen Schülerinnen und Schüler der Oberstufe, sowie Studenten an Forschungsprojekten arbeiten können. Geleitet werden die Kurse von Michael Winkhaus (Lehrer) und Bernd Koch (Physiker).

Nach Theoriestunden im Kurs über die astronomischen Grundlagen, Spektroskopie, Astrofotografie und Einweisungen zu den Teleskopen, hat sich der Kurs Themen für die individuellen Projektarbeiten ausgesucht. Mir war von Beginn an schon klar, dass ich kein „Normales“ Objekt untersuchen möchte, sondern eher ein komplizierteres Objekt, da diese sehr interessant sowie oftmals noch nicht ausreichend erforscht sind. Durch die Suche nach möglichen Wolf-Rayet-Sternen im Internet, die ich von der Position der Sternwarte aber nicht beobachten konnte, traf ich auf einen Artikel über rho Cas (ρ Cas).
Seine starken Lichtschwankungen, sein instabiles Verhalten und die Ungewißheit, ob der Stern nicht schon längst in eine Supernova kollabiert ist, machen das Thema sehr interessant. Da diese Sternform (Gelbe Hyperriesen) in der Milchstraße sehr selten ist und mein Interesse stark geweckt war, habe ich mich entschieden, rho Cas genauer zu analysieren und zu erforschen. Meine konkreten Fragen waren vor allem, warum rho Cas so instabil ist, was ihn charakterisiert und warum er so schnell zu kollabieren scheint. Im Laufe der Arbeit habe ich versucht, genau diese Fragen zu beantworten.
Für meine Beobachtungen habe ich den Stern spektroskopiert und die Spektren ausgewertet. Anschließend habe ich sie mit einer wichtigen Arbeit („Changes in the optical spectrum of the hypergiant Rho Cas due to a shell ejection in 2013“) verglichen, die den Stern im Zeitraum von 2008-2017 beobachtete und eine Abstoßung der Wasserstoffhülle belegen konnte und bestimmte Doppellinien im Spektrum genauer untersucht hat. Das Skript wurde von V.G.Klochkova, V.E.Panchuk und N.S.Tavolzhanskaya verfaßt. Meine eigenen Daten habe ich schließlich für das Jahr 2018 zugefügt.

Abbildung 1: Das CDK Teleskop und Ich

2.Grundlagen

2.1. Elektromagnetische Strahlung

Als elektromagnetische Strahlung werden Wellen bezeichnet, die aus elektrischen und magnetischen Feldern gekoppelt sind.
Zu diesen Wellen gehören Radiowellen, Mikrowellen, Wärmestrahlung, Licht, Röntgenstrahlung und Gammastrahlung.
Die Wechselwirkungen der Materie mit diesen elektromagnetischen Wellen im Vakuum hängen von ihrer Frequenz ab und variiert zudem nach Größenordnung.
Unabhängig ihrer Frequenz bewegen sie sich mit Lichtgeschwindigkeit c im Vakuum, in Materie hingegen, kann die Geschwindigkeit verringert sein.

2.1.1. Polarisation

(Richtung/Schwingung)
Im freien Raum stehen die Vektoren von dem elektrischen und magnetischen Feld senkrecht auf der Ausbreitungsrichtung

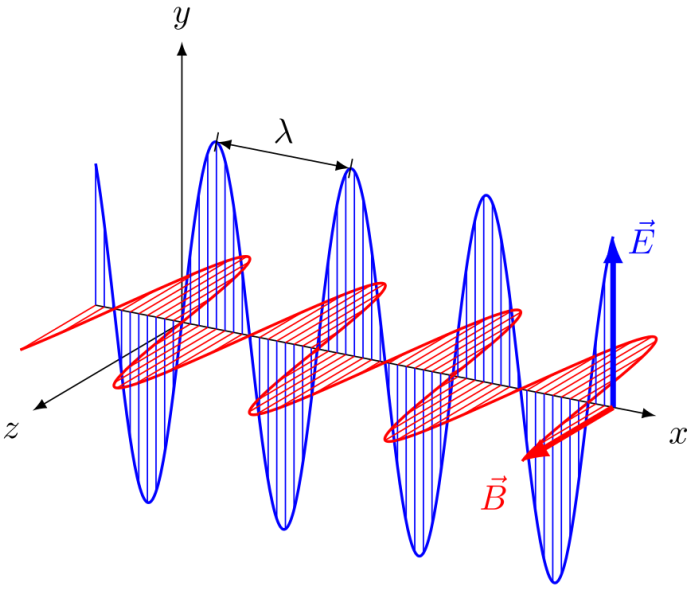


Abbildung 2: Linear elektromagnetische Wellen im Vakuum

Die monochromatische Welle mit Wellenlänge λ breitet sich in *x*-Richtung aus, die elektrische Feldstärke $\vec{E}$ (in blau) und die magnetische Flußdichte $\vec{B}$ (in rot) stehen zueinander und zur Ausbreitungsrichtung im rechten Winkel (Rechtssystem) [1]

2.2. Strahlungsdruck

Der Strahlungsdruck/Lichtdruck wird mit p_{St} ausgedrückt und steht für den Druck der durch absorbierte, emittierte oder reflektierte Elektromagnetische Strahlung auf eine Fläche wirkt.

Bei Absorption und Emission ist der Strahlungsdruck gleich der Intensität I der Welle bzw. der Bestrahlungsstärke E_e, jeweils dividiert durch die Lichtgeschwindigkeit c:

$$p_{St} = \frac{I}{c} = \frac{E_e}{c}$$

mit

$$[p_{St}] = \frac{N}{m^2} = \frac{Nm}{m^3} = \frac{J}{m^3} = Pa \text{ (Pascal)}$$ (Einheiten)

[1] https://de.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetische_Welle,
Abb 2: https://de.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetische_Welle

Bei vollständiger Reflexion ist der Strahlungsdruck doppelt so groß, wie bei vollständiger Absorption. [2]

2.3. Licht

Weißes Licht ist aus mehreren Farben zusammengesetzt. Es besteht aus einer Kombination der Farben Blau, Grün und Rot. Diese drei Farben alle miteinander gemischt ergeben die Farbe weißes Licht.

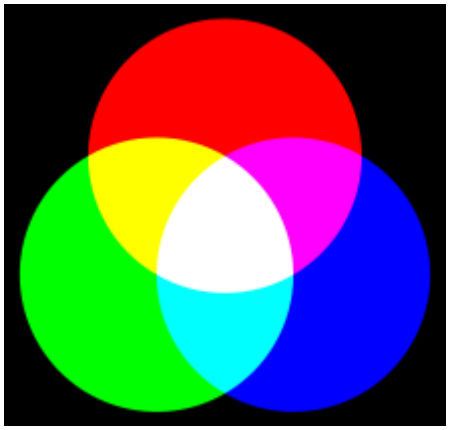


Abbildung 3: Additive Farbmischung

Allerdings gibt es auch noch ganz andrer Lichtformen die man als „unsichtbares Licht“ bezeichnet. Zum Beispiel „Radiolicht“, „Infrarotlicht“, „UV-Licht“, „Röntgenlicht“ oder „Gammalicht“.

Licht an sich ist eine Form der elektromagnetischen Strahlung.

Die verschiedenen Arten des Lichts haben ihre Eigenschaften in den Wellenlängen (Lambda). Radiostrahlen haben eine größere Wellenlänge (Millimeter-Kilometer), während UV Strahlen sehr kleine Wellenlängen haben, welche in Nanometer gemessen werden. Das für uns sichtbare Licht liegt auch im Nanometerbereich, nämlich von 380nm-750nm. Dieser sichtbare Teil wird daher auch elektromagnetisches Spektrum genannt.

Zusammengefaßt charakterisieren diese Wellenlängen also das Licht. Durch die Messung der Wellenlängen kommt man damit auch an wichtige Informationen über Eigenschaften des Objektes, welches beobachtet wird.

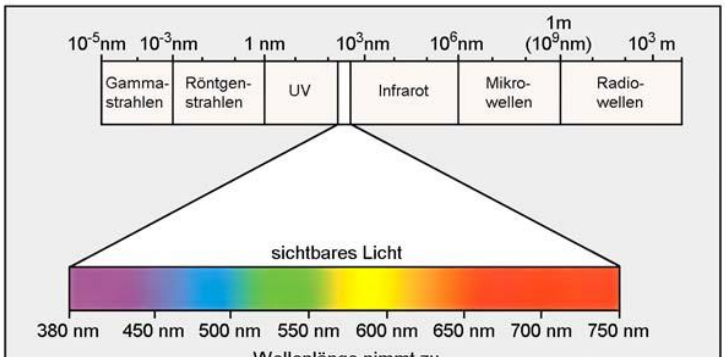


Abbildung 4: Elektromagnetisches Spektrum und sichtbares Licht

Dabei absorbieren die einzelnen Spurengase in unterschiedlichen Absorptionsbanden *(also nur in ganz bestimmten Wellenlängenbereichen).* Der Grund dafür ist, dass die Moleküle dieser Gase schwingen und rotieren können. Entspricht die Energie des einfallenden Lichts genau dem Energieunterschied einer ihrer Schwingungen und Rotationen, wird das Licht absorbiert und wieder abgestrahlt.

---

[2] https://de.wikipedia.org/wiki/Strahlungsdruck
Abb 3: https://de.wikipedia.org/wiki/Additive_Farbmischung
Abb 4: https://www3.hhu.de/biodidaktik/Fotosynthese_neu/dateien/licht/licht.html

Licht bewegt sich mit der konstanten Lichtgeschwindigkeit c= 299.792.458 m/s im Vakuum und wenn es auf Materie trifft, kann es gestreut, reflektiert, gebrochen, verlangsamt oder absorbiert werden.[3]

2.4. Der Wellen-Teilchen-Dualismus

In der Geschichte gab es immer wieder Streitigkeiten, ob Licht eine Welle (Wellentheorie des Lichtes) oder ein Teilchen (Korpuskeltheorie) ist. Michael Faraday erbrachte 1846 als erster den Nachweis, dass Licht und Magnetismus zwei miteinander verbundene physikalische Phänomene sind.

Insgesamt stellte sich heraus, dass Licht eine Kombination aus beiden Phänomenen ist, nämlich durch den Wellen-Teilchen-Dualismus, der das Licht nun nicht mehr ausschließlich als Welle oder ausschließlich als Teilchen beschreibt, sondern als Quantenobjekt.

Als Quantenobjekt setzt sich das Licht schließlich aus einzelnen diskreten Energiequanten zusammen, die Photonen genannt werden. Das sind Elementarteilchen (Bosonen mit der Masse 0 und Geschwindigkeit c), welche eine Energie von $E = hv$ tragen.

- v: Frequenz des Lichtes
- h: Plancksche Wirkungsquantum (Verhältnis von Energie E und Frequenz f eines Photons) mit $h = 6,62606957(29) \cdot 10^{-34}\,Js$

Es hat einen Impuls von $p = \frac{h}{\lambda}$

Es kann als Ganzes absorbiert und emittiert werden oder gar nicht.
Zudem kann man nach der Kopenhagener Deutung keinen genauen Ort eines Photons vorhersagen, sondern nur vermuten, wo es auftreten könnte.

Neben Brechung und Reflektion des Lichtes gibt es folgende weitere Wechselwirkungen zwischen Licht und Materie:

Absorption: Die Energie des einfallenden Lichtes wird von dem Objekt verdrängt und aufgenommen. Dadurch werden die Elektronen auf ein höheres Energieniveau gebracht und der Körper erwärmt sich.

- wird die Strahlung unabhängig ihrer Wellenlänge absorbiert, scheint der Körper schwarz.

Subtraktive Farbmischung: Ein Teil des Spektrums wird absorbiert und ein anderer Teil bestimmt die Farbe des Spektrums.
Fluoreszenz/Photorezenz (bei Verzögerung)/spontane Emission: Energie wird in Form von Strahlung wiedergegeben.
Doppelbrechung: Objekt spaltet Lichtstrahl in zwei Strahlen mit unterschiedlicher Polarisation.
Optische Aktivität: Polarisationsebene von polarisierten Licht kann gedreht werden.
Photoeffekt: Die Photonen können die Elektronen auf dem Körper lösen.

[3] https://de.wikipedia.org/wiki/Licht, Kursmaterialien vom Physik LK und BeSt Spektroskopie Kurs von Michael Winkhaus

Streuung: Das Licht ändert nicht, wie bei der Reflexion eine definierte Richtung, sondern seine Ausbreitung in alle beliebigen Raumrichtungen. Dabei unterscheidet man zwischen freien und gebundenen Elektronen ohne und mit Energieübertragung, sowie Teilchen, deren Ausdehnung in der Größenordnung der Wellenlänge liegt [4]

2.5. Die Spektroskopie

Die Spektroskopie beschreibt die Analyse des Lichtes und ist in meiner Projektarbeit der wichtigste Grundbaustein. Durch die Analyse des Lichtes findet man wichtige Eigenschaften des Objektes heraus, die Hinweise auf sein Alter, sein Verhalten, seine chemischen Bestandteile, Wellenlänge, Energie, Masse, seine Temperatur etc. geben können.

Bei der Spektroskopie wird das Licht durch einen Spalt oder einen Prisma in seine Spektralfarben aufgespalten. Die dabei auftretende Intensitätsverteilung wird Spektrum genannt. Diese Wellenlängen werden einzeln aufgefangen und analysiert. Da alle Bestandteile des Lichtes eine eigene Wellenlänge haben, ist das möglich.[5]

2.5.1. Wege zur Brechung des Lichtes

Beim Eintritt eines Mischlichts auf Glas kann man beobachten, dass der blaue Anteil stärker abgelenkt bzw. gebrochen wird als der rote Lichtanteil. Das liegt daran, dass rot eine längere Wellenlänge hat als blau. Bei einem Prisma, bei dem dahinter eine Wand oder ähnliches steht, gehen nach dem Eintreten die Lichtwellen jeweils in unterschiedliche Richtungen. Rotes Licht, mit einer großen Wellenlänge, nimmt daher den kürzesten Weg zur Wand, während blau, mit einer kurzen Wellenlänge, den längeren Weg geht. Damit entsteht das Spektrum des Lichtes und die Farben sind untereinander zu sehen (blau-rot).

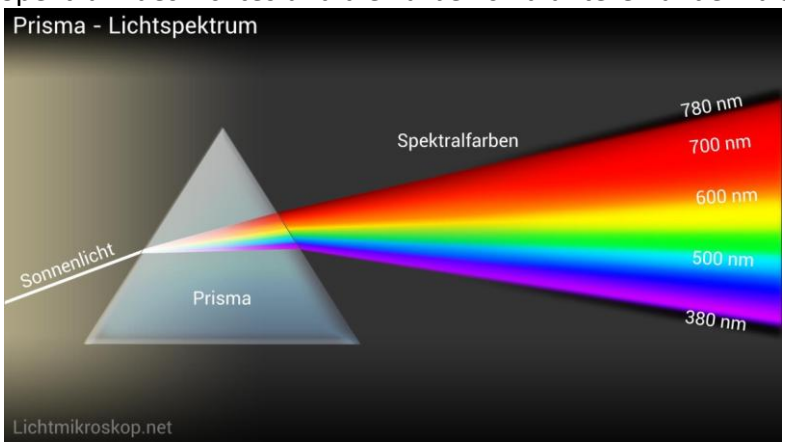


Abbildung 5: Brechung des Lichtes mit Hilfe eines Prisma

Eine andere Option wäre es, das Licht über einen Spalt zu spalten.
Bei einem Doppelspalt wird das Licht auf eine Wand mit jeweils zwei Spalten gelenkt und hinter den zwei Spalten befindet sich ein Beobachtungsschirm.

---

[4] https://de.wikipedia.org/wiki/Welle-Teilchen-Dualismus, Kursmaterialien vom Physik LK und BeSt Spektroskopie Kurs von Michael Winkhaus

[5] Kursmaterialien vom Physik LK und BeSt Spektroskopie Kurs von Michael Winkhaus, https://de.wikipedia.org/wiki/Spektroskopie, https://www.spektrum.de/lexikon/physik/spektroskopie/13557

Abb 5: https://www.lichtmikroskop.net/optik/lichtspektrum.php

Die Spalten sind dabei parallel zueinander. Wichtig ist außerdem, dass der Abstand von dem Beobachtungsschirm und den Spalten wesentlich größer ist, als der Abstand zwischen den Spalten. Beide Spalten wirken so auf dem Beobachtungsschirm als Lichtquelle.
Sind diese Bedingungen erfüllt, erkennt man an der Beobachtungswand ein sogenanntes Interferenzmuster, also eine Änderung einer Amplitude bei der Überlagerung von mehreren Wellen.
Sie verstärken und überlagern sich, also interferieren miteinander. Dadurch entsteht eine helle und einfarbige Stelle an dem Beobachtungsschirm.

Oberhalb und unterhalb dieser Interferenzmuster wird der Abstand zu dem einen Spalten kürzer, bzw. länger.

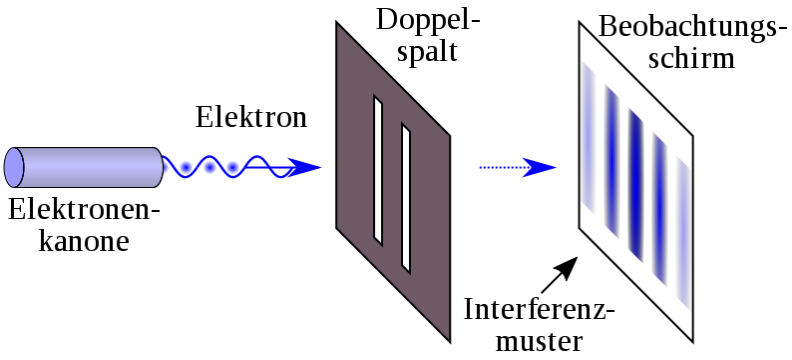


Abbildung 6: Prinzip des Doppelspaltes

Beträgt der Abstand der Spalte um eine halbe Wellenlänge, so ist das Licht im Gegentakt angekommen und die Farben interferieren destruktiv (Wand bleibt dunkel, weil Spalte sich gegenseitig auslöschen). Ist der Abstand eine Wellenlänge, interferieren die Spalte destruktiv und die, wie oben beschriebene Stelle ist hell.

Diese Art von Spektrum wird Linienspektrum genannt, da es scharfe und intensiv voneinander getrennte Linien gibt. Andernfalls liegt ein kontinuierliches Spektrum vor.

2.6. Grundlagen der Spektroskopie

Strukturen im Spektrum geben Hinweise darauf, welche Energiebeträge eine Substanz aufnehmen (absorbieren) oder abgeben (emittieren) kann.

Zusammenhang zwischen der Frequenz v einer elektromagnetischen Welle und der Energie E der Lichtquanten:

$$E = h \cdot v$$

(wobei h: Planck-Konstante s.o.)

Es gibt zudem einen Übergang eines Systems zwischen verschiedenen Energieniveaus unter Emission oder Absorption von Photonen und anderen Teilchen.
Durch die Übergänge der Photonen ist es möglich, eine Absorption bzw. Emission beschreiben zu können.
Die absorbierte oder emittierte Energie ΔE ist aus dem Anfangsenergieniveau E_n und dem Endenergieniveau E_m zusammengesetzt.
Daraus setzt sich folgende Formel:

$$\Delta E = E_n - E_m = h \cdot v$$

Wobei: Emission: $E_n > E_m$, Absorption: $E_n < E_m$ [6]

[6] Kursmaterialien vom Physik LK und BeSt Spektroskopie Kurs von Michael Winkhaus, https://de.wikipedia.org/wiki/Spektroskopie
Abb 6: https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Double-slit_de.svg

2.7. Der Dopplereffekt

Bevor ich Genaueres zum Dopplereffekt schreibe, muß erwähnt werden, dass zwischen dem Dopplereffekt von Licht und Schall unterschieden werden muß. Während Licht im Vakuum kein Medium hat, bewegt sich eine Schallwelle mit der Luft als Medium ganz anders. Daher ist es wichtig, zwischen diesen beiden Fällen zu unterscheiden. Da ich das Licht eines Sternes spektroskopiere, werde ich mich hier auf den Dopplereffekt beim Licht konzentrieren. Dopplereffekt kann als zeitliche Stauchung oder Dehnung eines Signales beschrieben werden, bei der sich der Abstand zwischen Sender und Empfänger während der Übertragung des Signales verändert. Dieser kinematische Effekt liegt an der Laufzeit, die sich verändert und tritt meistens bei Schallgeschwindigkeit oder Lichtgeschwindigkeit auf.

2.7.1. Longitudinaler Doppler-Effekt

Im Vakuum hängt die Frequenzänderung von der relativistischen Geschwindigkeit der Quelle ab. Wer sich bewegt, spielt bei der Frequenzänderung allerdings keine Rolle.
Über die Relativitätstheorie erhält man anschließend über einen ruhenden Beobachter mit dem Effekt der Zeitdilatation folgende Formel:

$$f_\mathrm{B} = \frac{f_\mathrm{S}\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}{1-\frac{v}{c}} = f_\mathrm{S}\sqrt{\frac{c+v}{c-v}}$$

2.7.2. Transversaler Doppler-Effekt

Dieser Effekt tritt auf, wenn sich das Objekt quer zum Beobachter bewegt. Durch die Relativitätstheorie liegt auch hier ein Dopplereffekt vor, so dass eine Zeitdilatation, und damit auch eine verringerte Frequenz eintritt.
Formel:

$$f_\mathrm{B} = \frac{f_\mathrm{S}}{\gamma} = f_\mathrm{S}\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}} \approx f_\mathrm{S}\left(1-\frac{v^2}{2c^2}\right)$$

2.7.3. Der Doppler-Effekt bei einem beliebigen Winkel

Aus der Frequenzänderung für die beliebigen Winkel ergibt sich die Formel:

$$f_\mathrm{B} = f_\mathrm{S}\frac{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}{1-\frac{v}{c}\cos\alpha}$$

2.7.4. Der Doppler-Effekt bei der Rotverschiebung

Hier ist der wichtigste Punkt, denn genau mit dieser Art von Doppler-Effekt. Auch wenn zwar bei dem Doppler Effekt und bei der Rotverschiebung im Grunde das gleiche passiert (Frequenz der elektromagnetischen Strahlung wird beeinflußt), haben beide andere Ursachen. Bei den oben genannten Dopplereffekten ist der Raum zwischen bewegenden Sender und Empfänger gering. Bei der Rotverschiebung werden jedoch bedeutend große

Abstände gezählt und ab einer gewissen Entfernung überwiegt der Anteil, der durch die Ausdehnung der Raumzeit hervorgerufen wird.[7]

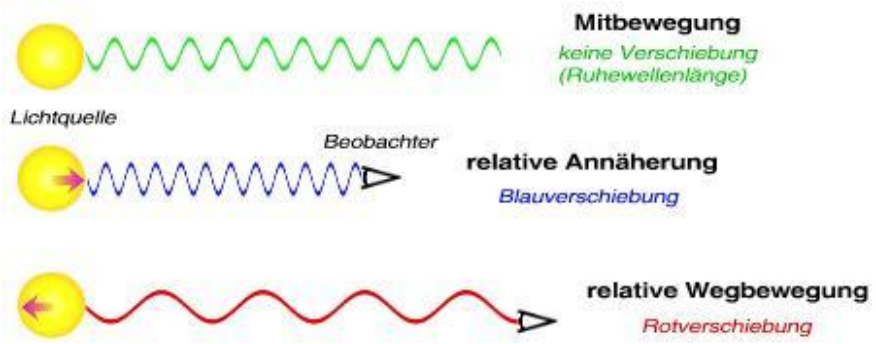


Abbildung 7 : Dopplereffekt

2.8. Rotverschiebung und Blauverschiebung

Rotverschiebung: Das Licht wird in den roten Bereich geschoben, wenn sich etwas von dem Betrachter wegbewegt. Damit werden die Wellenlängen größer und man hat den Effekt der Rotverschiebung mit der Formel:

$$f_E = f_S \cdot \sqrt{\frac{1 - \frac{v}{c}}{1 + \frac{v}{c}}}$$

Blauverschiebung: Das Phänomen der Blauverschiebung tritt auf, wenn sich ein Körper auf den Empfänger zubewegt, und damit die Wellenlängen verkürzt werden. Es gilt folgende Formel:

$$f_E = f_S \cdot \sqrt{\frac{1 + \frac{v}{c}}{1 - \frac{v}{c}}}$$

Die Radialgeschwindigkeit v ist die Geschwindigkeit, mit der sich ein Objekt auf den Betrachter zubewegt oder von der es sich wegbewegt. Dabei gilt die Formel:

$$v = \pm \frac{\Delta\lambda}{\lambda_S} \cdot c$$

Wobei:
f_E=verschobene Frequenz
f_S=Frequenz die gesendet wird, aber noch nicht verschoben ist
v = Fluchtgeschwindigkeit
c = Lichtgeschwindigkeit
λ_S= Wellenlänge (Ruhewellenlänge)
$\Delta\lambda$=gemessene Wellenlänge[8]

---

[7] Kursmaterialien vom Physik LK und BeSt Spektroskopie Kurs von Michael Winkhaus, https://www.leifiphysik.de/akustik/akustische-wellen/doppler-effekt, Abb 7: http://www.leibniz-kis.de/fileadmin/user_upload/forschung/publikationen/staatsexamen/Loehner-Boettcher.pdf
[8] Kursmaterialien vom Physik LK und BeSt Spektroskopie Kurs von Michael Winkhaus

2.9. P-Cygni-Profil

Das P-Cygni-Profil tritt besonders dann auf, wenn der Stern von einer dicht expandierenden Hülle umgeben ist und zeigt sich in einigen der Spektrallinien. Die Blauverschiebung ist eine Folge des Dopplereffekts, da sich ein Teil der Hülle auf die Erde zubewegt und dadurch im Spektrum durch diese Blauverschiebung die sich wegbewegende Hülle bewiesen werden kann, durch das Verfahren. Das vom Stern ausgesendete Licht wird in der Hülle absorbiert und gestreut.

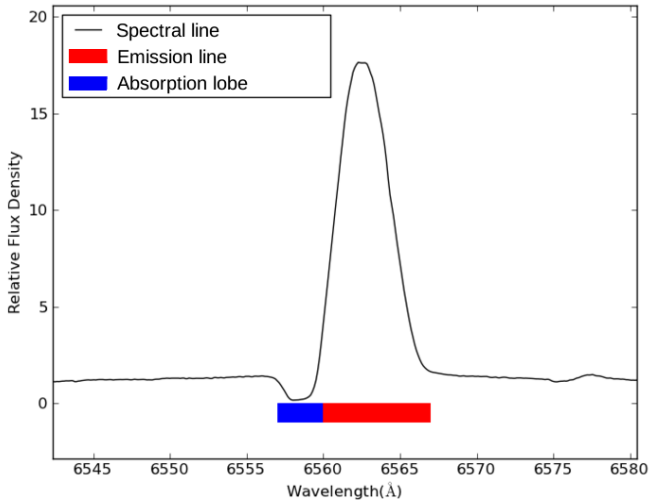


Abbildung 8: P-Cygni-Profil

Mit dem Profil ist es möglich, Expansionsgeschwindigkeiten und die Ionendichte der Hülle des betroffenen Sternes zu analysieren und zu bestimmen.
Diese P-Cygni-Profile sind gerade bei massiven Sternen, aber auch bei Supernovae, T-Tauri-Sterne (TTS: irregulären Veränderlichen in einer dunklen Staubwolke), Zentralsternen und molekulare Winden aktiver Galaxien.[9]

2.10. Pulsationsveränderliche Sterne

2.10.1 Der Kappa Mechanismus

Dieser Mechanismus beschreibt insgesamt die Helligkeitsänderungen eines Sternes, welche durch die Opazität κ (mangelnde Durchsichtigkeit z.B. durch eine Hülle) ausgelöst werden kann, die mit zunehmender Temperatur ansteigt.

Insgesamt wirkt auf den Stern eine Gravitationskraft nach innen. Diese Kraft muß der Stern mit Hilfe von einer Kernfusion oder durch Strahlungsdruck ausgleichen, um dem Druck standzuhalten und nicht in sich zusammenzufallen. Dadurch entstehen Abweichungen im Gleichgewicht und der Stern pulsiert.

Wenn zum Beispiel der Radius des Sterns kleiner ist, als es dem Gleichgewichtszustand entsprechen würde, überwiegt der Strahlungsdruck und der Stern expandiert.
Durch die Masseträgheit dehnt sich der Stern über seinen Gleichgewichtspunkt aus. Dabei dominiert die Gravitation und der Stern schrumpft wieder.
Durch die resultierende Schwingung pulsiert der Stern. Die Stärke der Pulsation hängt daher von der Art der rücktreibenden Kraft ab.

Der Kappa-Mechanismus führt also zu einer rücktreibenden Kraft, die dazu führt, dass ein Stern pulsiert. Bei der inneren Fusion von Stoffen entsteht Gammastrahlung im Inneren des Sternes, die nicht direkt abgestrahlt werden kann, sondern erst an die Oberfläche des dichten Sternes strebt. Dabei wird die Strahlung gestreut und trifft oft auf undurchlässige

[9] https://de.wikipedia.org/wiki/P-Cygni-Profil,
Abb 8: https://de.wikipedia.org/wiki/P-Cygni-Profil

Sternatmosphäre (Opazität). Diese Opazität ist nicht konstant, da diese von dem Druck und der Temperatur abhängt und sich für jede Wellenlänge von Elementen unterscheidet.

Nimmt die Opazität mit steigender Temperatur zu, so werden die äußeren Strömungen komprimiert (die Schicht bewegt sich in Richtung des Zentrums).
Durch diese Kompression entstehen ein höherer Druck und auch steigende Temperaturen. Diese hohen Temperaturen und der höherer Druck haben wiederum Auswirkungen auf die Opazität und die Strahlung kann noch weniger ausdringen und staut sich. Durch den höheren Strahlungsdruck, der dabei entsteht, dehnt sich die Schicht wieder aus und kühlt aus, wobei sie wieder an Opazität verliert und die angestaute Strahlung entflieht. Dabei nimmt auch der Druck ab, wodurch diese aufgrund der nun wieder stärkeren Gravitationskraft in Richtung des Sterninneren komprimiert wird und der Zyklus von neuem beginnt.

Die äußersten Schichten versuchen wieder ins Gleichgewicht zu kommen und kontrahieren. Der Stau von Energie in der Absorptionsschicht führt zu einer Expansion und Energie wird frei, die auch in den oberen Atmosphärenschichten eine Expansion auslöst.

2.10.2. Der Epsilon-Mechanismus

Der Epsilon-Mechanismus bezieht sich auf eine veränderte Rate der Energieerzeugung in einer nuklearen Fusion des Sternes und wird häufig vermutet, konnte aber noch nicht durch Beobachtungen bestätigt werden.

Andere Schwingungen: Schwingungen können auch durch eine Konvektion (Transport von gelösten Stoffen), wie bei der Sonne entstehen.
Diese Stoffe können aber nicht überall ausbrechen, da der Druck und die Magnetfelder sehr hoch sind. Das sorgt dafür, dass sich das gestaute Material ansammelt und mit der Zeit ausbricht. So entstehen Sonnenwinde. Insgesamt führt dieser Prozeß schließlich dazu, dass der Stern schwankt.
Die Bewegungsenergie, die beim transportieren der Wärme, in die äußeren Schichten des Sternes entsteht, kann die Schwingungen in den äußeren Atmosphärenschichten anregen.

Zuletzt kann eine Pulsation auch durch ein Doppelsternsystem entstehen. Ein Beispiel für ein Doppelsternsystem ist Sirius, mit seinem Begleiter Sirius B. Bei einem solchen System kreisen die Sterne umeinander und ziehen sich gegenseitig durch die Gezeitenkräfte an, die periodisch durch eine exzentrische Umlaufbahn auf den Stern übertragen werden. [10]

[10] https://de.wikipedia.org/wiki/Pulsationsver%C3%A4nderlicher_Stern

3.Klassifizierung von Sternen

3.1. Das Hertzsprung-Russell-Diagramm

Das Hertzsprung-Russell-Diagramm (HRD) stellt die Entwicklungsverteilung der Sterne dar. Dabei wird auf der x-Achse die Spektralklasse dargestellt und Relation zur y-Achse, welche die absolute Helligkeit. Es wurde 1913 aus den Arbeiten von Enjar Hertzsprung von Henry Norris Russell entwickelt.

Die Hauptreihen (main sequence/Zwegenast) geht von den O-Sternen (Magnitude von -6) bis M-Sterne (Magnitude 6-16). Die Sterne in dieser Hauptreihe haben ein Leuchtklasse von V. Oberhalb der Hauptreihe befindet sich der Riesenast (Stern mit extrem großem Durchmesser und extrem großer Leuchtkraft) mit der Leuchtklasse III.
Durch die nuklearen Vorgänge im Inneren des Sternes verändern sich mit der Zeit die Zustandsgrößen der Effektivtemperatur, sowie die Leuchtkraft, das führt dazu, dass Sterne im HRD einen Weg durchlaufen, die Geschwindigkeit variiert von Stern zu Stern.
Jenseits von Effektivtemperaturen von etwa 3000–5000 Kelvin finden sich im HRD keine Sterne mehr, weil hier der Bereich der Protosterne liegt, welche eine sehr hohe Entwicklungsgeschwindigkeit haben.
Das HRD kann auch anstatt des Spektraltypes mit Farbindexen dargestellt sein. (Abb 10)[11]

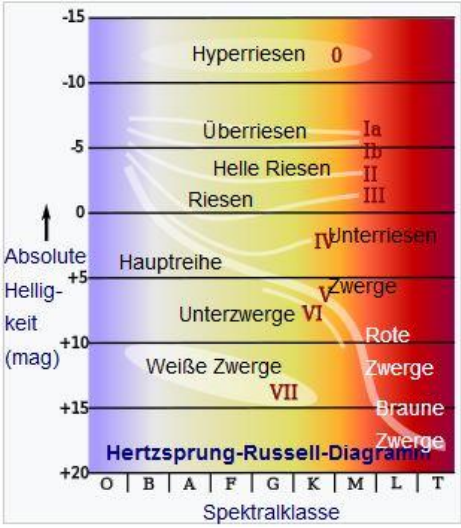


Abbildung 9: HRD

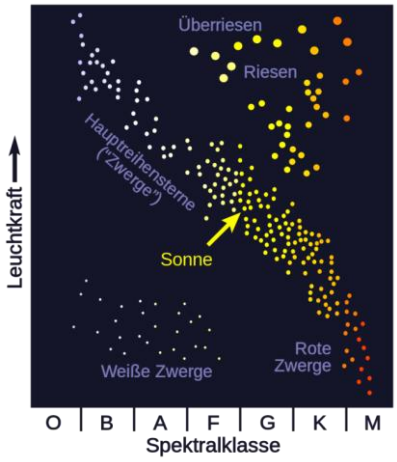


Abbildung 10:HRD

4.Gelbe Hyperriesen und rho Cas

4.1. Gelbe Hyperriesen

Als gelbe Hyperriesen bezeichnet man sehr seltene massereiche Sterne, welche eine Instabilität aufweisen und daher im Vergleich zu anderen Sternen sehr schnell kollabieren. Ihre Temperaturen befinden sich in einem Bereich zwischen 4000 und 7000 Kelvin (Spektralklasse A). Ihre absolute Helligkeit liegt bei $M_V = -8$ und ihre Leuchtklasse liegt bei 0 oder Ia,
im englischen werden sie als „warm hypergiants“ oder „yellow hypergiants“ bezeichnet.
Die Radien der sichtbaren Photosphäre betragen einige hundert Sonnenradien.
Sie sind insgesamt sehr selten in der Milchstraße (nur einige hundert) und der größte gelbe Hyperriese ist HR 5171A, welcher ca. 1.300 mal größer als die Sonne ist.

Sie zeichnen sich dadurch aus, dass sie sehr labil sind und starke Masseverluste *(durch Sternwinde)* haben. Diese Sternenwinde erkennt man besonders an den P-Cygni Profilen in den Spektren.
Das ist ein Grund, warum die Sterne so instabil sind.

[11] https://de.wikipedia.org/wiki/Hertzsprung-Russell-Diagramm
Abb 9&10: https://de.wikipedia.org/wiki/Hertzsprung-Russell-Diagramm

Es wurden schon Windgeschwindigkeiten von einigen hundert Kilometern pro Sekunde beobachtet.
Die Masseverluste sind episodisch und können bis zu 0,05 Sonnenmassen pro Jahr erreichen. Die meisten enden in einer Supernova Explosion.
Es werden ausgeprägte Infrarotexzesse durch kühles zirkumstellares Material beobachtet, welches von dem Stern abgeströmt ist und jetzt die Strahlung absorbiert und bei niedrigen Temperaturen von 100 K wieder abstrahlt.
Die Sterne zeigen starke Schwankungen in ihren Oberflächentemperaturen aufgrund der Bildung von Pseudophotosphären. Das abströmende Gas in der Nähe der Atmosphäre ist so dicht, dass die eigentliche Sternoberfläche dem Beobachter nicht zugänglich ist und nur in der Pseudophotosphäre remittiertes Licht analysiert werden kann.

Insgesamt sind gelbe Hyperriesen peculiare Sterne. Das bedeutet, dass die Kombination von Helligkeit und Temperatur ungewöhnlich sind.

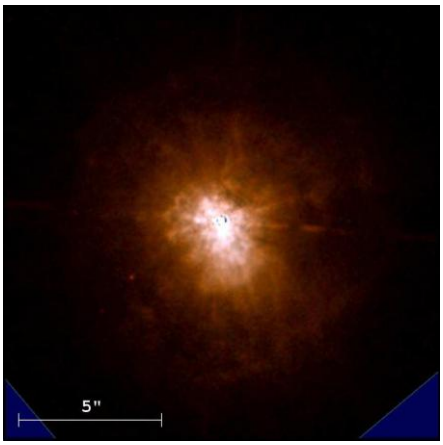


Abbildung 11: IRC+10420

Insgesamt gehören gelbe Hyperriesen zu pulsationsveränderlichen Sternen (s. Grundlagen) mit einer meist geringen Amplitude von bis zu 0,3 mag und Pulsationsperioden zwischen 300 und 1000 Tagen und hinzu auch ein unregelmäßiger Lichtwechsel auftreten kann.
Dadurch reabsorbiert das abgeschlossene Material die Strahlung und emittiert sie wieder bei niedrigen Temperaturen.
Sie sind sehr instabil da ihre Kernfusion aufgrund der hohen Masse sehr schnell abläuft.
Einige Gelbe Hyperriesen scheinen sich sehr schnell zu entwickeln mit einem Anstieg der Temperatur von 1000 °C innerhalb von 10 Jahren bei IRC+10420 [12]

4.2. rho Cassiopeiae

rho Cassiopeiae ist ein gelber Hyperriese *(engl. warm hypergigant*) im Sternbild Kassiopeia. Seine Kurzform lautet ρ Cas.
Er ist ca. 8.154 Lichtjahre von der Erde entfernt und 3500 Lichtjahre von unserem Sonnensystem. Er hat eine absolute Helligkeit von $M_V = -8$ und scheinbare Helligkeit bei 4,51 mag.
Seine Rotationsdauer liegt bei 29 km/h und er hat eine Masse von 40 *MΘ (Sonnenmassen).*

$$1\,\mathrm{M}_\odot = (1{,}98892 \pm 0{,}00025) \cdot 10^{30}\,\mathrm{kg}$$

Sein Radius liegt bei 450 RΘ (Sonnenradien)
RΘ =6,96342 · 10^8 m = 696.342 km ± 65 km

Die Temperaturen betragen 4000-8000 Kelvin (ähnlich wie die Sonne). Er hat die Leuchtklasse 0-Ia.
Seine Spektralklasse ist wechselhaft und liegt zwischen F8 und K0. Damit leuchtet er gelblich.

[12] https://de.wikipedia.org/wiki/IRC%2B10420, https://de.wikipedia.org/wiki/Gelber_Hyperriese, https://www.scinexx.de/news/kosmos/astronomen-entdecken-groessten-gelben-stern/
Abb 11: https://de.wikipedia.org/wiki/IRC%2B10420

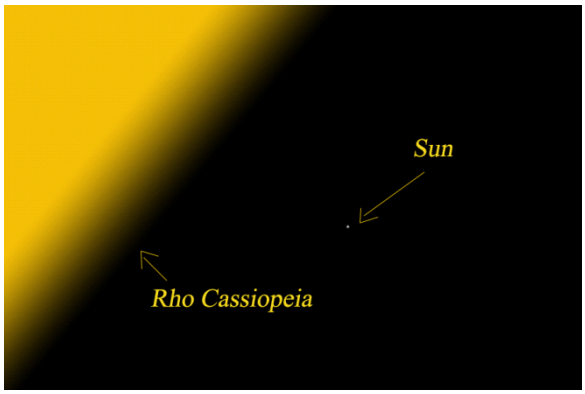


Abbildung 12: rho Cas vs. Sun

In der Milchstraße gibt es nur wenig gelbe Hyperriesen. rho Cassiopeiae ist der lichtstärkste und zudem auch schwerste Stern in der Milchstraße. Mit einer scheinbaren Helligkeit von 4,5 mag ist er ½ -Millionen mal lichtstärker als unsere Sonne. Vermutlich schwächen Staubwolken, die sich zwischen ihm und der Sonne befinden, das Licht ab. Dennoch ist er selbst unter schlechten Bedingungen schwach mit dem bloßen Auge zu erkennen. Die Masse von ρ Cas beträgt ca. 40 Sonnenmassen (s.o.).

Gelbe Hyperriesen werden nur wenige Millionen Jahre alt und aufgrund seiner derzeitigen Pulsationen geht man nicht davon aus, dass er die Spektralklasse M noch erreichen wird, wenn er seine Leuchtkraft verändert.

Auffälligkeiten bei rho Cassiopeiae sind vor allem seine Materialausbrüche, die schon seit 1893 und 1945 beobachtet wurden. Diese Ausbrüche treten meistens alle 50 Jahre auf. Nachdem rho Cas im Jahr 2000 von 7000° auf 4000° abkühlte (in wenigen Monaten), konnten Forscher Molekular-Absorptionslinien von Titanium Oxid, die in der expandierenden Sternatmosphäre entstehen, entdecken.

Die Astronomen erklären sich die Beobachtung dadurch, dass der Stern vermutlich eine enorme Gashülle ins All geblasen hat, deren Masse rund zehn Prozent der Sonnenmasse ausmachen dürfte oder das 10 000-fache der Erdmasse. Das ist der höchste Materialauswurf, der je von Astronomen bei einem Einzelstern beobachtet wurde.

Seit den 2000ner Jahren konnte man allerdings noch was anderes beobachten: Die Atmosphäre des Sterns pulsiert in einer ungewöhnlichen Form und die äußeren Schichten scheinen zu kollabieren. Einige Forscher spekulieren auf eine besonders starke und unmittelbar bevorstehende Eruption und weiterer Masseverluste.
Die Gasschale von rho Cas soll sich dabei, wie eine Schockwelle entfernen.

Das interessanteste ist jedoch, dass rho Cas schon längst explodiert und zu einem Neutronenstern oder vielleicht sogar zu einem schwarzen Loch mutiert ist.
Gelbe Hyperriesen enden aufgrund ihrer Masse in einer Supernova und wenn diese Masse explodiert, können diese gigantischen Deep-Sky-Objekte *(Schwarze Löcher, Neutronensterne, Pulsare, Magnetare etc.)* entstehen.
Da schon erste Anzeichen einer Kollision gefunden wurden, ist es nur noch eine Frage der Zeit, bis man feststellt, dass rho Cassiopeiae schon längst kollabiert ist.

Wenn der Stern alle 50 Jahre 10 Prozent der Masse unserer Sonne verliert, so wären das in 10.000 Jahren 20 Sonnenmassen. Daher ist es sehr wahrscheinlich, dass ρ Cas gar nicht mehr existiert .Das macht ihn so unglaublich spannend. Kontinuierliche Beobachtungen und Aufzeichnungen vom Spektrum von rho Cas können darauf hinweisen, ob der Stern bereits in einer Supernova explodiert ist[13]

4.2.1. Das Spektrum von rho Cas

Das Spektrum von rho Cas ist auffällig und daher interessant. Es gibt starke Anzeichen auf eine Gashülle um den Stern, welche eine bereits aktive Eruption/Kollision des Sterns darstellen würde.
Diese Gashülle ist nach Forschungen eine Wasserstoffgashülle, die im Jahr 2013 vom Stern abgestoßen wurde und nach ein paar Jahren wieder zurück auf den Stern gefallen ist.
Warum die Hülle diese Pulsation aufzeigt, konnte aus dem bisherigen Paper nicht klargestellt werden.
Zudem zeigte rho Cas kurzzeitig das Spektrum eines Roten Hyperriesen mit dem Spektraltyp M, dadurch, dass seine Helligkeit zu diesem Zeitraum sehr stark abgesunken ist (ein großer Teil wird im Infraroten emittiert).

Schwingungen , die zum Auswurf von Teilen der Atmosphäre führen, können in Kombination zu den Hüllenepisoden (vermutlich ausgelöst durch einen negativen Dichtegradient in den äußeren Schichten der Atmosphäre) und geringen Gravitationsbeschleunigungen in der Photosphäre verursacht werden.

Da rho Cas ein gelber Hyperriese ist, wird er in einer Supernova enden, da er sehr massiv ist und eine Instabilität aufweist.

Man konnte mit der Zeit eine unregelmäßige Variable im Licht von rho Cas feststellen.
Zudem entstanden mit der Zeit TiO (Titanium Oxid) Banden/Linien als der Stern im Sommer 1946 lichtschwächer wurde als je zuvor [14]

5.Experimenteller Teil

5.1 Die Sternwarte am Carl-Fuhlrott-Gymnasium und der Projektkurs Astronomie:

Auf dem Dach des Carl-Fuhlrott-Gymnasiums in Wuppertal Küllenhahn gibt es eine eigene Sternwarte der Schule, mit sechs C11 Teleskopen und einem CDK Astrograph, 20“ Teleskop (500mm) auf Station 7, welches insbesondere für die Astrofotografie und Spektrenaufnahmen genutzt wird und so für meine Arbeit relevant war. Ebenso kann man an

---

[13] https://de.wikipedia.org/wiki/Rho_Cassiopeiae, https://bav-astro.eu/eruptive/sterne/casrho.html, https://abenteuer-universum.de/stersterne/supernova.html, Results of the High-Resolution Spectroscopy During 2007 - 2011 V.G. Klochkova (SAO RAS, Nizhnij Arkhyz, Russia Results of the High-Resolution Spectroscopy During 2007 - 2011 V.G. Klochkova (SAO RAS, Nizhnij Arkhyz, Russia)

[14] Monitoring of the Yellow Hypergiant Rho Cas: Results of the High-Resolution Spectroscopy During 2007 - 2011 V.G. Klochkova (SAO RAS, Nizhnij Arkhyz, Russia), arXiv:1808.00220v1 [astro-ph.SR] 1 Aug 2018, 1957PASP___69___31B

Abb 12: https://paolera.wordpress.com/2013/12/30/la-hipergigante-amarilla-rho-cas/

das Teleskop auf Station 7 den BACHES Echelle Spektrographen (Auslösungsvermögen R=ca.15000) von Baader Planetarium GmbH installieren.
Die Sternwarte wird Oberstufenschülern des Carl-Fuhlrott-Gymnasiums zur Verfügung gestellt, welche an Ihren Projektarbeiten forschen. Zudem können auch Studenten der Bergischen Universität Wuppertal die Sternwarte für Projekte nutzen, sowie die Astronomie-AG der Sekundarstufe I des CFGs. Unterstützt werden Schülerinnen und Schüler in den Projektkursen von Bernd Koch, Leiter des Projektkurses Astronomie und Diplomphysiker.

Abbildung 13: Station1-6

Abbildung 14: Station 7

6. Technische Ausstattung

6.1. Das Teleskop (50cm Teleskop PlaneWave CDK20)

Für mein Projekt habe ich am dem CDK2 0 Astrograph Teleskop auf Station 7 gearbeitet.
Es hat eine 50cm Öffnung und ist auf einer 10Micron GM4000IIPS Montierung befestigt. Der Spiegeldurchmesser beträgt 505mm und die Brennweite bei 3.454mm. Das Öffnungsverhältnis liegt bei f/6.8.
Zudem hat es eine Borosilikat Optik oder Quarzglas Optik, modifiziert nach Dall Kirkham, mit voll auskorrigiertem Bildfeld von 52mm.
CDK steht für Corrected Dall-Kirkham und es handelt sich um eine veränderte Variante des Cassergain Reflektors.

Außeraxiale Koma, - Astigmatismus und Bildfeldkrümmung werden im CDK Design durch einen zweilinsigen Korrektor korrigiert. Durch eine geebnete Bildfläche bleiben die Sterne in der Fokusebene über das ganze Feld gleich scharf abgebildet.
Die nicht hyperbolische Krümmung sorgt dafür, dass das optische System präziser, einfacher, rund schneller zu kollimieren ist als ein RC. [15]

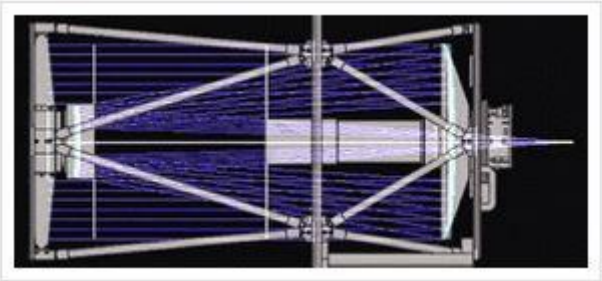


Abbildung 15: Prinzip von dem CDK

Abbildung 16: Spiegel der Teleskopes

Das RC Teleskop hat beide Spiegel hyperbolisch geformt, wodurch zwar eine komafreie Abbildung ohne Korrektor erreicht wird, allerdings ist das Blickfeld nicht eben. Um das Problem zu beheben wird bei der fotografischen Verwendung großer Ritchey-Chrétien-Cassegrain-Teleskope dicht vor den Fokus ein Linsensystem gesetzt.

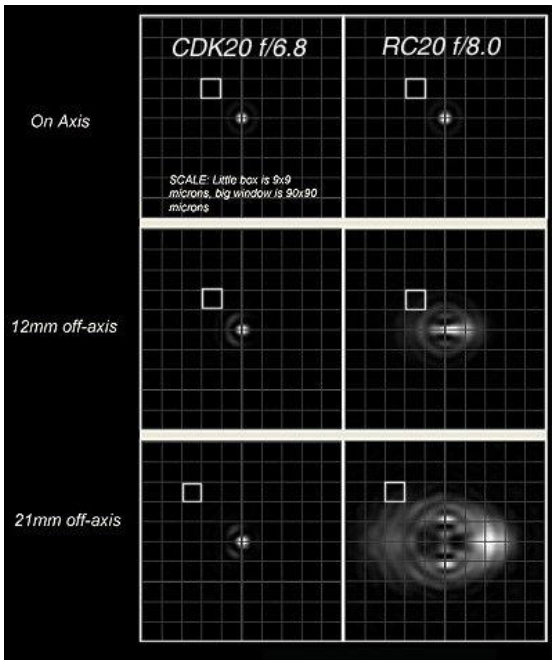


Abbildung 17: RC und CDK

[15] https://www.baader-planetarium.com/de/blog/cdk-optisches-design/
Abb 17: https://www.baader-planetarium.com/de/blog/cdk-optisches-design/

Abbildung 18: CDK mit Ausstattung

Abbildung 19: Ausstattung am Teleskop und Technik

6.2. 10 Micron Keypad

Das Keypad ist dafür da das Teleskop manuell nachzusteuern. Dafür gibt es ein Keypad, welches direkt am Teleskop angeschlossen ist und ein virtuelles Keypad, welches man über einen Computer steuern kann.
Für das Keypad am Teleskop ist allerdings kein weiterer PC erforderlich. Es enthält alle Funktionen für den Feldeinsatz und hat unverläßliche Mikroschalter.
Es hat ein Grafikdisplay mit bis zu vier Textzeilen und zusätzlichen Statussymbolen. Zudem ist es für Niedertemperaturbetrieb beheizt.[16]

Abbildung 20: 10 Micron Keypad

6.3. Die GM4000HPS- Montierung

Die Montierung des Teleskops ist eine deutsche äquatoriale Montierung mit Achsen von r.a. 85mm Durchmesser und dec 80mm Durchmesser.
Der Motor hat 2 Serve Achsen und ist bürstenlos.
Der Leistungsbedarf liegt bei 1,5 A bei siderischer Geschwindigkeit und 5A bei maximaler Geschwindigkeit.
Die Sternfindung liegt über 20“ mit internal multiple-stars software mapping.
Die Gerätschnittstellen sind: RS-232,GSP port, Ethernet.

Abbildung 21: Die Montierung

[16] https://10micron.de/en/products/zubehoer/allgemeines_zubehoer/10micron-professionelle-4-zeilen-stand-alone-handsteuerung/ (Zugriff 26.05.19)
Abb 21:http://www.10micron.eu/en/product/gm4000-hps-ii/ (Zugriff 21.05.19)

6.4. Der BACHES Echelle Spektrograph

Der BACHES Echelle Spektrograph wurde von Baader Planetarium GmbH entwickelt und ist ein Werkzeug zur Untersuchung von Spektren. Er kann an das Teleskop montiert werden und Spektren von dem zu beobachtenden Objekt aufnehmen. Dieser Spektrograph kann zum professionellen Einsatz astronomischer Forschungen verwendet werden und hat den Unterschied zu einem herkömmlichen Gitterspektrographen, die nur lange Spektralfaden erzeugen, liegt darin, dass der BACHES Echelle Spektrograph das gesamte Spektrum unabhängig von Sensorgröße von ca. 392-800mm auf einer Aufnahme erfaßt, indem er die Spektren untereinander legt. So hat man einen konstanten Fokus über einen weiten Temperaturbereich.

Abbildung 22: BACHES Echelle Spektrograf

Das Konzept des Echelle Spektrographen ist ein sogenanntes Transmissionsgitter („Cross Disperser“), so dass das Echelle-Gitter unter einen steilen Winkel beleuchtet wird und Spektren der Ordnung 30-56 erzeugt, die sich erst überlappen und undeutlich sind. Man korrigiert den Fehler mit einem zweiten 90° Spiegel, welcher dafür sorgt, dass das hochaufgelöste Echelle Spektrum sortiert (zeilenweise) auf dem Sensor abgebildet werden kann[17]

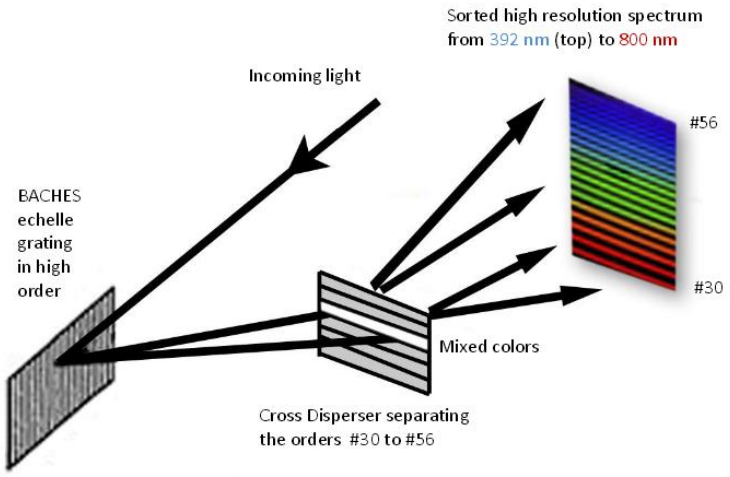


Abbildung 23: Prinzip des BACHES Echelle Spektrografen

Abbildung 24: Spektrograf

[17] https://www.baader-planetarium.com/de/spektroskopie/baches-echelle-spektrograf/baches-echelle-spektrograf.html Zugriff 21.05.19
Abb 22&23: https://www.baader-planetarium.com/de/spektroskopie/baches-echelle-spektrograf/baches-echelle-spektrograf.html Zugriff 21.05.19

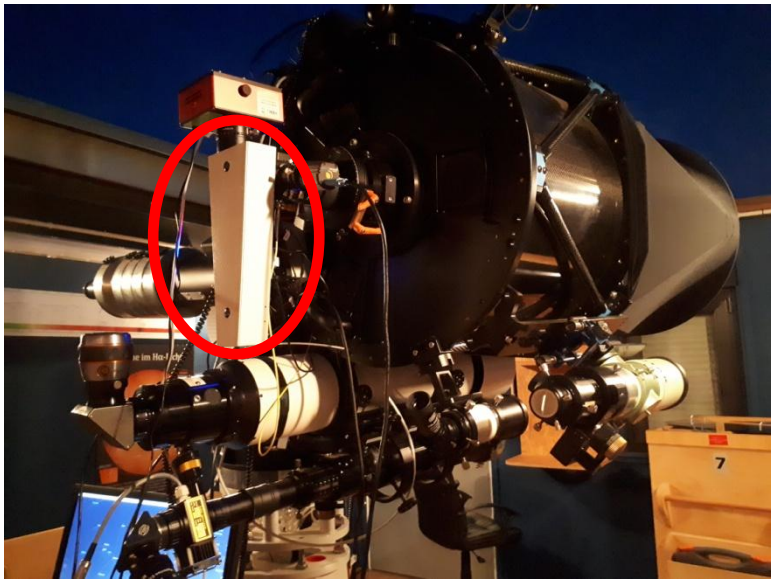


Abbildung 25:
BACHES Echelle Spektrograph (rot umkreist) am CDK20 Teleskop an der Schulsternwarte des CFGs

7. Arbeitsauftrag/Ziel

Das Ziel war, wie oben bereits erwähnt, Spektren von Rho Cas aufzunehmen, um diese mit dem Skript „Changes in the optical spectrum of the hypergiant ρ Cas due to a shell ejection in 2013“[18] zu vergleichen und neue Auffälligkeiten raus zuarbeiten. Dafür waren mir besonders Hα (Wasserstoff), Ba II, Fe I und Na I wichtig, da diese Linien Auffälligkeiten zeigten, die im Skript weiter analysiert wurden.

8.Aufnahmen der Spektren

Da das CDK20 Teleskop fest in dem Rolldachhäuschen auf dem Dach montiert ist, mit den technischen Ausstattungen, um es vor Witterungen zu schützen, muß sich das Teleskop nach der Vorbereitung(also Entfernen des Rolldaches und Überprüfung der Stromversorgung) sich erst einmal 10-20 Minuten an die Außentemperatur gewöhnen. Dadurch können genauere Meßergebnisse erzielt werden. Die Temperatur habe ich mit dem Programm PWI 2.2.2 kontrolliert.

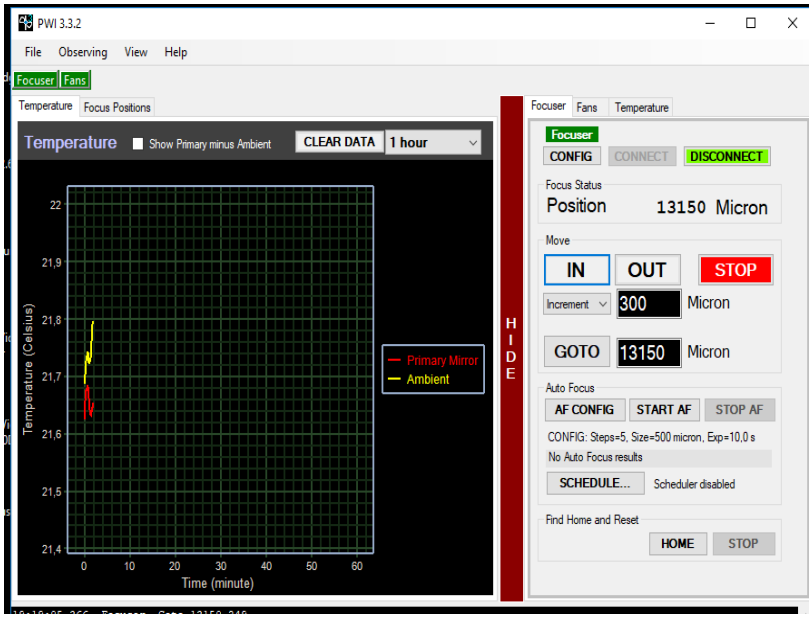


Abbildung 26: PWI 2.2.2.

[18] arXiv:1808.00220v1 [astro-ph.SR] 1 Aug 2018

Anschließend habe ich das Teleskop von der e Parkposition auf das Beobachtungsobjekt gerichtet. Dafür habe ich zunächst den Steuercomputer mit der Weltzeit synchronisiert, da die Uhrzeiten sehr genau sein müssen. Das Programm *Dimension 4* hilft dabei, indem es sich mit einem Zeit-Server verbindet, welcher die Computerzeit schließlich in einem festen Intervall synchronisiert, so dass eine höchstmögliche Genauigkeit erzielt werden kann, während den Messungen und für die Ausrichtung des Teleskops auf das erzielte Objekt.

Auf dem Steuercomputer habe ich schließlich wichtige Programme geöffnet.

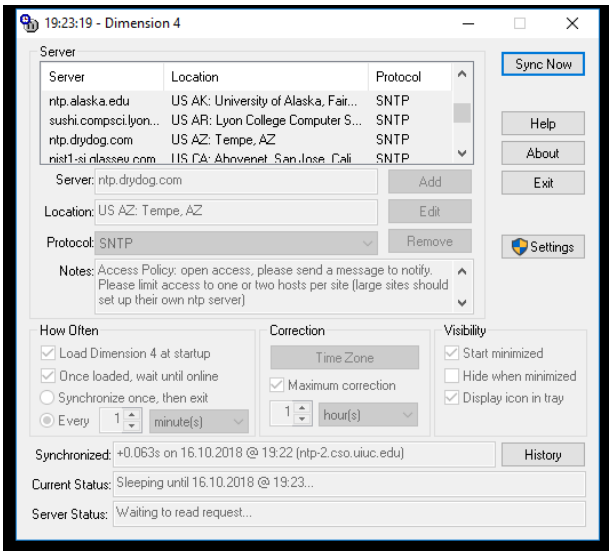


Abbildung 27: Dimension 4

8.1. Die Programme

8.1.1. 10Micron Keypad

Das Programm 10Micron Keypad hilft bei der Steuerung des Teleskopes. hier kann man die Nachführgeschwindigkeit des Teleskopes verändern und anpassen.
Die Nachführung ist wichtig, weil die Erdrotation ausgeglichen werden muß, sonst verliert man das Objekt schnell aus dem Blickfeld. Hier wird daher eine siderische, also auf Sterne bezogene Nachführgeschwindigkeit, festgelegt.

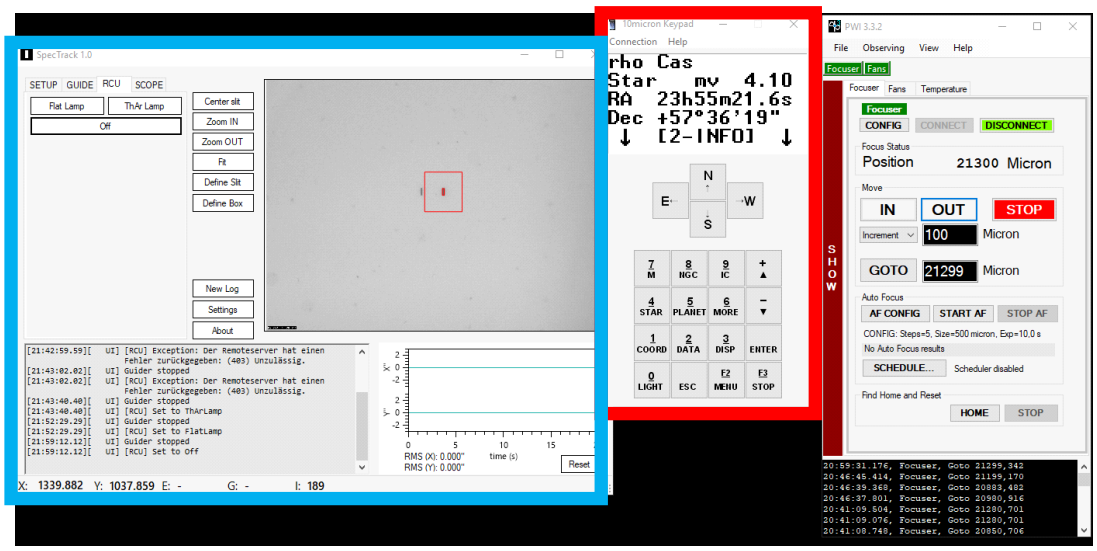


Abbildung 28: Rot: 10Micron Keypad, Blau: SpecTrack

8.1.2. SpecTrack

Diese Software ist eine Guiding Software, mit der zum einen das Teleskop nachgeführt werden kann, aber auch ebenso die Referenzlampen gesteuert werden können.
Wichtig bei SpecTrack ist, dass es mit der Guiding Cam (Skyris 274M) und der RCU (Remote Calibration unit) verbunden wird (Abbildung blau).

Anschließend kann man das Programm auf die Spaltposition einstellen, indem man im RCU Fenster die Flatfield Lampe (Halogen) anschaltet und das Livebild aktiviert.
Auf dem Bild sieht man zum einen das Licht der Lampe mit zwei Spalte (25µm und 50µm) des BACHES Echelle Spektrographen und eine rote Umrandung. Dabei ist der 25µm Spalt nur von Relevanz.

8.1.3. Anfahren des Zielsternes

Zur Hilfe der Position des Sternes kann man Stellarium nutzen, um sich selber ein Bild von der gegebenen Position des Sternes zu verschaffen. Stellarium ist eine Sternkarte, mit der von einem gewählten Punkt aus der Nachthimmel angezeigt wird und wie er sich im Verlauf der folgenden Stunden oder Tage verändert. Mit diesem Programm kann man durch die Eingabe seiner eigenen Koordinaten also genau sehen, wo sich welcher Stern befindet. Ich habe die Koordinaten der Station 7 auf der Sternwarte im CFG angegeben und so gesehen, wo genau sich Rho Cas am Himmel befand. Zudem mußte man berücksichtigen, dass die Wände von dem Rolldachhaus auch einen Teil der Sicht an den Seiten bedecken. Rho Cas stand allerdings so hoch am Nachthimmel, dass die Aufnahmen problemlos möglich waren.

Über das 10Micron Keypad habe ich dann den Namen meines Sternes angegeben und so wurde das Teleskop an die richtige Position geschwenkt. Hier muß man vorher kontrollieren, dass keine Kabel sich mit dem Teleskop verfangen vor dem Schwenken. Anschließend ist das CDK20 auf meinen Zielstern rho Cas geschwenkt.
In dem bereits erwähnten Fenster von SpecTrack erschien schließlich der Stern, als das Teleskop den Zielstern anvisiert hat.
Der Lichtfleck muß nun mit Hilfe des Keypads in den roten Spalt gelenkt werden. Dabei muß man eine Schwenkgeschwindigkeit von ca. 15"/s beachten (sehr gering) und eine Belichtungszeit (Exposure Time) von einer halben Sekunde einstellen. Nachdem man die Einstellungen beachtet hat, kann man über die Anforderung "calibrate" das Programm kalibrieren.

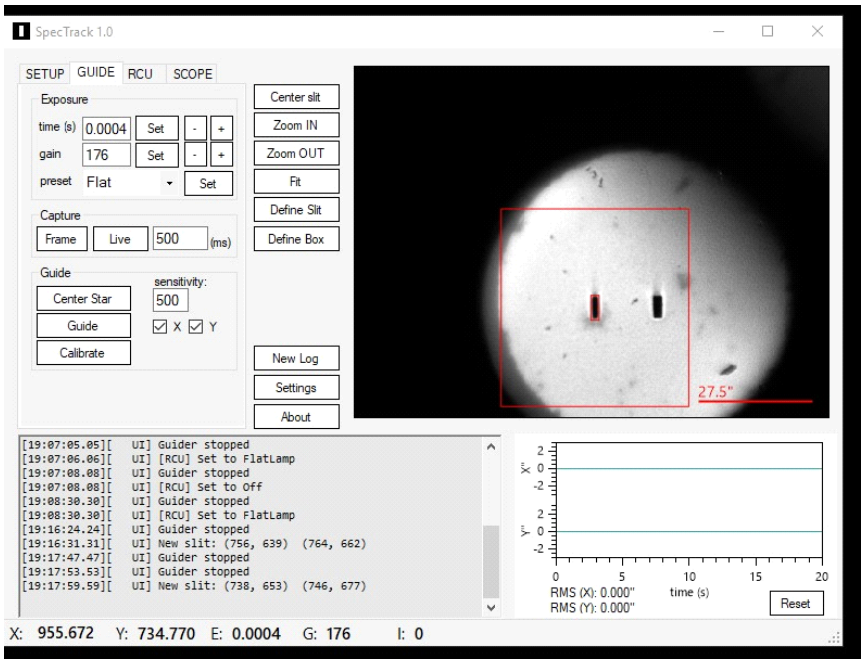


Abbildung 29: SpecTrack

Dabei kann es passieren, dass sich der Stern bei der Probebewegung des Programmes, während der Kalibrierung aus dem roten Spalt raus bewegt. Falls das passiert, kann man durch anwählen von "Guide" auf der Schaltfläche, eine Nachführung aktivieren, wobei das Programm das Objekt automatisch zurück auf den Spektrographenspalt bringt.
Da das Programm SpecTrack auf jede Seeing bedingte Schwankungen des Sternes empfindlich reagiert, sollte der Wert für "Sensitivity" bei ca. 50 liegen.

8.1.4. Aufnahme des Spektrum mit Hilfe von Maxim DL 5Pro

Über Maxim DL kann man zunächst eine Überbelichtung kontrollieren. Abbildung??? Zeigt das Sternspektrum das Sternspektrum. In dem Histogramm „Screen Stretch“ kann man die Helligkeitswerte überprüfen.

Über "Camera Control" kann man außerdem Einstellungen zu der Belichtungszeit machen und Spektrum aufgenommen werden. In „Camera Control“ kann man verschiedene Operationen anfordern, die Einzelaufnahmen, aber auch ganze Serienaufnahmen betreffen können, aber auch wann die Kamera zum Beispiel die Darkframes (Dunkelbilder) aufnehmen soll.

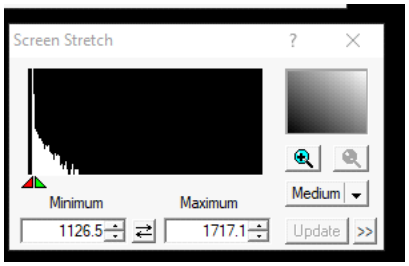


Abbildung 30:Screen Stretch

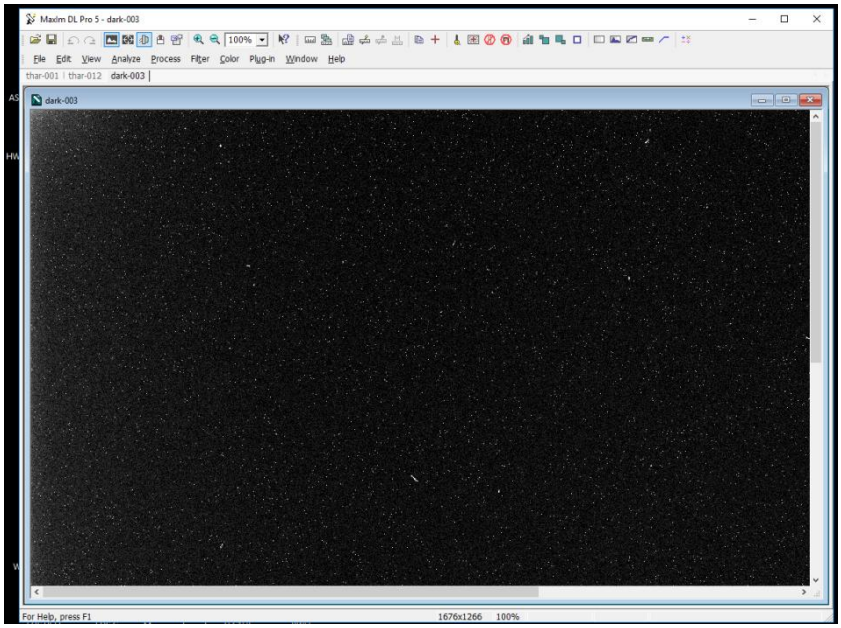


Abbildung 31: MaxIm DL

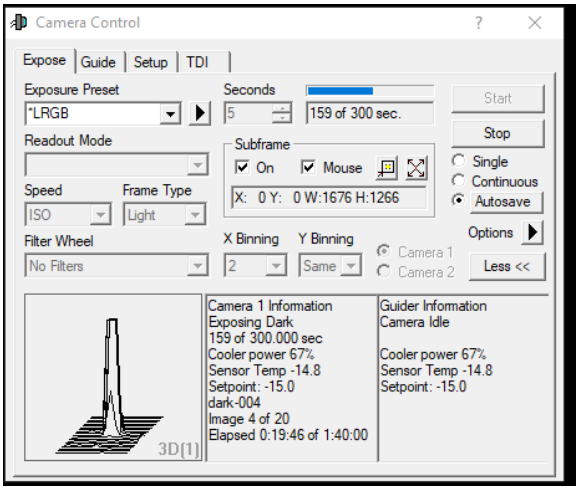


Abbildung 32: Camera Control

Danach können die Spektren aufgenommen werden.

Nach dem ersten Satz der Sternenspektren werden noch sogenannte Darkframes-Spektren und Flatfield-Spektren als Referenzspektren erzeugt. Das Thorium-Argon (ThAr) und Flatfield (ff) Spektrum sind dafür da, um diese Faktoren aus der Erdatmosphäre, die das Spektrum beeinflussen und es somit ungenau machen, raus zu subtrahieren.

Bei der Aufnahme der Spektren ist zu beachten, dass die Spektren sehr zeitnah angefertigt sein sollen, da sich auch die Temperatur verändert, diese bei einer Subtraktion durch eine andere Temperatur ungenau und gefälscht wird.

Bei dem Temperaturunterschied driften die Spektrallinien auseinander und die Wellenlängenkallibrierung wird ungenau. Baches ist zudem weder Temperatur spezialisiert, noch liefert das externe Thermometer zuverlässige Werte. Damit sollte die Beobachtung gut geplant sein, damit ein schneller und erfolgreicherer Ablauf stattfinden kann.

Von dem Objekt werden mehrere Spektren derselben Reihe aufgenommen in verschiedenen Zeiträumen. Ca. vier am Anfang und vier eine Stunde später mit Autodark. Mit dieser Methode wird das Spektrum durch Referenzspektren genauer. Diese werden später in MaxIm DL gestackt.

9.Der Beobachtungsabend und der Ablauf

Abbildung 33: Der Arbeitsplatz auf Station 7

Die Aufnahme der Spektren am 16 Oktober 2018 wurden von mir zwischen 18 und 22 Uhr in der Schulsternwarte am CFG aufgenommen. Die Spektren habe ich in Station 7 am PlaneWave CDK 20 Teleskop und dem montierten BACHES Echelle Spektrographen aufgenommen, welche in einem windgestützten und ausfahrbaren Dach auf dem Schuldach stehen und aus einem Nebenraum gesteuert werden können.

Zu dem Zeitraum war der Himmel sternenklar und zu dem Zeitraum war ein abnehmender Halbmond zu sehen, so dass nicht allzu viel Licht gestört hat und somit genauere Spektren ermöglichte.

Als ich das Teleskop mit der Technik und dem Steuercomputer, wie oben erklärt, aufgebaut habe und alle Programme geöffnet habe, habe ich mit den Flatfield Spektren (ff)begonnen. Diese habe ich mit SpecTrack 1.0 aufgenommen.
Ich habe die Lampe eingeschaltet und mit dem Spektrographen um die 20 Spektren aufgenommen. Die ersten habe ich um 20.49-20.53 Uhr MEZ aufgenommen und die letzten von 21.52-21.53 Uhr MEZ (mit einer Stunde Differenz). Ebenso habe ich das Sternspektrum, sowie das Thorium-Argon (ThAr)Spektrum aufgenommen.

Hinterher hat man mehrere Serienaufnahmen ca. 10 von Thorium-Argon-, Flatfield- und 2-3 vom Objektspektrum in jeweils beiden Sätzen und kann mit der Auswertung beginnen. Die Spektren brauch ich auch später zum Kalibrieren und zum Arbeiten mit MIBAS. Wie bei den Flatfieldspektren fokussiert man den Computer auf den Spalt und nimmt neue Spektren auf. Ebenso Anfangsspektren und Spektren, die erst eine Stunde später gemacht werden.

10. Kalibrieren der Spektren

10.1. Vorbereitung der Spektren – Kalibrierung (Windows und LINUX)

Für diesen Vorgang werden zwei Betriebssysteme genutzt. Zum einen Windows, mit Maxim DL und zum andern LINUX, da auf LINUX das Programm MIDAS läuft, welches man für die weitere Kalibrierung benötigt. Das Programm ist von der ESO entwickelt (Seite ESO)

10.2. Aufnahmezeit, Temperatur und andere wichtige Daten ermitteln:

Um das Spektrum richtig zu benennen und einzusetzen, geht man bei MaxIm DL auf den FITS-Header und gibt bei Key Name „MIDPOINT“ ein. Nun wird das Spektrum nach der mittleren Aufnahmezeit benannt.

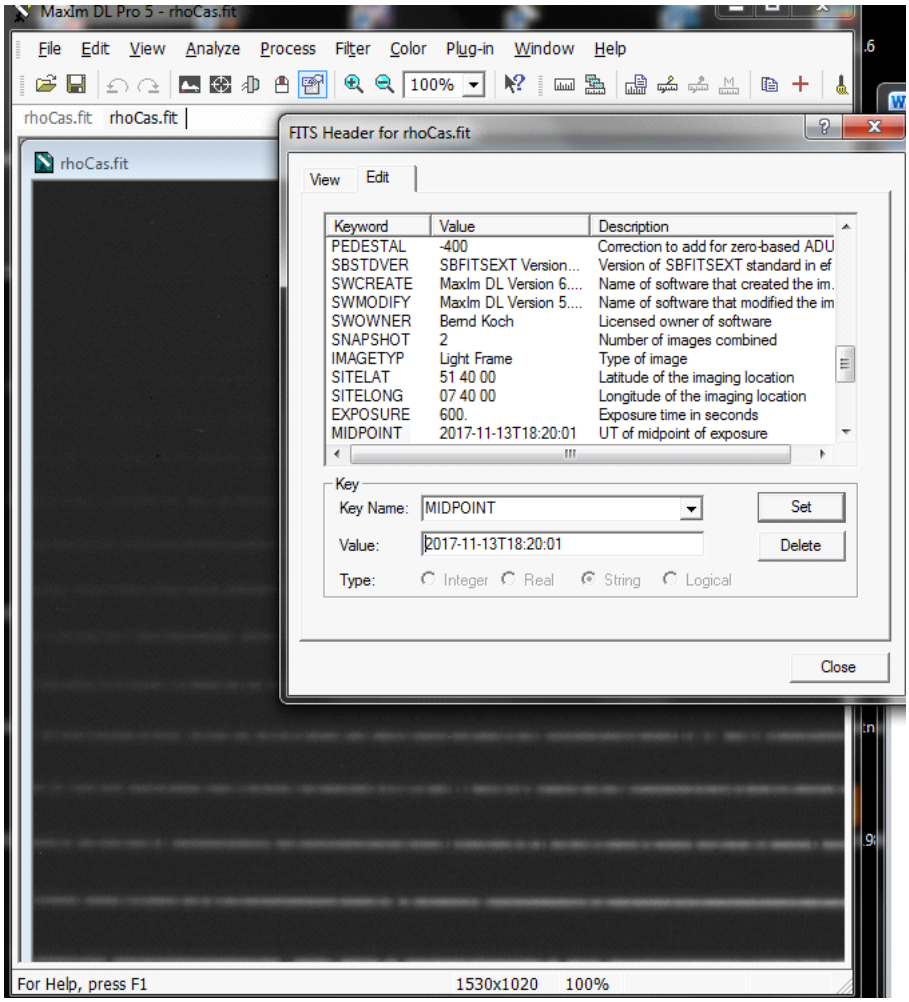


Abbildung 34: FITS Header

Flatfield (ff):

Flatfield Spektren werden zum einen aufgenommen, damit die folgende benutzte Software die Ordnungen des Spektrums erkennt und zum anderen, um Staub auf oder Kamera, bzw. in der Kamera zu erkennen.
Zudem darf eine Sättigung von 2^16 (65536)ADU nicht überschritten werden.
Es wird die Serie von den Flatfield Spektren zusammen addiert zu einem Median (Durchschnittswer tüber MaxIm DL.

Thorium-Argon-Lampe (ThAr):

Mit Hilfe des Thorium-Argon Spektrums können außerdem später bekannte Spektrallinien zur Kalibrierung benutzt werden. Auch hier wird aus einer Serie ThAr Spektren der Median berechnet.

Darkframes:

Dunkelbilder werden aufgenommen, um das Bilderrauschen zu minimieren. Dafür werden mehrere Dunkelbilder von einem Objekt, wie einer Referenzlampe aufgenommen und später zu einem Bild addiert. Auch hier werden Serien für eine genauere Qualität gemacht.

Die 5 Darks werden zu einem Masterdark kombiniert mit einer Belichtung von 300s und einer Temperatur von -15° (in meinem Fall bei der Spektroskopie von rho Cas).
Wichtig ist, dass man bei der Temperatur und Aufnahmezeit darauf achtet, dass sie ungefähr einen gleichen Wert haben, da es sonst auch hier zu Fehlern kommen kann.

Später werden die Dunkelbilder abgezogen

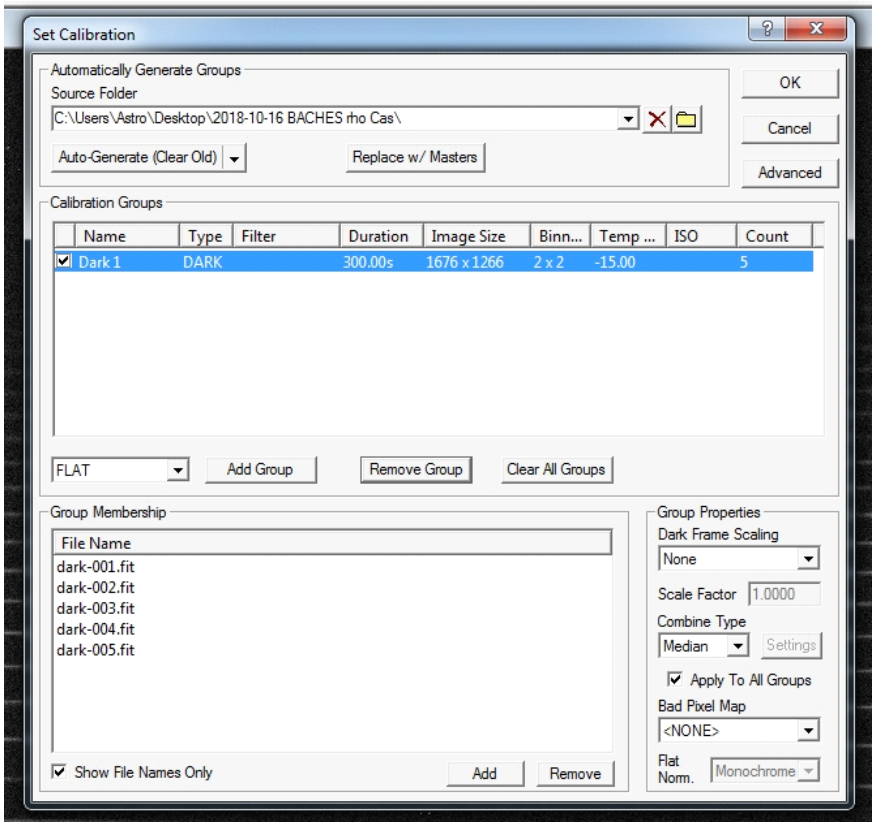


Abbildung 35: Dunkelbilder

Um festzustellen, ob die Linien übereinander liegen, kann man sie animieren und vergleicht sie nachher bei der Animation. Wenn die Linien nicht springen, liegen sie übereinander und können so weiterverwendet werden.
Das fertige Bild sieht dann wie folgt aus:

Abbildung 36: Spektrum mit Cosmics

10.3. Heiße Pixel und kosmische Strahlung

In den Spektren kommen sogenannte „heiße Pixel“ vor. Diese entstehen durch die Fehler in der Kamera. Diese können die Aufnahme im weiteren Verlauf stören.
Um diese zu entfernen, subtrahiert man sie mit einem sogenannten Darkframe (s.o).

Nachdem die heißen Pixel über MaxIm DL entfernt worden sind, bleiben noch hellere Stellen im Spektrum übrig, wie im folgenden Bild markiert:

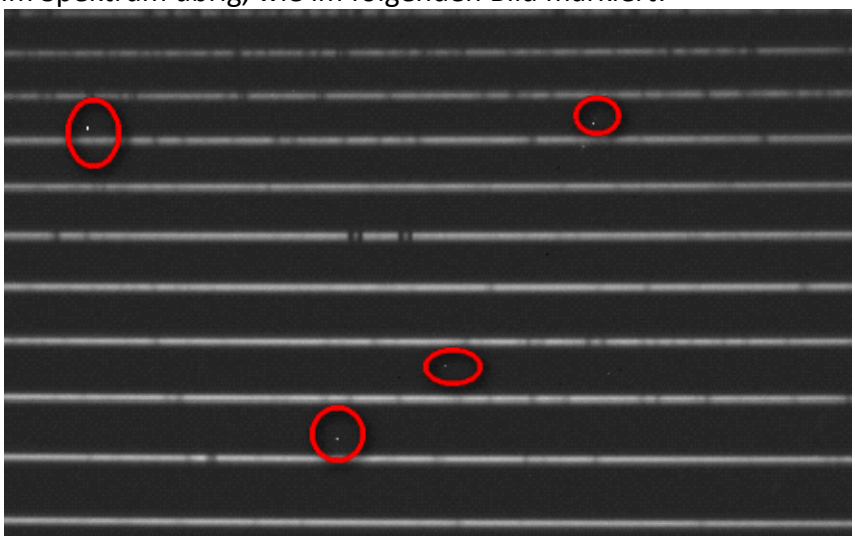


Abbildung 37: Cosmics

Schaut man sich diese genauer an, erkennt man, dass diese sehr stark und intensiv sind.
Hier handelt es sich um Gammastrahlung bzw. Kosmische Strahlung.
Deshalb werden diese Phänomene auch Comics genannt.

Um diese nun zu korrigieren, werden sie über MaxIm DL über das „Clone-tool“ verbessert und mit „richtigen Pixeln“ aus der Nähe überschrieben.
Dafür kopiert man eine kleine Stelle aus dem schwarzen Bereich und legt sie über das defekte Pixel.
Wichtig ist, dass nichts an den Spektrallinien verändert wird, da das zu einem gefälschten Ergebnis führt.
Hier ist ein Bild von dem Spektrum von rho Cas, vor dem Entfernen der heißen Pixel:

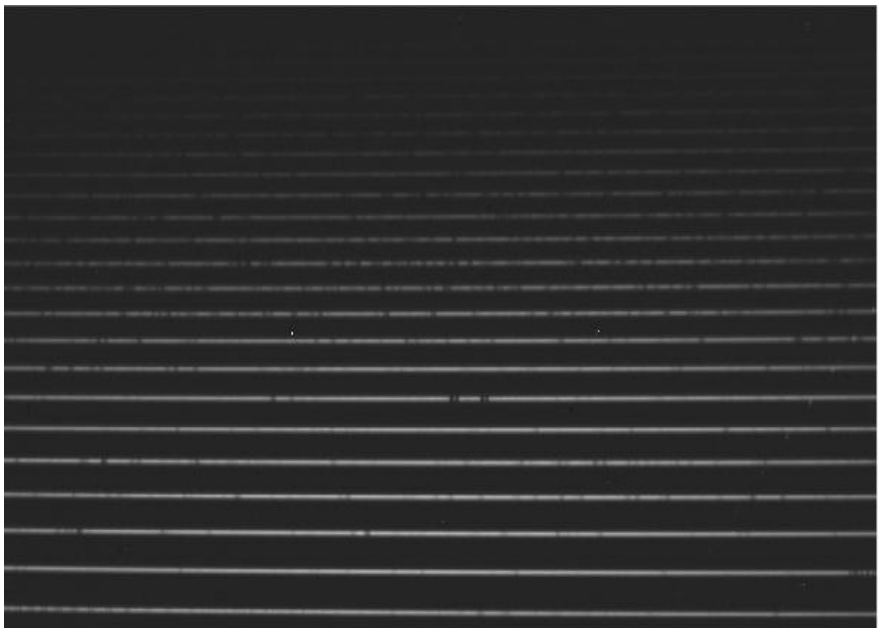


Abbildung 38: Spektrum vorher

Dieses Bild ist das gleiche Spektrum von rho Cas, nachdem Ich alle heißen Pixel entfernt habe:

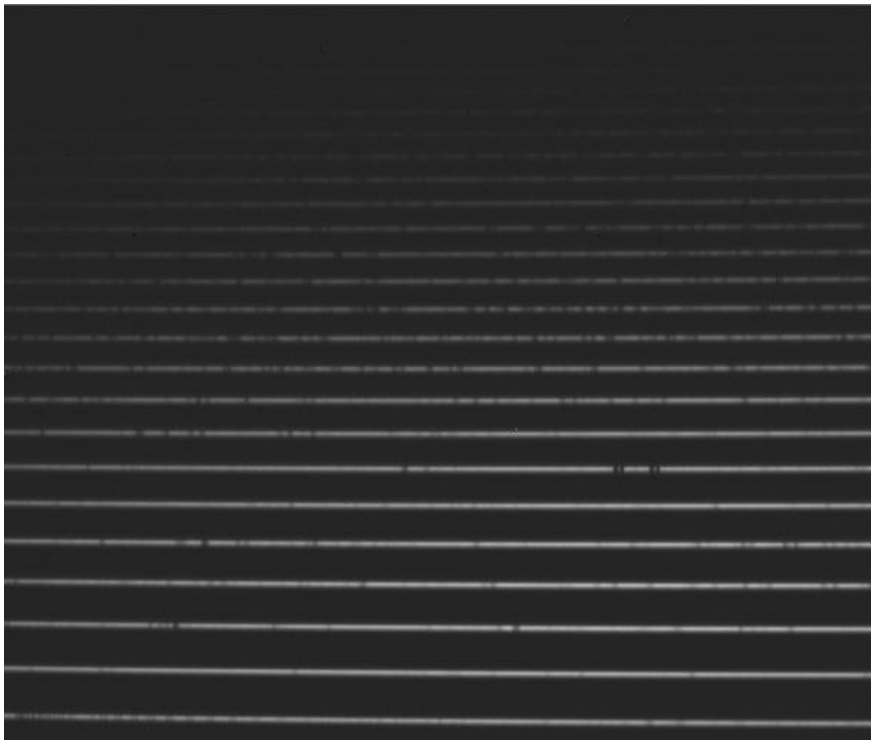


Abbildung 39: Spektrum nach der Bearbeitung

10.4. Vorbereitung auf LINUX

Nachdem das Bild über MaxIm DL vollständig bearbeitet wurde, erstellt man den Ordner „Shared“, auf den Linux zugreifen kann. Alle Bilder, die bearbeitet werden sollen liegen so im Ordner vor. Die Masterdarks und die restlichen Bilder, die man nicht über Linux bearbeiten möchte, kommen in einen extra Ordner. Im Ordner Shared sollten sich jetzt ein Masterdark, ein gemitteltes Flatfield Spektrum und ein gemitteltes Thorium-Argon Spektrum befinden. Auf diesen Ordner kann von beiden Betriebssystemen zugegriffen werden.

Midas_RhoCas	22.02.2018 15:21	Dateiordner	
09_13thar60s_median.fit	30.11.2017 16:11	MaxIm DL Image	3.055 KB
10_14ff120s_median.fit	30.11.2017 16:06	MaxIm DL Image	3.055 KB
rhoCas.fit	08.02.2018 19:52	MaxIm DL Image	6.104 KB
rhoCas2.fit	18.01.2018 17:13	MaxIm DL Image	6.104 KB

Abbildung 40: Shared

Anders als mit Windows arbeitet MIDAS mit einem Befehlsterminal, in dem man reinschreiben muß, was man als nächstes machen möchte.

```
baches_calib: Please enter option: (1) 1

********************    LINE PAIR SELECTION    ****************************

- Select Display 0

- Once display 0 is active, the line selection cursor window
  size can be adjusted with the arrow keys.

- Select pairs of lines present in consecutive orders from top left to bottom rig
  Left-click to select the upper left line, then the line repeated on the right s
  of the consecutive order. Then select the second pair of lines in the same mann
  When 4 lines are selected, right-click in the window to finish.
"- Leftclick in the terminal window.
- Enter the absolute order number of the first line you selected. (33)
- Enter the wavelength of the first line pair. (6662.268)
- Enter the wavelength of the second line pair. (4609.600)
*****************************************************************************
Enter absolute order number of first pointed line (square mark) : 33
Sequence no. 0001, Order no. 0033. Enter wavelength : 6662.268
Sequence no. 0003, Order no. 0018. Enter wavelength : 4609.6
Continue anyway (y/n,def=n) ?
```

Abbildung 41:Terminal

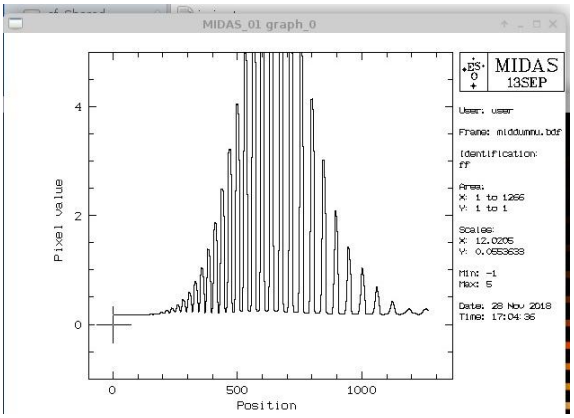


Abbildung 42: Begrenzugen

Man starte bei MIDAS mit dem Flatfield Spektrum. In einem Fenster wird die Intensität des Spektrums angezeigt, die dann über zwei Grenzen durch einen Mausklick eingegrenzt wird.

Anschließend öffnet sich ein weiteres Fenster, in dem MIDAS die im Flatfield erkannte Ordnungen anzeigt.
Man sieht grüne Linien. Wenn diese mittig entlang der Ordnungen laufen, kann man in den nächsten Schritt übergehen, indem man per Befehl die Ordnungserkennung bestätigt.

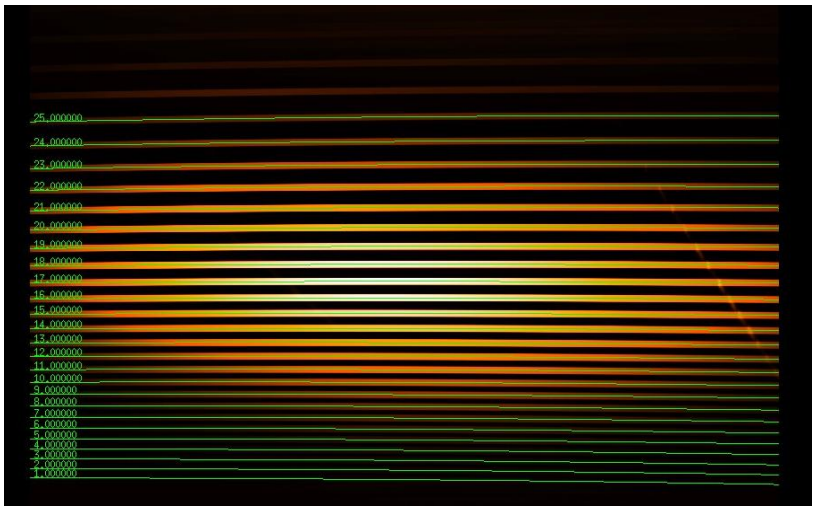


Abbildung 43: Erkannte Ordnungen

Anschließend wird das Thorium-Argon-Spektrum unter Berücksichtigung des Flatfield Spektrums und die dazu bereits herausgefundenen Informationen überprüft.

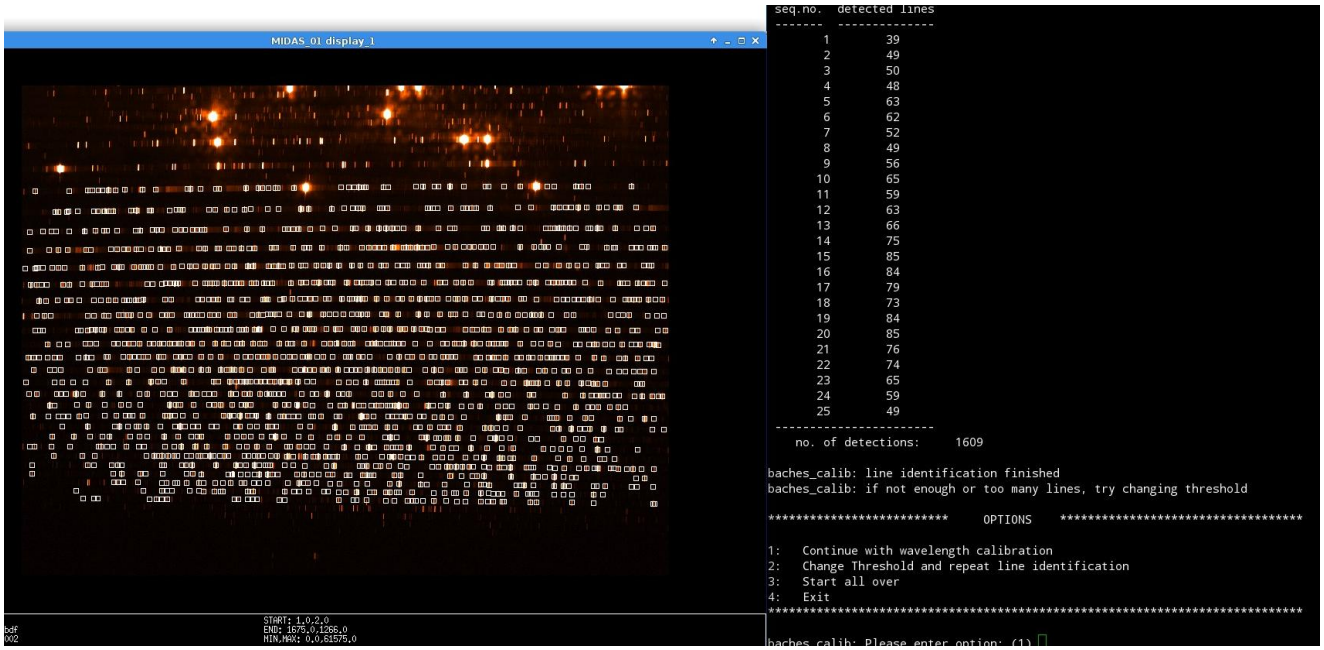


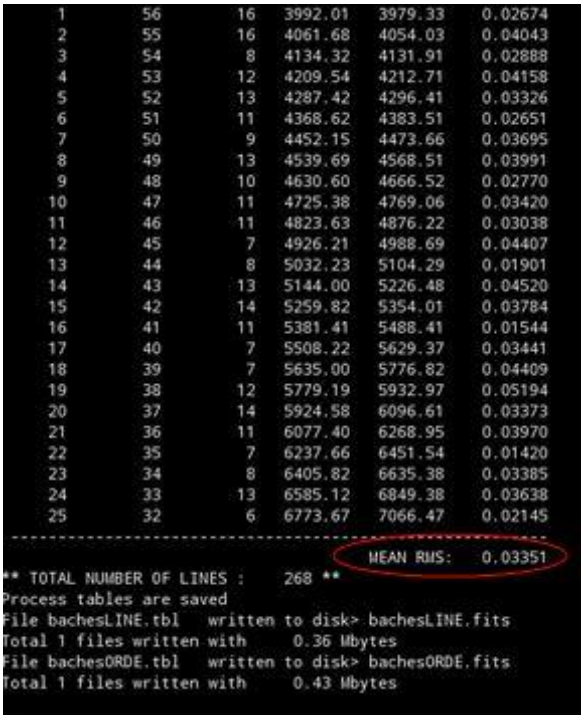
Abbildung 44: Ordnungen

Es öffnet sich ein weiteres Fenster, in dem man vier Linien, die für die Kalibrierung genutzt werden, anwählen soll. Diese Linien sollen sich an den Rändern wiederholen.

Abbildung 45: Markierungen setzen

Hat man diese Linien gefunden, kann man schließlich bestätigen und zum nächsten Schritt übergehen. Anschließend braucht das Programm die Ordnungen und Wellenlängen der ausgewählten Linien aus dem vorherigen Schritt. Diese Ordnungen liegen bei 33. und einer Wellenlänge von 6662,268 Angstrom und die zweite bei Ordnung 48. und 4609,6 Angstrom. Da sich die Linien überlagern, reicht es aus, nur diese beiden Angaben zu machen.

Die Kalibrierung wird nun über das Programm gerechnet, so dass das Programm am Ende die Auswertung und die gefundenen Ordnungen anzeigt.
Der RMS Wert zeigt die mittlere Kalibiergenauigkeit an, die bei mir bei 0,003A liegt und damit völlig ausreicht. Da die Kalibrierung gelungen ist, kann nun das Sternspektrum in das Programm geladen werden dann wendet man die Daten des Thorium-Argon Spektrums auf das Sternspektrum an.



1	56	16	3992.01	3979.33	0.02674
2	55	16	4061.68	4054.03	0.04043
3	54	8	4134.32	4131.91	0.02888
4	53	12	4209.54	4212.71	0.04158
5	52	13	4287.42	4296.41	0.03326
6	51	11	4368.62	4383.51	0.02651
7	50	9	4452.15	4473.66	0.03695
8	49	13	4539.69	4568.51	0.03991
9	48	10	4630.60	4666.52	0.02770
10	47	11	4725.38	4769.06	0.03420
11	46	11	4823.63	4876.22	0.03038
12	45	7	4926.21	4988.69	0.04407
13	44	8	5032.23	5104.29	0.01901
14	43	13	5144.00	5226.48	0.04520
15	42	14	5259.82	5354.01	0.03784
16	41	11	5381.41	5488.41	0.01544
17	40	7	5508.22	5629.37	0.03441
18	39	7	5635.00	5776.82	0.04409
19	38	12	5779.19	5932.97	0.05194
20	37	14	5924.58	6096.61	0.03373
21	36	11	6077.40	6268.95	0.03970
22	35	7	6237.66	6451.54	0.01420
23	34	8	6405.82	6635.38	0.03385
24	33	13	6585.12	6849.38	0.03638
25	32	6	6773.67	7066.47	0.02145

```
                                        MEAN RMS:   0.03351
** TOTAL NUMBER OF LINES :    268 **
Process tables are saved
File bachesLINE.tbl   written to disk> bachesLINE.fits
Total 1 files written with     0.36 Mbytes
File bachesORDE.tbl   written to disk> bachesORDE.fits
Total 1 files written with     0.43 Mbytes
```

Abbildung 46: MRS Bild kontrollieren

10.5. Normierung der Daten

Anschließend gibt das Programm Plots und Order raus.
Die Plots sind Bilder von dem Spektrum die man sich ansehen kann. Mit den Orders kann weiter gearbeitet werden. Die Plots stellen die Intensität (y-Achse) der Ordnungen (x-Achse) dar. Da man später die Spektren miteinander vergleichen möchte, werden diese auf das Pseudokontinuum eliminiert. Der Standard für die Astronomen ist die die 1.
Man klickt mit der Maus in einem Programm wie SpekTrack, den ungefähren Verlauf des Pseudokontinuums an, welcher später automatisch von der Software auf eins normiert wird.

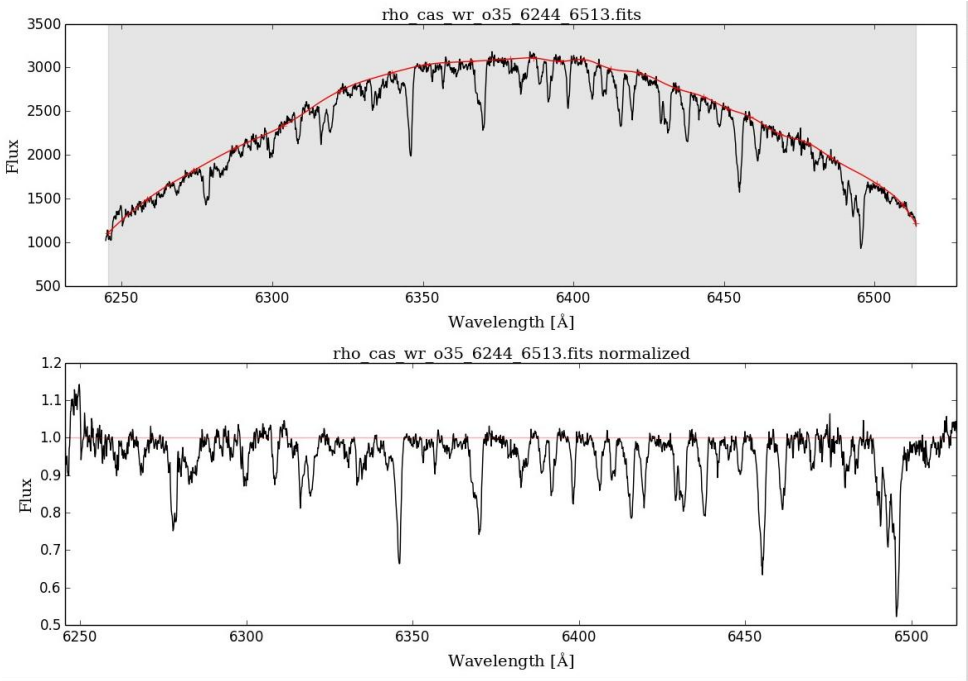


Abbildung 47: Oben: Plot, Unten: Normiertes Spektrum

Insgesamt macht man das mit allen Bereichen, die interessant zu forschen sind. Für meine Arbeit ist das die H-Alpha Linie (wegen der Wasserstoffhülle) und die Elemente mit Doppellinien (also Barium, Eisen und Natrium).
Da die Nominierung manuell per Hand ausgeführt wird, ist diese nicht ganz genau.

10.6. Bearbeitung mit BASS

Um meine Ergebnisse auf das Skript [19] vorzubereiten, habe ich mit BASS (auf Windows laufend) meine Spektren weiter gearbeitet und dabei die x-Achse angepaßt, sowie die Erdrotation korrigiert.
BASS (Basic Astronomical Spectroscopy Software) ist ein astronomisches Programm zur Bearbeitung von Spektren und wurde von John Paraskeva entwickelt. Es ermöglicht die vollständige Reduktion, Kalibrierung und Auswertung von Spektren.
Bass Skript

Da das Ziel ein Vergleich meiner Spektren, mit denen aus den Skript ist (Hα, Barium, Eisen und Natrium), muß meine x-Achse ebenfalls auf die Geschwindigkeit angepaßt werden. Dabei muß man zwei Bedingungen beachten, nämlich die Ruhewellenlänge, sowie die Korrektion der Erdgeschwindigkeit.
Die Ruhewellenlänge habe ich aus dem NIST Katalog für Elemente für jede Ordnung[20].

10.6.1. Korrektur der x-Achse

Um die x-Achse zu verändern, kann man in den „Chart Setting“ unter „x-Axis“ die „Doppler-Shift-Axis“ anwählen und die Ruhewellenlänge in „Rest Wavelength“ eintragen. Hier muß

[19] arXiv:1808.00220v1 [astro-ph.SR] 1 Aug 2018
[20] https://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html

man darauf achten, dass die Angaben in Angstrom und nicht in Nanometer angegeben werden müssen.

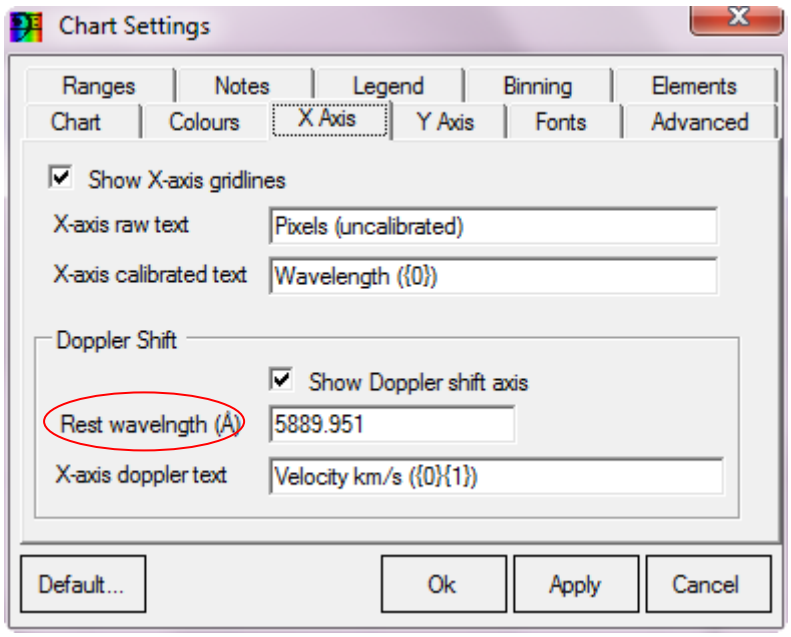


Abbildung 48: Chart Setting

Im Bild habe ich die Ruhewellenlänge einer betrachteten Natriumlinie eingegeben

10.6.2. Korrektur der Erdbewegung

Die Korrektur kann man unter der Operation „Doppler-Shift“ vornehmen.
Bei „Object Name“ gibt man den Namen des gewünschten Objektes an (hier Rho Cas) und klickt auf Simbad. Simbad berechnet RA und DEC selber aus. Auf der anderen Seite gibt man die Koordinaten von dem Standort der Sternwarte ein und unten die Uhrzeit.
Bei den Ergebnissen kommt ein Wert von 2,509137 km/s raus, was sehr gering ist.

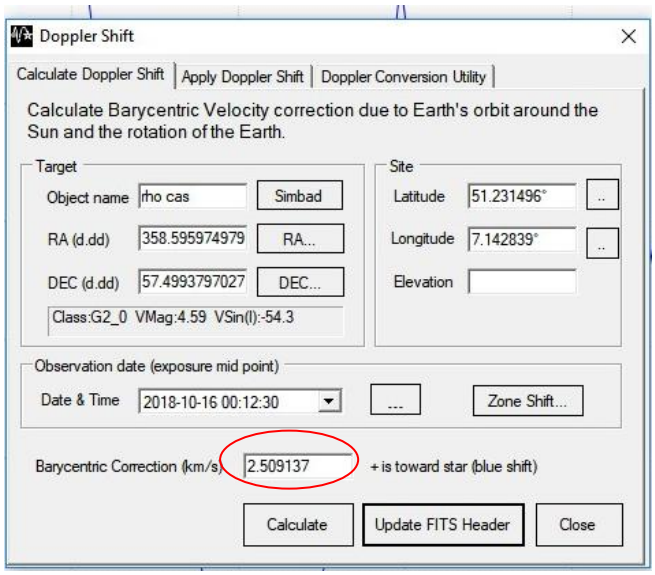


Abbildung 49: Doppler Shift

Diese Korrekturen habe ich bei allen meinen relevanten Spektren durchgeführt.
Anschließend wollte ich die Spektren in einem Diagramm zusammen darstellen. Da diese Option auf BASS nicht gegeben ist, mußte ich die BASS Datei vorerst in eine Text Datei

umwandeln und über Excel öffnen. Hier habe ich die x und y Werte in den Spalten für die Elemente angegeben und anschließend ein Diagramm erstellt.
Die Begrenzungen der x und y Achse habe ich dem Skript entnommen und ebenfalls angewendet. Zudem haben die Forscher aus dem Skript eine Systemgeschwindigkeit bei -47km/s gemessen. Auch ich habe diese mit einem schwarz-gestrichelten-Strich markiert. Anschließend habe ich meine Spektren mit denen aus dem Skript zusammengelegt und verglichen.

Anschließend habe ich alle Bilder zu einem zusammengefaßt (Sum IEEEE FLOAT), um eine genaue Darstellung von dem Spektrum zu bekommen.
Das Bild muß dann gespeichert werden.

11. Die Arbeit „Changes in the optical spectrum of the hypergiant rho Cas due to a shell ejection in 2013“und meine Erkenntnisse

11.1. Vorwort zu dem wissenschaftlichen Referenzpaper/Skript[21]

Für meine Projektarbeit möchte ich, wie bereits erwähnt, rho Cas genauer beobachten, da dieser vor einer Explosion zu einer Supernova steht und man bereits im Spektrum Anzeichen für das Abstoßen seiner Hülle sowie eine Pulsation festgestellt hat. Diese Beobachtungen aus dem Skript zeigen Daten, die von 2008-2017 aufgenommen und analysiert wurden von verschiedenen Elementen aus dem Stern. Diese wurden durch das Spektrum genauer analysiert, um eine Rotverschiebung oder Blauverschiebung feststellen zu können. Bei einer Rotverschiebung bewegt sich der Stern von der Erde weg und bei der Blauverschiebung auf die Erde zu. Diese Phänomene zeigen, dass sich etwas von dem Stern wegbewegt, nämlich die Hülle des Sternes. Hyperriesen oder andere große Sterne, die kurz vor ihrer Kollision stehen, stoßen oft ihre Hülle ab. Das Interessante bei rho Cas ist jedoch, dass er die Hülle abstößt und diese im Verlauf wieder auf ihn fällt. Er zeigt ein inverses P-Cygni Profile. Da er in seiner Endphase ist, durchlebt er viele und starke Masseverluste. Außerdem gibt es starke Lichtschwankungen, die ebenfalls auf eine Instabilität des Sternes hindeuten. Die Spektren der Referenzarbeit wurden mit einem hoch auflösenden Spektrographen gewonnen, Auflösungsvermögen R = ca. 60.000.
Zudem bezieht sich die Arbeit auf den Ausbruch der 2000-2001 stattgefunden hat, wobei der Stern bis zu $3 \cdot 10^{-2}$ MΘ verlor (A.Lobel,A.K. Dupree,R.P. Stefanik,G.Torres, et al.,Astrophys.J.583,923 (2003))
Darüber hinaus haben Verfasser (D.Shenoy) einer anderen Arbeit (s.Quellen) herausgefunden, dass rho Cas, anders als andere gelbe Hyperriesen, keine ausgedehnte zirkumstellare Struktur hat.
Die Aktualität einer detaillierten Untersuchung dieser Objekte beruht auf der Tatsache, dass solche massereichen Sterne die wahrscheinlichsten Vorläufer von Typ - II – Supernovae (SN I) ist.
Die pulsationsähnliche Erscheinung mit einer Amplitude von etwa 10 km / s ist nur für symmetrische Absorptionslinien mit schwacher und mäßiger Intensität charakteristisch. Allerdings konnte schon erforscht werden, dass langperiodische radiale Pulsationen in ρ Cas eine geringe Wahrscheinlichkeit haben.
Laut der Arbeit varriiert eine Amplitude von etwa +/- 7km/s relativ zur Massengeschwindigkeit des Systems Vsys=-47km/s. („The heliocentric radial velocity derived

[21] arXiv:1808.00220v1 [astro-ph.SR] 1 Aug 2018

from symmetric absorption lines of metals varies with an amplitude of about ±7km/s relative to the center-of-mass velocity of the system (the systemic ve-locity) Vsys=− 47km/s”)
Die Überwachung des Projektes war mit einem 6-m-Teleskop des Special Astrophysical Observatory mit einer spektralen Auflösung von R ≥ 60000.

Da die Messungen nur bis 2017 gehen, der Stern aber dennoch ständige Veränderungen aufweist, habe ich beschlossen, Aufnahmen von 2018 hinzuzufügen, die zur weiteren Darstellung und Analyse des Sternes beitragen.
Das Ziel des Skriptes ist laut Zitat, dass die Überwachungsergebnisse dafür dienen, dass eine weitere Überwachung fortgesetzt wird, gerade weil die Ausbruchsperioden scheinbar immer häufiger vorkommen „These non-trivial monitoring results serve as a stimulus for continued spectral monitoring of ρCas. In addition, photometric monitoring of the star (AAVSO) indicates that a new ejection of matter occurred in 2013, during which the brightness of the star decreased by 0.5m. This event occurred only 12 years after the previous one in 2000–2001. Thus, the ejections in ρ Cas are becoming more frequent.“

Die Systemgeschwindigkeit sind in dem Paper und auch in meinen Aufzeichnungen auf -47m/s gesetzt. Diese Geschwindigkeiten wurden anhand der Emissionslinien und Absorptionslinien gemessen
Die x-Achse aller folgenden Diagramme stellt die Geschwindigkeit in km/s (velocity) dar. Die Y-Achse stellt hingegen die relative Intensität dar.
Auch in meinen Eigenen Diagrammen zeigt die x-Achse die Geschwindigkeit (velocity) in km/s an und die y-Achse die relative Intensität. Meine Daten wurden am 16.10.18 mit dem BACHES Echelle Spektrographen (s.o) aufgenommen.

11.2 Entdeckungen in der Referenzpublikation

In der Publikation wurde gerade H-Alpha (Wasserstoff) genauer analysiert, da man bereits festgestellt hat, dass die Gashülle eine Wasserstoffhülle ist, die vom Stern abgestoßen wurde.
Insbesondere kann man bei H-Alpha und anderen Elementen, die Doppellinien (ionisiertes Barium Ba II, Fe I oder Na I,) haben, entscheidende Unterschiede feststellen, da diese sich im Verlauf anders zueinander verhalten. Worin genau sich diese Unterschiede feststellen lassen, werde ich im Verlauf weiter erläutern.

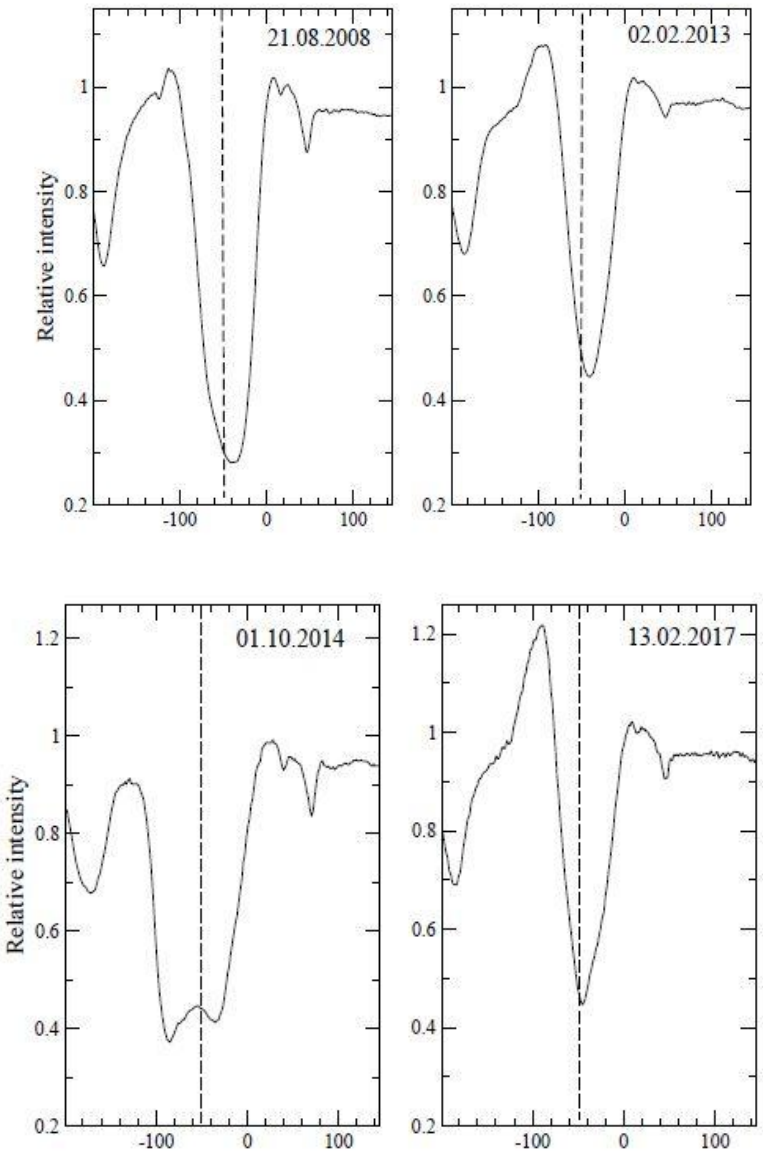
11.3. Zu Figur 2 aus der Referenzpublikation

Mit den Hα Aufnahmen, von 2008-2017 kann man anhand des Dopplereffektes nachweisen, dass die Gashülle vom Stern abgestoßen wurde und sich somit auch von dem Stern wegbewegt.
Das Besondere ist allerdings, dass man in den Aufnahmen ebenso erkennen konnte, dass die Hülle ab 2014 auf den Stern zurückfällt. Eine entscheidende Frage ist hier zudem, warum der Stern dieses pulsationsartige Verhalten hat, worauf das Skript allerdings nicht weiter eingeht.
Besonders an dem Paper ist zudem, dass ein Zeitraum dokumentiert wird, in der ein Ausbruch des Sternes stattgefunden hat, nämlich zwischen dem 02 Februar 2013 und dem 1 Oktober 2014. Anhand dieses Ausbruches kann man neue Vermutungen zum Alter des Sternes und seiner Stabilität bzw. Instabilität schließen.

Analysiert man die Aufnahmen genauer von der Wasserstoffhülle, kann man auf Veränderungen des Sternes, durch das Abstoßen der Hülle feststellen. Auch Sternenwinde und Schocks sind zu beobachten. Die Position des Absorbtionskerns, die Intensität der Emissionskomponenten und das Verhältnis ihrer Intensitäten variieren mit der Zeit.

Die Systemgeschwindigkeit sind in dem Paper und auch in meinen Aufzeichnungen auf -47m/s gesetzt. Diese Geschwindigkeiten wurden anhand der Emissionslinien und Absorptionslinien gemessen.

11.4. Meine Aufnahme von H-Alpha (16.10.18) im Vergleich zu den Aufnahmen aus der Arbeit



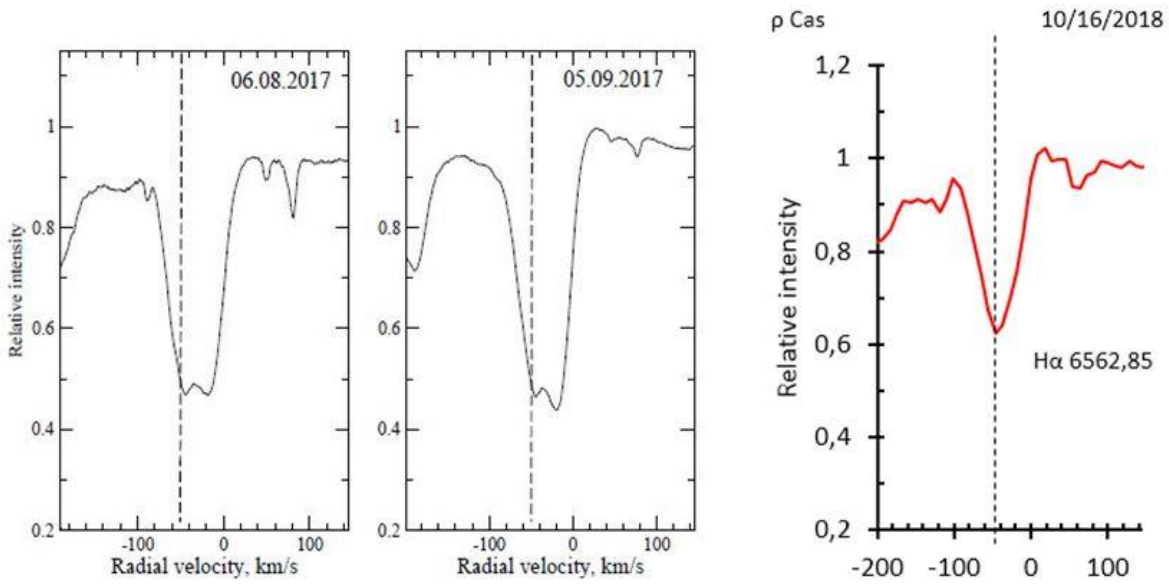


Abbildung 50: H-Alpha Profil (Meine Aufnahme: unten rechts vom 16.10.18)

In der Aufnahme von 2008 erkennet man eine nahezu symmetrische Absorption von Hα, wobei der Kern nahe der Systemgeschwindigkeit liegt. Von 2008-2011 haben sich die Aufnahmen nahezu gar nicht verändert. Hier ist der Stern also in einer ruhigen Phase und das H-Alpha Profil ist vergleichsweise zu anderen Sternen normal.

Ab dem 02.02.2013 erkennt man das erste Anzeichen des Hüllenereignisses. Zum einen erkennt man eine starke Emission. Zudem erkennt man eine Rotverschiebung des Kernes. Das deutet darauf hin, dass die Schicht kollabiert und zusammenbricht und die Schicht kurz vor dem Ausbruch steht.

Knapp eineinhalb Jahre später am 01. Oktober 2014 weist das Profil erneut starke Veränderungen auf. Zum einen ist die Emission sehr gering geworden und liegt bei einer Helligkeit von ca. 0,9.
Besonders interessant ist jedoch, dass sich ein doppelter Kern gebildet hat, der eine Kontraktion, ebenso aber auch eine Expansion anzeigt.
Die Blauverschiebung, also die Kontraktion, hat eine Geschwindigkeit von 50km/s.
Der doppelte Kern der Absorptionslinie zeigt also, dass sich etwas vom Stern auf den Beobachter zu bewegt und sich etwas vom Beobachter wegbewegt. Das ist die H-Alpha Hülle, die Insgesamt vom Stern abgestoßen wird und beobachtet wird ein Teil , der sich auf den Beobachter zu bewegt und somit rotverschoben ist und ein anderer Teil, der sich auf der anderen Seite vom Stern wegbewegt und somit blauverschoben wird. Hier ist der Stern kurz nach seinem Ausbruch dokumentiert worden, daher sind hier diese starken Veränderungen von H-Alpha zu sehen, sowie auch eine Minimierung der Emission.
Am 13. Februar 2017 hat man zudem auch ein inverses P-Cygni Profil. Die H-Alpha Emission liegt hier bei 1,2. Vergleicht man dieses Spektrum mit den Aufnahmen vom 02. Februar 2013, fällt in beiden auf, dass es eine Emission bei ca. 20% des Kontinuumniveaus festgestellt wurde. Beide Beobachtungsmomente entsprechen dem aufsteigenden Ast vor der maximalen Helligkeit.

Der Kern der Absorptionslinie hat sich im August 2017 erneut verschoben, so dass eine Kontraktion der oberen Schichten der Atmosphäre zu erkennen ist.
Im August 2017 erkennt man zudem eine Rotverschiebung des Doppelkernes. Dieser ist das Resultat einer Kontraktion der oberen Schichten der Sternatmosphäre. Dieses Verhalten des Hα-Profils weist auf eine erhöhte Instabilität der oberen Schichten der Sternatmosphäre hin. Vor dem Auswurf und während der Regulierung der Helligkeit nach dieser Episode.
Im September 2017 ist der Absorptionskern immer noch rotverschoben und im August und September ist jeweils ein kleiner Sternenwind links von dem rotverschobenen Kern zu erkennen. Das Spricht ebenfalls für kleine Ausbrüche.

Zusammengefaßt erkennt man deutlich, dass die Hα-Emission nicht mit den Eigenschaften der Metalllinienprofile zusammenhängt. Die Hα-Linie weist am 13. Februar 2017 und am 6. August 2017 unterschiedliche Profile auf, während die Geschwindigkeitsmuster und die stärksten Absorptionsprofile für diese beiden Spektren übereinstimmen.
Die von schwachen symmetrischen Absorptionslinien abgeleiteten Geschwindigkeiten unterscheiden sich auch an diesen Daten. Somit wurden neue Beweise für das Fehlen einer direkten Verbindung zwischen den Schichten, in denen Hα und stärkste Absorptionen gebildet werden, und tieferen Schichten, die Pulsationen ausgesetzt sind, gefunden.

11.5 Meine Messungen zu Hα am 16.10.18

Meine Messungen habe ich der Systemgeschwindigkeit von -47km/s angepaßt und festgestellt, von dass das Hα Profil dem Profil von 2008 und somit „Dem Normalzustand“ ähnelt. Es gibt keinen Doppelkern mehr, allerdings ist der Kern minimal rotverschoben. Die Emission liegt unter 1 und ist leicht kleiner als die von 2008. Zum anderen fällt aber auf, dass der Absorptionskern um 0,2 in der Helligkeit gestiegen ist und bei 0,6 liegt. Man konnte beobachten, wie der Kern sich im Laufe der gesamten Aufnahmen von 2008 bis 2018 in der Helligkeit immer mehr gesteigert hat.
Insgesamt schließe ich daraus, dass sich die Wasserstoffhülle nach dem Hüllenereignis wieder beruhigt hat und daher auch die die Hα Profile ein „normales-“/Standardprofil aufweisen.

11.6. Das Verhalten von Barium - Figur 3

Das Element Barium von 2009-2013 verglichen und analysiert. Die Spektren wurden am 30 September 2009, 2 Februar 2013, 8 August 2014 und am 13 Februar 2017 aufgenommen und die Systemgeschwindigkeit liegt bei -47km/s.

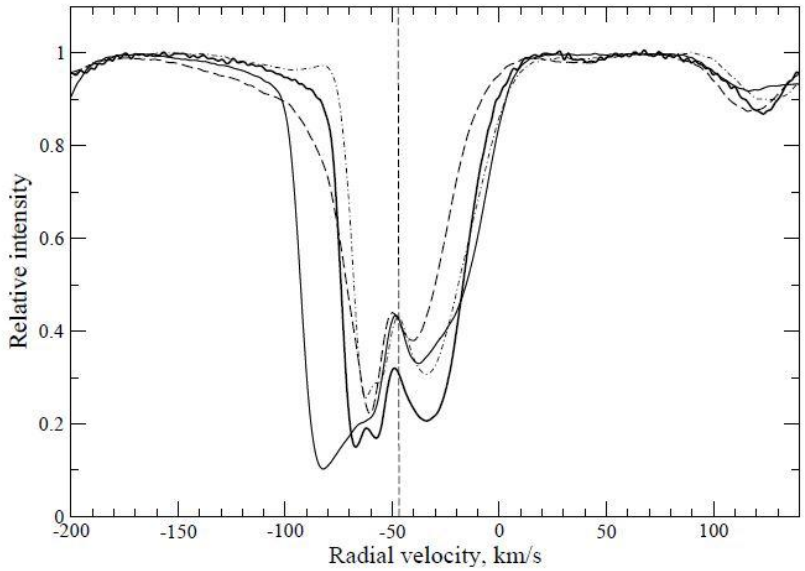


Abbildung 51: Figur 3 aus dem Skript

In den Spektren, die an allen Daten in den Jahren 2014 und 2017 aufgenommen wurden, blieben die Profile der starken Absorptionen im Spektrum von ρ Cas gespalten.
Die kurzwelligen Komponenten der gespaltenen Absorptionen bilden sich in den obersten Schichten der expandierenden Atmosphäre nahe der zirkumstellaren Gashülle, was durch die Übereinstimmung der Geschwindigkeiten dieser Komponenten bestätigt wird.
Man kann in 2017 sehen, dass die kurzwellige Komponente im Gegensatz zu früheren Aufnahmen zwei Absorptionsmerkmale aufweist.

Hier wurden die Radialgeschwindigkeiten mit der Lichtintensität verglichen. Wichtig ist, dass die langwellige Komponente eine konstante Verschiebung relativ zur systemischen Geschwindigkeit von ungefähr 15 km / s aufweist.

Die kinematische Instabilität der oberen atmosphärischen Schichten, die dem Einfluß des Sternwinds ausgesetzt sind, äußert sich auch in der Variabilität des kurzwelligen Flügels der Linie Ba II 6141, was auf eine merkliche Verstärkung des Windes vor dem Auswurf der Hülle hinweist. Vor dem Hüllenereignis liegt die Geschwindigkeit hier bei -150km/s. Dabei unterscheidet sich die Linie von 2014 sehr stark.
Die Linie ist immer noch geteilt und die Position und Intensität der langwelligen Komponente unterscheidet sich nicht von ihren Werten im Profil zu früheren Zeiten. Die kurzwellige Komponente ist erheblich verbreitert (ungefähr um den Faktor zwei) und ist auch zu kürzeren Wellenlängen hin verschoben.
Insgesamt liegen die Unterschiede also in der Steilheit der Flügel der Komponenten der gespaltenen Absorption, welche Unterschiede in den physikalischen Bedingungen in den Bereichen der Bildung der Komponente anzeigt.
Das bestätigt demnach, dass die kurzwellige Komponente mit ihrem steileren kurzwelligen Flügel in den obersten Schichten der ausgedehnten Schichtatmosphäre gebildet wird.
Desweitern zeigt die Aufteilung der kurzwelligen Komponente eine Verstärkung der Schichten in der obersten Sternschicht an.

11.7. Meine Aufnahmen von den Elementen aus Figur 4 im Vergleich zum Skript

In Figur 4 wurden Hα, Barium II und Eisen miteinander verglichen, insbesondere, um zu beweisen, dass die Wasserstoffhülle unabhängig von den anderen sogenannten symmetrischen (sym) Linien von Elementen ist. Die Systemgeschwindigkeit liegt bei –47km/s. Die Aufnahmen wurden im Zeitraum von 2014-2017 angefertigt, wobei ein Bild aus dem Jahr 2014 und 3 beurteilt über das Jahr 2017 stammen. Obwohl die drei Aufnahmen aus 2017 im selben Jahr angefertigt wurden, kann man größere Unterschiede von dem Anfang des Jahres und dem Ende sehen.

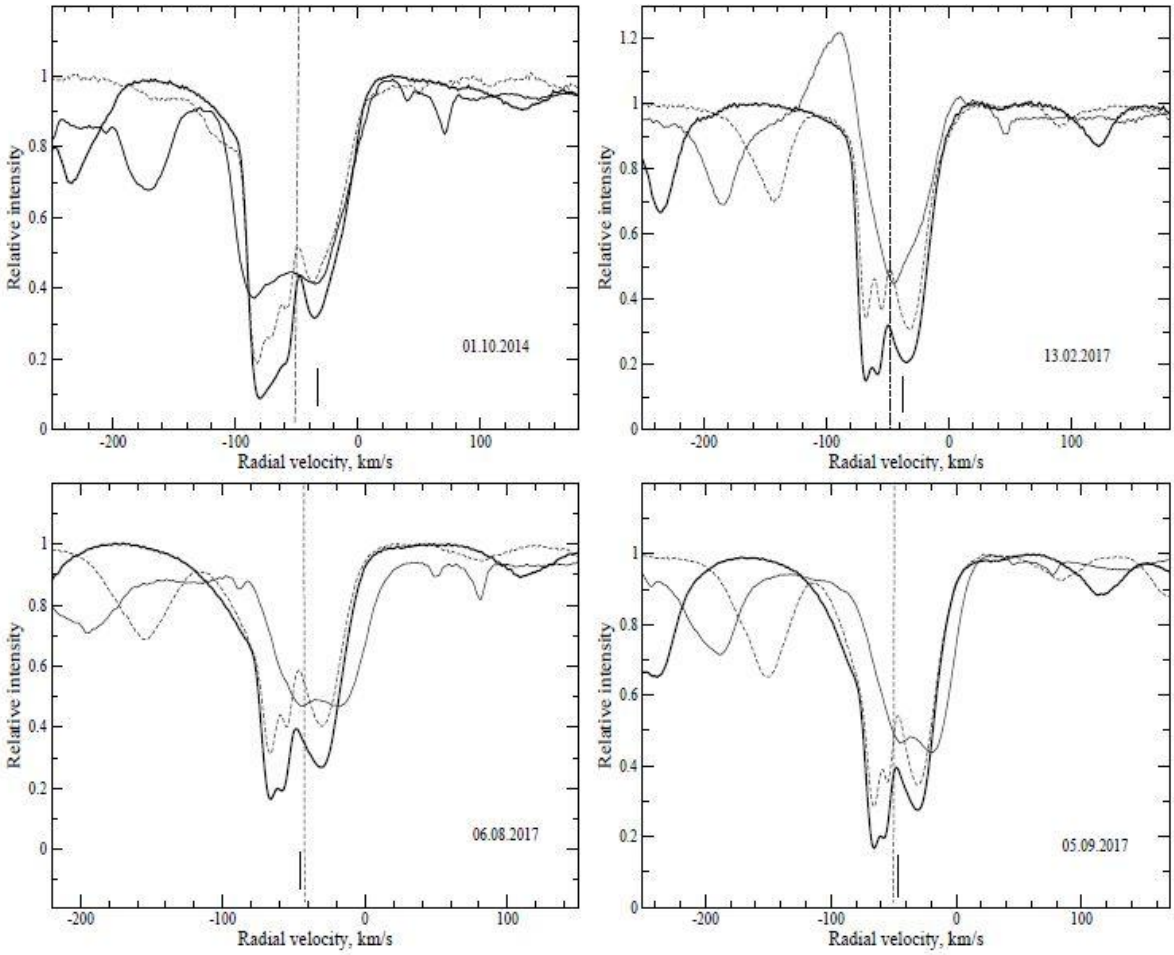


Abbildung 52: Figur 4 aus dem Skript

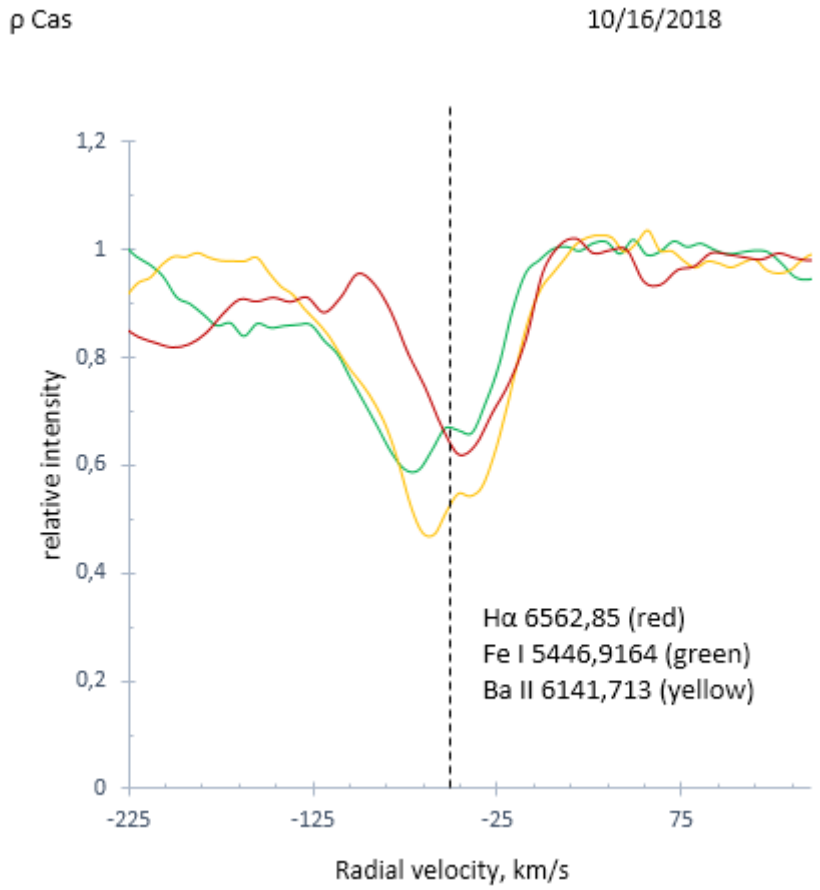


Abbildung 53: Meine Erarbeitungen zu Figur 4

Man kann erkennen, dass die Geschwindigkeiten von Hα (V(Hα)) und den anderen Elementen (V(sym)) nicht übereinstimmen diese Unterschiede deuten auf eine dynamische Schichtung der oberen atmosphärischen Schichten von ρ Cas hin.

Die Veränderung der Barium- und Eisenlinien ist sehr gering. Bei dem Barium hat sich sehr wahrscheinlich durch ein Sternenwind ein Doppelkern gebildet. Zudem ist die Lichtintensität in allen drei Elementen bis 2017 leicht gestiegen. Im Laufe von 2017 steigen sie von Februar bis September noch mal. Dieses Phänomen ist bei allen drei Elementen zu beobachten. Dennoch unterscheidet sich Hα, denn während die anderen Elemente sich kaum verändert haben, hat Hα, wie bereits erwähnt, eine starke Emission im Jahr 2017 (Februar) gehabt und auch ihre Lichtintensität ist stark gestiegen. Diese Emission ist schon im August verschwunden und einen Monat später hat sich das Hα Profil fast normalisiert. Während sich das Hα Profil ständig verändert, zeigen sich in den anderen Spektren kaum Veränderungen. Genau das spricht dafür, dass eine expandierende Wasserstoffhülle am Stern vorhanden ist, die nicht mit den anderen Elementen zusammenhängt.

Am 1.10.2014 ist die Lage der Absorptionskerne nahezu identisch. Im Februar 2017, wo es eine starke Emission gab, verschiebt sich Hα ins blaue auf -67km/s.
Da hier die kurzwellige Komponente von Barium II in derselben Lage bleibt, wird hier kein Zusammenhang mit der Hüllenemission gesehen.

Zudem ist die kurzwellige Komponente des Splittings durch Sternenwind beeinflußt. Diese sieht man im August 2017 und September 2017.

Schaut man sich die Linien von 2013 sieht man, dass hier die Geschwindigkeiten *über den ansteigenden Zweig der Helligkeitsschwankungen* von Hα und V(sym) noch übereinstimmen. Im August 2017 ist der Unterschied zwischen V(Hα) und V(sym) besonders stark überein mit dem *absteigenden Ast der Helligkeitsschwankungen*.

Mein selbst erforschtes Spektrum paßt sich den anderen Spektren aus vom August 2017 sehr an. Die Doppellinien sind von der Lichtintensität um ungefähr 0,2 gestiegen. Auch die Intensität der Wasserstoffhülle ist um 0,2 gestiegen (von 0,4 auf 0,6).Hier ist die H-Alpha Linie so wie 2008, also in ihrem Normalzustand. Barium und Eisen haben sich nicht stark verändert. Also sieht man in meinen Beobachtungen auf der einen Seite, dass die Hülle unabhängig ist, da sich h-Alpha unabhängig von den anderen Linien verändert. Zum anderen erkennt man ebenso, dass sich Hα schnell reguliert hat nach dem Ausbruch und erst mal wieder eine einigermaßen stabile Lage einnimmt. Der Sternenwind, der für den Doppelten Barium Kern beeinflußt, ist nicht in meinem Spektrum zu erkennen (aufgrund geringerer Auflösung).

Die Systemgeschwindigkeit habe ich, wie im Skript aus -47km/s, genommen.

11.8. Meine Aufnahmen zu den Elementen aus Figur 6 im Vergleich zu dem Skript

In der Figur wurden Na I (5889Å), K I(7698Å) und Ba I (6141Å) übereinander gesetzt und die Geschwindigkeiten der beiden Elemente wurden verglichen.
Das Spektrum wurde am 6 August 2017, also nach dem Hüllenereignis aufgenommen. Aus den vorherigen Spektren konnte man feststellen, dass sich das Hα-Profil zu diesem Zeitpunkt wieder weitestgehend „normalisiert“ hatte und nicht mit den anderen Elementen mit Doppellinien zusammenhängt. Barium und Natrium zeigen beide Doppellinien auf.

Dabei liegt die Systemgeschwindigkeit bei -47km/s.
In meinen eigenen Forschungen konnte ich Kalium nicht einbeziehen, da diese Wellenlänge (7698 Å) nicht mehr in meinem Spektrum vorhanden war. Die kleinen Balken im Skript zeigen die interstellaren Linien der Elemente.

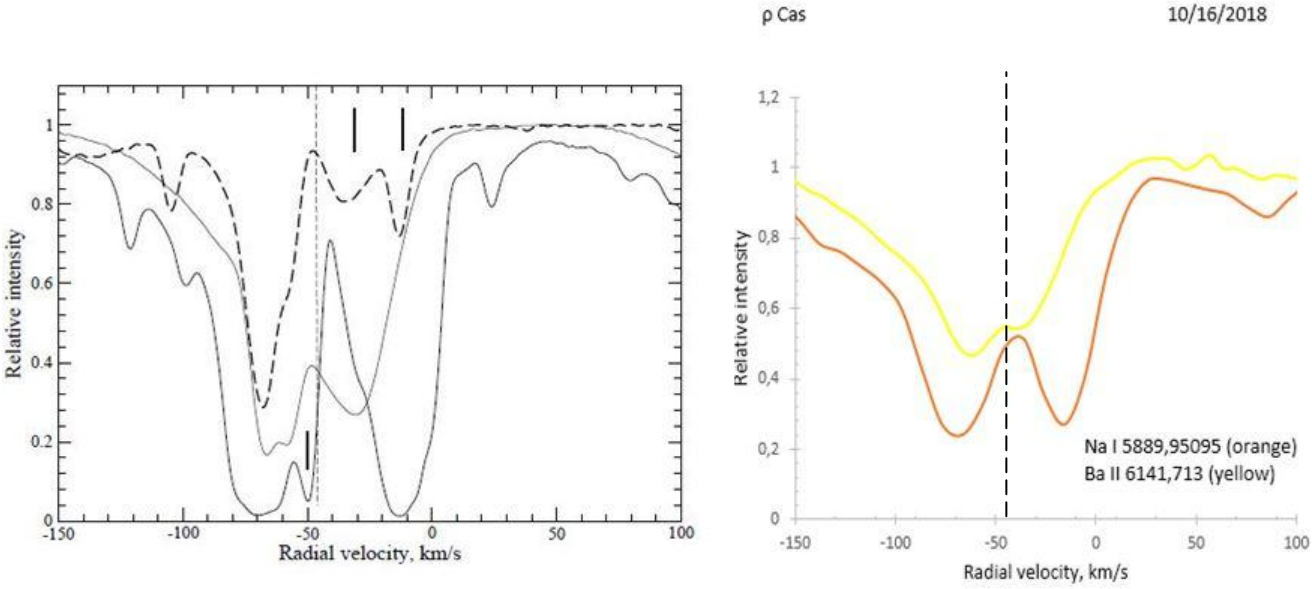


Abbildung 54: Figur 6 (links) im Vergleich zu meinen Messungen

Beim Natrium kann man eine Absorption von -50km/s feststellen, die jenseits des Perrseusarmes liegt und im stellaren Medium[22] gebildet wird.
Die Linien des Natrium erhalten breite Komponenten und ein Absorptionsmerkmal von Vr=-49,8km/s und Vr=-29km/s. Damit liegen sie nah beieinander.
Das Kalium Profil, aus dem Skript, entspricht hauptsächlich den beobachteten Merkmale der Na I Linien.
Die interstellaren Komponenten unterscheiden sich jedoch im lokalen Arm und Perseus-Arm mit Vr=-12 und Vr=-29.
Durch das Barium Profil wird laut Skript zudem unterstützt, dass sich die Kurzwellenlängenkomponenten der gespaltenen Absorption im zirkumstellaren Medium bilden.
Man konnte zudem feststellen, dass sich die Amplitude der Pulsationsradialgeschwindigkeit auf ± 13/14 km/s gestiegen ist, allerdings gilt dass nicht für die Emissionslinien die in der äußeren, verdünnten Schale gebildet werden.

Insgesamt schließen die Forscher daraus, dass die Bewegungen nach Außen mit der systemischen Geschwindigkeit dominieren.
Werden die Metalllinien in einer Region hinter der Stoßfront emittiert, müßte man die Emission in der nahen Hemisphäre beobachten können.
Die in dem Diagramm entdeckte Aufspaltung von Absorptionen in drei Komponenten, paßt wiederum nicht dazu, dass die Stoßfront in der Mitte des Sternes ruht. Hier sind noch Unklarheiten.

In meinem eigenen Natrium Profil kann man die Komponenten mit der Geschwindigkeit -12km/s und -49,7km/s nicht erkennen. Das könnte an der Lichtverschmutzung oder dem unterschiedlichen Equipment liegen (s. Fehlerdiskussion). Ich konnte aber feststellen, dass die relative Intensität hier um 0,2 gestiegen ist, wie auch in Figur 3 und Figur 2 zu beobachten ist. Die Helligkeit ist auch beim Barium um 0,2 gestiegen. Auch hier konnte ich nur 2 Komponenten feststellen. Zudem erkennt man in meinem Diagramm noch, dass die

[22] Raum zwischen den Sternen einer Galaxie.

zweite Komponente stark verundeutlicht und zurückgewichen ist. Sie ist nicht mehr so stark ausgeprägt. Hinzu kommt, dass sich auch die relative Intensität verändert hat, allerdings ist diese gestiegen.
Sie war in den Aufzeichnungen des Skriptes bei ca. 0,25. In meiner eigenen Aufzeichnung liegt sie bei 0,52.
Insgesamt führt das auch dazu, dass sich die Graphen der Elemente in meinem Diagramm nicht mehr schneiden. Im Skript schneiden sie sich an zwei Stellen, nämlich bei Vr= -49km/s und Vr=-25km/s. Durch die Zurückbildung der einen Komponente in meinem Diagramm sind gar keine Schnittpunkte mehr vorhanden. Dieses Phänomen könnte man für die Zukunft auf jeden Fall noch näher beobachten (s Ausblick).

Insgesamt sieht man, dass sich das Element Barium stark verändert und sogar eine Komponente komplett abschwächt, während Natrium zum größten Teil kaum verändert wird. Beide Elemente haben aber eine steigende relative Intensität mit dem Wert 0,2. Die Zurückbildung der Barium Komponente ist hier besonders auffällig und erforschenswert.

11.9. Schlußfolgerung des Skriptes und meine Schlußfolgerungen zu meinen Forschungen.

Die Forscher aus dem Paper, haben rho Cas in dem Zeitraum von 2008-2017 spektroskopiert und dabei festgestellt, dass verschiedene Linien im Spektrum variabel sind und weisen so auf eine Region innerhalb des Sternes sowie eine Ausdehnung der Atmosphäre hin.
Bei der Untersuchung der symmetrischen Absorptionslinien (Vr(sym)) ist aufgefallen, dass die Geschwindigkeit, die von den Absoptionslinien abgeleitet wird, variabel ist, mit einer Amplitude höher als 10km/s.
Zudem hat sich auch das Verhalten der H-Alpha Linie stark verändert. In den Jahren von 2008-2011 war ihr Absorptionsprofil mit der Position von dem Absorptionskern nahezu identisch, jedoch änderte sich das Profil im Oktober 2014 durch die Schalenepisode. Es entstand ein Doppelkern und die kurzwellige Komponente verschob sich relativ zur systematischen Geschwindigkeit bis zu 50km/s.
Ebenso konnte man im Jahr 2017 ein inverses P-Cygni Profil feststellen, die ebenfalls auf eine kontrahierende Gashülle um den Stern hinweist.
Diese Verschiebungen des Hα-Profils deuten auf Veränderungen in der Struktur der oberen Schichten der ausgedehnten Atmosphäre hin
und ausgeprägter Instabilität dieser Schichten. Die Verschiebung zu längeren Wellenlängen zeigt wiederum wieder einen Zusammenfall der Schichten an.
Auf die Inhomogenität der oberen Schichten der Atmosphäre und der Gashülle des Sterns, beweist der Vergleich der Radialgeschwindigkeiten der symmetrischen Absorptionslinien und der Hα-Linie, da hier die meisten Epochen nicht übereinstimmen.
2013, als die Helligkeit zunahm, stimmten die Geschwindigkeiten von V(Hα) und V(sym) allerdings überein. Mit der Bildung des Hα Doppelkernes 2014 wurden die Unterschiede sehr hoch.
In den schwachen und langwelligen Bereichen des Spektrums wurden 2013 zudem auch Schalenemissionslinien von Eisengruppenelementen gefunden.
Die Intensität vergerringerte sich wieder, was darauf hindeutet, dass der Stern sich wieder weiterstgehend normalisiert hat.

Durch die Entdeckung 2017, dass nun drei statt zwei Komponenten vorhanden sind, läßt Genaueres zu der Struktur von rho Cas schließen, nämlich, dass die kurzwelligen Komponenten von den Linien in der zirkumstellaren Hülle gebildet werden, wo auch schwache Emissionen von Metallen und einer der breiten Komponenten des Na I Dubletts gebildet werden.
Durch die Variabilität der Ba II 6141 Linie 2013 (V~150km/s) vor dem Massenauswurf zeigt zudem die kinematische Instabilität des Sternes. Diese instabile Atmosphäre ist zudem auch starken Sternwinden ausgesetzt.

Auf der einen Seite wird hier also der Ausbruch deutlich, welcher immer wieder auf die Instabilität des Sternes hindeutet. Betrachtet man allerdings die Spektren von 2017 und vergleicht diese mit meinen von 2018, kann man ebenso erkennen, dass sich der Stern zunehmend beruhigt. Er nimmt immer mehr die normale Hα Absorption an und es gibt keine Emission mehr. Die H-Alpha Linie ist, wie man aus Figur 4 schließen kann, jedoch immer noch unabhängig von den Doppellinien, wie auch bereits im Skript dargestellt.

Man sieht also einmal in den Aufnahmen des Skriptes den Stern unmittelbar vor seinem Hüllenereignis und nach seinem Hüllenereignis: Das Ereignis läßt sich mit dem Spektrum beweisen und wird durch die Veränderungen in diesem Spektrum erklärt. Dabei veränderte sich die H-Alpha Hülle stark und unabhängig von anderen Elementen, woraus man schließen konnte, dass die expandierende Hülle eine Wasserstoffhülle sein muß. Auch in meinen Spektren im Vergleich aus den Daten von Figur 3 aus dem Skript sieht man, dass die Wasserstoffhülle unabhängig von den anderen Elementen (Ba II, Fe I) ist.
Durch meine fortgeführten Beobachtungen sieht man, dass das Hüllenereignis vorbei ist, da sich die H-Alpha Linie wieder normalisiert hat und bisher keine weiteren neuen Auffälligkeiten ausweist.

12. Fehlerdiskussion

In verschiedenen Bereichen treten Ungenauigkeiten und Fehler bei der Analyse von Spektren auf. Hier sind einige Fehlerquellen aufgelistet.

1. ***Bildrauschen***
   Es kann ein thermisches Rauschen des Sensors auftreten, welches die Spektren beeinflußt

2. ***Witterungseinflüsse auf die Technik***
   Wie bereits im Teil der technischen Daten beschrieben, haben Witterungsbedingungen Einfluß auf die Technik. Vor allem die Temperatur spielt hier eine große Rolle, denn das Teleskop auf Station 7 muß sich erst an die Außentemperatur gewöhnen, da sonst die Spektren ungenau werden. Zudem sollte man die Serienspektren schnellstmöglich nacheinander aufnehmen, da die Temperatur immer mal wieder schwanken kann und dadurch Spektren ungenauer macht. Daher werden meist auch zwei Reihen an Spektren aufgenommen und kombiniert. Diese Kombination korrigieren zwar schon viele Fehler, allerdings hat es dennoch einen Einfluß auf die Spektren.

3. *Unterschiedliche Setups*

Die Ergebnisse Forschungsarbeit[23] und meine Ergebnisse wurden teilweise nicht mit demselben Setup aufgenommen. Aufgrund dieser verschiedenen Setups und vor allem Auflösungen, sind meine Spektren ungenauer und unvollständiger, als die der Forscher. So kann man bei mir zum Beispiel im Spektrum von Barium vom 6 August 2017 einen Sternwind sehen, der auf meinen Aufnahmen von 2018 nicht zu erkennen ist. Die Referenzbarkeit R liegt im Paper bei 60000 und bei den Beobachtungen mit den BACHES Echelle Spektrographen bei 15000.

4. *Die Auswertung*

Bei der Auswertung können auch kleine Unterschiede entstehen, da man z.B.: das Normieren manuell machen muß. Um diesen Effekt zu demonstrieren, habe ich das selbe Spektrum zwei mal normiert und die beiden normierten Spektren mit verschiedenen Farben (siehe Abbildung) übereinander gelegt, so dass man den Unterschied feststellen kann. Eine Normierung ist hier grün und die andere blau dargestellt:

Abbildung 55: Fehler beim Normieren

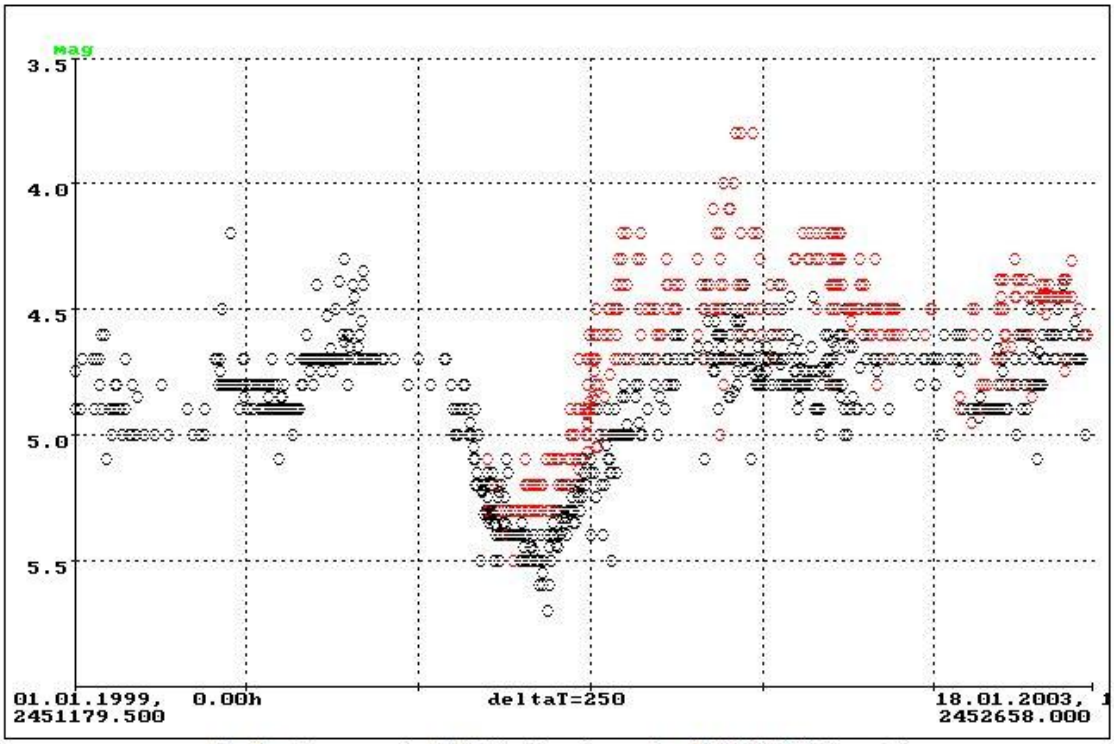
13. Ausblick

Mein Ziel ist es, in der Q2 die besondere Lernleistung in Astronomie zu machen und somit auch Astronomie als 5. Abiturfach zu wählen. Dabei möchte ich auch weiterhin an gelben Hyperriesen, bzw. rho Cas forschen.

Bei dem Vergleich meiner Arbeiten mit der aus den Skript (Changes in the optical spectrum of the hypergiant rho Cas due to a shell ejection in 2013) ist mir aufgefallen, dass sich zwei Faktoren stark verändert haben bei den Elementen. Zum einen ist bei jedem Element die

[23] arXiv:1808.00220v1 [astro-ph.SR] 1 Aug 2018

relative Intensität um ca. 0,2 gestiegen und zum anderen hat sich in meinen Forschungen im Vergleich zu denen aus Figur 6 eine der Barium Komponenten (Vr=-29) stark zurückgebildet. Meine Idee zu rho Cas ist es, noch neue Spektren von 2019 aufzunehmen und auszuwerten. Desweitern möchte ich die Pulsationen des Sternes mehr erforschen und rausfinden, woher diese kommen. Es ist sehr interessant, dass die Hülle des Sternes scheint, als hätte sie sich abgestoßen und sich teilweise wieder auf ihn zubewegt. Mein Ziel ist es, eine Erklärung zu diesem Phänomen zu finden. Zum anderen möchte ich auch mal eine Lichtkurve des Sternes aufnehmen und diese mit den Lichtkurven aus den BAV und VSNET Aufnahmen von 1999 [24]vergleichen, da der Stern starke Helligkeitsschwankungen aufwies und ich diese auch gerne weiter überprüfen möchte. Laut dieser Forschungsarbeit weist der Stern unregelmäßige Helligkeitsveränderungen in der Zeit von 320 Tagen. Diese unregelmäßigen Helligkeitsschwankungen in Verbindung mit den Pulsationen zu analysieren wäre somit mein nächstes Ziel, mit dem ich auch bei JugendForscht teilnehmen möchte.



Beobachtungen der BAV (rot) und aus dem VSNET (schwarz)

Abbildung 56: Die Lichtkurve von Rho Cas 1999

14. Danksagung

Ich bedanke mich bei allen, die es ermöglicht haben, die Sternwarte für Schülerinnen und Schüler anzufertigen, damit diese die Möglichkeit haben, an Ihren Fragen zu forschen und sich selber Fragen beantworten können. Desweiteren gibt die Sternwarte und die Projektarbeiten, die man schreibt, schon mal wichtige Erfahrungen für die Zukunft, wenn man im MINT-Bereich forschen möchte und trägt somit auch zur Selbstfindung bei.
Ein ganz großes Dankeschön geht an den Kursleiter Herr Bernd Koch. Er hat mich jederzeit bei meiner Arbeit unterstützt und das nötige Wissen vermittelt.

[24] https://bav-astro.eu/eruptive/sterne/casrho.html
ABB 54:https://bav-astro.eu/eruptive/sterne/casrho.html

15. Eigenständigkeitserklärung und Unterschrift

Hiermit versichere ich, Louisa Hofmann, dass die Projektarbeit nur von mir, mit Hilfe der angegeben Text-und Bildquellen erstellt wurde und ebenfalls Zitate angegeben wurden.

_____ _____

Ort, Datum *Louisa Hofmann*

16. Verwendete Programme

- MaxIm DL
- BASS
- MIDAS
- PWI 2.2.2
- SpecTrack
- Dimension 4
- LaTex Formeleditor
- Stellarium
- 10Micron Keypad
- Microsoft Office Excel
- Microsoft Office Word

17. Quellen

https://de.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetische_Welle
https://de.wikipedia.org/wiki/Strahlungsdruck
https://de.wikipedia.org/wiki/Strahlungsdruck
https://de.wikipedia.org/wiki/Licht,
Kursmaterisalen vom Physik LK und BeSt Spektroskopie Kurs von Michael Winkhaus
https://de.wikipedia.org/wiki/Welle-Teilchen-Dualismus,
https://de.wikipedia.org/wiki/Spektroskopie
https://www.spektrum.de/lexikon/physik/spektroskopie/13557
https://de.wikipedia.org/wiki/Doppler-Effekt
https://www.leifiphysik.de/akustik/akustische-wellen/doppler-effekt
http://www.leibniz-kis.de/fileadmin/user_upload/forschung/publikationen/staatsexamen/Loehner-Boettcher.pdf
https://de.wikipedia.org/wiki/P-Cygni-Profil
https://de.wikipedia.org/wiki/Pulsationsver%C3%A4nderlicher_Stern
https://de.wikipedia.org/wiki/Hertzsprung-Russell-Diagramm
https://de.wikipedia.org/wiki/Gelber_Hyperriese
https://www.scinexx.de/news/kosmos/astronomen-entdecken-groessten-gelben-stern/
https://de.wikipedia.org/wiki/Rho_Cassiopeiae
https://bav-astro.eu/eruptive/sterne/casrho.html

https://abenteuer-universum.de/stersterne/supernova.html,
Monitoring of the Yellow Hypergiant Rho Cas: Results of the High-Resolution Spectroscopy During 2007 - 2011
V.G. Klochkova (SAO RAS, Nizhnij Arkhyz, Russia)
https://de.wikipedia.org/wiki/IRC%2B10420
arXiv:1808.00220v1 [astro-ph.SR] 1 Aug 2018
https://www.baader-planetarium.com/de/blog/cdk-optisches-design/
https://www.baader-planetarium.com/de/blog/cdk-optisches-design/
https://de.wikipedia.org/wiki/Ritchey-Chr%C3%A9tien-Cassegrain-Teleskop
https://10micron.de/en/products/zubehoer/allgemeines_zubehoer/10micron-professionelle-4-zeilen-stand-alone-handsteuerung/
http://www.10micron.eu/en/product/gm4000-hps-ii/
https://www.baader-planetarium.com/de/spektroskopie/baches-echelle-spektrograf/baches-echelle-spektrograf.html
https://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html
https://bav-astro.eu/eruptive/sterne/casrho.html
https://www.scinexx.de/news/kosmos/astronomen-entdecken-groessten-gelben-stern/