

Spektroskopie der Sonne



1. Grundlagen

A) Zusammenfassung

Die Sonne ist, als der uns am nächsten stehenden Fixstern, am besten erforscht. Bereits Joseph von Fraunhofer entdeckte die nach ihm benannten Absorptionslinien im Spektrum unseres Zentralgestirns. Mit der spektroskopischen Untersuchung der Sonne konnte ihre chemische Zusammensetzung genau erforscht werden, was z.B. die Entdeckung des Heliums zur Folge hatte. Zudem zeigte der Vergleich des Sonnenspektrums mit Spektren der Sterne des Nachthimmels, dass diese heiße leuchtende Sonnen sind, die in großer Entfernung zur Erde stehen. Die Spektroskopie der Sterne führte zur Entdeckung der Hauptreihe im Hertzsprung-Russel-Diagramm und ermöglichte schließlich die genaue Klassifikation der Sterne, z.B. als Zwerg- oder Riesensterne.

CCD-Detektoren kommen heute bei der astronomischen Beobachtung und Spektroskopie im Optischen an allen Observatorien der Welt zum Einsatz. Die Charakterisierung der Eigenschaften dieser Detektoren sowie die Auswertung der mit ihnen gewonnenen Daten zählen zu den wichtigsten Grundkenntnissen in der heutigen astronomischen Forschungsarbeit. Wegen ihrer hohen Quanteneffizienz ermöglichen diese Detektoren die Beobachtung extrem leuchtschwacher Himmelskörper und liefern in Kombination mit einem Spektrographen präzise Informationen über die spektralen Eigenschaften der untersuchten Objekte.

B) Lernziele und Methoden

- Kennenlernen der wesentlichen Eigenschaften von CCD-Detektoren
- Erlernen der Grundlagen zur Bearbeitung und Analyse von CCD-Daten
- Kennenlernen der grundlegendsten Eigenschaften eines Spaltspektrographen
- Erlernen der Grundlagen zur Kalibration von Spektren (z.B. Wellenlängenkalibration)
- Aufnahme und Analyse des Sonnenspektrums

Beachten Sie auch die Fragen zum Versuch unter Kapitel 5.

C) Literatur:

1. Hanslmeier A.: *Einführung in Astronomie und Astrophysik*, Kap. 4.3, 4.5, 8
2. Howell S. B.: *Handbook of CCD Astronomy*, Kap. 2, 3, 6
3. Kaler J. B.: *Sterne und ihre Spektren*, Kap. 2, 3, 6
4. Tipler P. A.: *Physik*, Kap. 30.2, 33.1, 33.4-11, 38.3
5. Unsöld A. & Baschek B.: *Der neue Kosmos*, Kap. 5.1.4, 5.1.5, 6.1, 6.4, 7.1
6. Vogel H.: *Gerthsen Physik*, Kap. 9.2.8-9, 10.1.1-6, 12.2.1-2, 12.3.1-5, 12.4, 14.4
7. Weigert A. & Wendker H. J.: *Astronomie und Astrophysik*, Kap. 3.1, 5.3, 5.4
8. Demtröder W.: *Experimentalphysik 3*, Kap. 9.5, 9.6

2. Aufgabenstellung

MA1: Charakterisierung des CCD-Detektors

MA1.1 Messen Sie das Ausleserauschen des CCD-Detektors anhand von Bias-Aufnahmen.

MA1.2 Bestimmen Sie den Dunkelstrom des CCD-Detektors bei verschiedenen Detektortemperaturen mit Hilfe von Dunkelbildern mit fester Belichtungszeit. Bestimmen Sie aus der Temperaturabhängigkeit die Bandlückenenergie des Halbleitermaterials der CCD.

MA1.3 Überprüfen Sie die Linearität des CCD-Detektors.

MA2: Bestimmung der Eigenschaften des Spaltspektrographen

MA2.1 Führen Sie zum Kennenlernen des Spaltspektrographen einige Beobachtungen mit visueller Beobachtung aus (Spektrallampen, Tageslichtspektrum), sehen Sie sich die verschiedenen Spalte und verschiedenen Ordnungen des Spektrographen an.

MA2.2 Befestigen Sie die CCD am Spaltspektrographen, justieren und fokussieren Sie CCD und Kamera. Benutzen Sie dazu die Linien der Neon-Glimmlampe. Kalibrieren Sie dann den Spektrographen mit Hilfe der Neon-Glimmlampe. Tragen Sie die Wellenlängen über die zugehörigen Pixelkoordinaten der Spektrallinien auf. Fitten Sie eine Kalibrierungskurve an und bestimmen Sie damit die Dispersion des Spektrographen in Angstrom/Pixel. Vermessen Sie die Halbwertsbreiten der einzelnen Ne-Linien, um so das mit den drei Spalten erreichte spektrale Auflösungsvermögen des Spektrographen in Abhängigkeit von der Wellenlänge zu ermitteln.

MA3: Spektrale Messungen

MA3.1 Nehmen Sie ein Sonnenspektrum in einem Wellenlängenbereich auf und korrigieren Sie das Bild mit entsprechenden Dunkel- und Flatfield-Bildern.

MA3.2 Nehmen Sie im selben Spektralbereich ein Spektrum der Ne- Glimmlampe bzw. Hg-Cd-Spektrallampe auf und kalibrieren Sie damit Ihr Sonnenspektrum. Identifizieren Sie die detektierten Fraunhofer-Linien in dem von Ihnen aufgenommenen Sonnenspektrum.

MA3.3 Wiederholen Sie MA3.1 und 3.2 mit höherer spektraler Auflösung (900 Linien/mm-Reflexionsgitter) in ausgewählten Spektralbereichen. Bestimmen Sie die Dispersion wie auch das Auflösungsvermögen, das mit diesem Gitter und allen Spalten erreicht wird.

MA3.4 Nehmen Sie ein Jodabsorptionsspektrum (Bandenspektrum) auf und interpretieren Sie es mit Hilfe der Schwingungs- und Rotationskonstanten (Lit. Demtröder 3, Kap. 9). Können die O₂-Fraunhoferlinien (a,B,A) zu einem Bandenspektrum gehören?

Die Aufgabenstellung und der Versuchsablauf können vom Betreuer verändert werden.

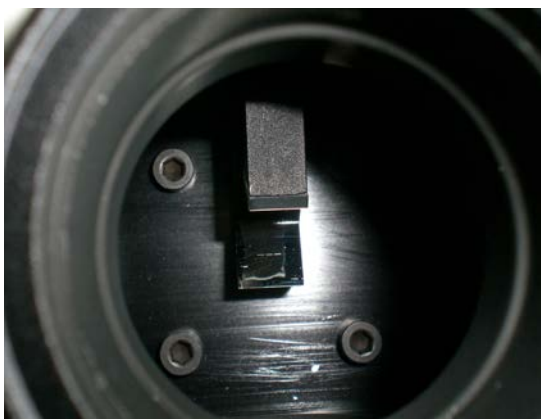
3. Experimentelles

Vorhandene Geräte:

- CCD-Kamera mit 765x510 Pixel (CCD: KAF-0402ME mit $9\mu\text{m} \times 9\mu\text{m}$ Pixeln) mit integrierter regulierbarer Peltier-Kühlung (max. -30°C unter Umgebungstemperatur)
- Software zur Steuerung der CCD-Kamera, Bildaufnahme und Analyse der gewonnenen CCD-Daten
- Spaltspektrograph mit zwei wechselbaren Reflexionsgittern für zwei verschiedene Dispersionen (Gitter 1: 200 Linien/mm, Gitter 2: 900 Linien/mm)
- Ne-Glimmlampe und Hg-Cd-Spektrallampe zur Wellenlängenkalibration der aufgenommenen Spektren



Foto des DADOS-Gitterspektrographen mit angebauter SBIG ST-402ME CCD. Unten die Eintrittsöffnung für den Lichteinfall mit den drei unterschiedlich breiten Spalten (Großaufnahme unten), links am Gittergehäuse die Verstellschraube für das Gitter (ebenfalls unten), vor der CCD Fokussierungsring (breiter schwarzer Ring direkt neben Gittergehäuse). Das Handbuch des Spektrographen liegt am Platz aus.



4. Hinweise zur Versuchsdurchführung und Auswertung

zu MA1.1 Messung des Ausleserauschoens

- dieses kann anhand von Bias-Bildern bestimmt werden - Temperatur-unabhängig!
- hierzu muss ein Referenzbild aufgenommen werden, in dem das Ausleserauschoen minimiert ist, dies geschieht durch Mittelung einer großen Anzahl von Bias-Aufnahmen (>100) – Reihenaufnahme (Sequence) nutzen, sowie „Combine“-Befehl unter „Process“
- von den einzelnen Bias-Aufnahmen kann dieses Referenzbild abgezogen werden („Process“- „Pixel math“-“Subtract“), wodurch ein Rauschbild erhalten wird. Dieses sollte statistisch Null counts enthalten (Informationsfenster), die Standardabweichung beschreibt das Ausleserauschoen.
- Die Zahl der Counts kann mit Hilfe des im FITS-Header angegebenen Konversionsfaktors (Gain) in eine Anzahl von Elektronen überführt werden.

zu MA1.2 Messung der Temperaturabhängigkeit des Dunkelstroms

Die Studierenden lernen, dass der Dunkelstrom mit der Temperatur exponentiell ansteigt, was sie mit ihren Kenntnissen aus der Festkörperphysik erklären können. Zudem wird im Experiment deutlich (Betrachtung der Dunkelbilder, wie auch quantitative Messung des Dunkelstroms in den CCD-Aufnahmen) wie wichtig die Kühlung von CCD-Detektoren ist .

- hierzu wird die CCD zunächst auf eine stabile tiefe Temperatur abgekühlt (Kühler sollte dabei nicht dauerhaft mit 100% laufen), diese wird dann für die weiteren Messungen schrittweise erhöht
- es werden Dunkelbilder mit langen Belichtungszeiten (mehrere Minuten, Achtung: „New buffer“ auswählen) aufgenommen, von diesen wird jeweils eine Bias-Aufnahme subtrahiert, die gleich im Anschluss an jedes Dunkelbild aufgenommen wurde , evtl. auch die gemittelte aus dem vorigen Versuchsteil (Frage: was wäre der Vor- bzw. Nachteil)
- die korrigierten Dunkelbilder werden hinsichtlich der mittleren Counts ausgewertet (Informationsfenster – Frage: Unterschied Median – Average?). Dabei ist darauf zu achten, ob die erhaltenen Werte signifikant sind (Standardabweichung!), falls nicht, muss länger gemessen werden
- anhand von durch Höhenstrahlung verursachten hellen Stellen im Bild können die Möglichkeiten des Programms zur Aperturphotometrie demonstriert werden

zu MA1.3 Überprüfung der Linearität

Die Studierenden lernen die wichtige Eigenschaft der „Linearität“ von CCD-Detektoren kennen, die eine präzise Messung von Helligkeiten über einen weiten dynamischen Bereich hinweg ermöglicht. Zudem erfahren sie wie sich ein CCD an der Grenze bzw. außerhalb seines dynamischen Bereichs verhält.

- Mehrere Bilder einer beleuchteten Fläche werden mit unterschiedlichen Belichtungszeiten aufgenommen. Dabei sollte die Empfindlichkeit der CCD mit Hilfe eines Grau-Filters reduziert werden.

- Aus der gemessenen Intensität und der bekannten Belichtungszeit kann die Linearitätskurve des CCD-Detektors bestimmt werden.

zu MA2 Eigenschaften des Spaltspektrographen

- Nachdem die CCD-Kamera am Spaltspektrographen installiert wurde, muss der Spektrograph mittels mehrerer CCD-Aufnahmen genau fokussiert werden. Dabei kann z.B. der Spalt des Spektrographen in 0.Ordnung beobachtet werden.
- Nach erfolgreicher Fokussierung muss die CCD-Kamera noch so gedreht werden, dass die Spaltrichtung genau senkrecht zur Dispersionsrichtung liegt.
- Das aufgenommene Spektrum der Ne-Glimmlampe wird graphisch am PC dargestellt. Mit einem Linienkatalog, der am Arbeitsplatz ausliegt (s.a. Anhang A1), soll dann zunächst grob der Wellenlängenbereich ermittelt werden, der mit dem Spektrographen aktuell erfasst wird.
- Mittels des Linienkatalogs können dann die Dispersion des Spektrographen sowie das mit den drei Spalten jeweils erreichte spektrale Auflösungsvermögen in Abhängigkeit von der Wellenlänge bestimmt werden. Dazu werden die exakten Positionen und Halbwertsbreiten der einzelnen Ne-Linien vermessen.

zu MA3 Aufnahme und Analyse des Sonnenspektrums mit zwei verschiedenen spektralen Auflösungen.

- Die Studenten nehmen ein Spektrum des Sonnenlichts (z.B. durch die Fensterscheibe am Arbeitsplatz hindurch) auf. Daran anschließend werden Dunkelbilder, sowie Flatfield-Bilder (Kalibration der unterschiedlichen Pixelempfindlichkeit) aufgenommen. Die Studenten bearbeiten dann mit diesen Kalibrationsdaten das aufgenommene Sonnenspektrum. Dabei lernen Sie alle wichtigen grundlegenden Bearbeitungsschritte, die bei der Auswertung von Spektren in der heutigen astronomischen Forschung angewandt werden.
- Im Anschluss wird zur Wellenlängenkalibration des Sonnenspektrums ein Spektrum der Ne- Glimmlampe bzw. Hg-Cd-Spektrallampe (s. Anhang A2) aufgenommen. Für die Kalibration werden die Linienkoordinaten (in Pixeln) z.B. mit dem Programm VSPEC bestimmt (siehe Anhang A4) und mit Origin über den Wellenlängendaten geplottet, woraus die Dispersion und die Anfangswellenlänge des Spektrums bestimmt werden.
- Die Kalibration erfolgt durch Setzen der Parameter CRVAL (die bestimmte Startwellenlänge in Angstrom) und CDELTA1 (ermittelte Dispersion in Angstrom/Pixel) im Fits-Header (siehe Anhang A4).
- Nach erfolgreicher Datenbearbeitung, wechseln die Studenten das Reflexionsgitter im Spektrographen. Dann wird ein weiteres Sonnenspektrum bei höherer spektraler Auflösung aufgenommen. Die Kalibration dieser Daten erfolgt analog wie dies vorher beschrieben wurde.
- Im Anschluss werden nun die aufgenommen und kalibrierten Sonnenspektren von den Studenten analysiert. Mittels einer Linienliste, die am Arbeitsplatz ausliegt, können alle detektierten Fraunhofer-Linien in den Spektren identifiziert werden. Hierzu kann das Programm DS9 (s. Anhang A5) benutzt werden. Die Studenten sollen die genauen Wellenlängen wie auch Halbwertsbreiten dieser Linien bestimmen (s. Anhang A6). Dabei lernen sie die wichtigsten und bekanntesten Fraunhoferlinien (z.B. die H α - oder

die Na-D Linien) kennen. Zudem finden sie Absorptionslinien, die durch Absorption in der Erdatmosphäre entstehen. Der Effekt der spektralen Auflösung wird mit den aufgenommenen Sonnenspektren anschaulich illustriert (siehe Abbildungen 1 & 2).

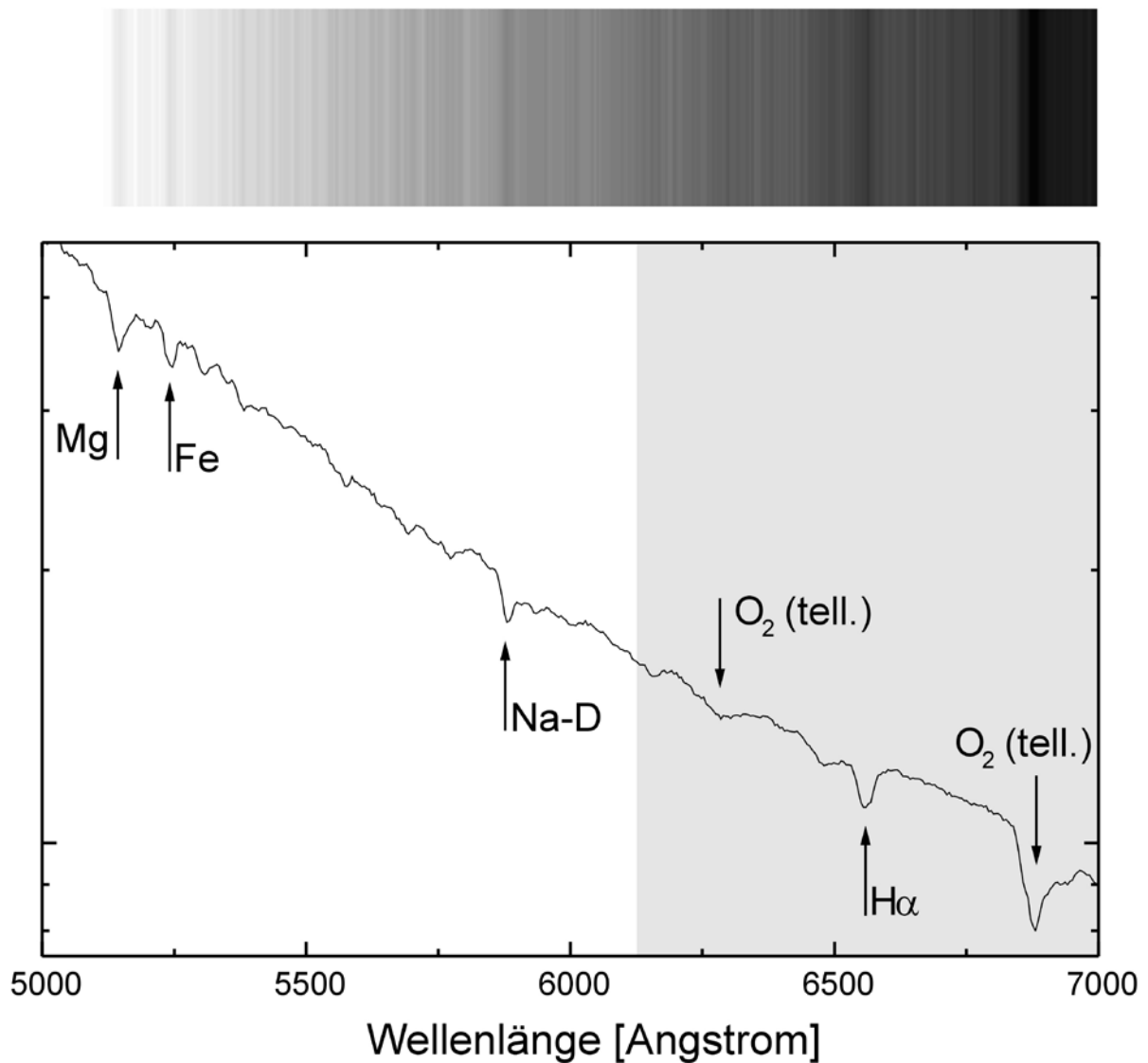


Abbildung 1: Die obere Abbildung zeigt das in Aufgabe MA3.2 bei niedriger spektraler Auflösung (Gitter 1) aufgenommen Sonnenspektrum. Die Auswertung des Spektrums am PC ist in der unteren Abbildung zu erkennen. Die prominentesten der vielen detektierten Fraunhofer-Linien Mg, Fe, Na-D und H α , wie auch Linien, die durch Absorption in der Erdatmosphäre (O₂) hervorgerufen werden, sind mit schwarzen Pfeilen markiert. Der spektrale Bereich der grau eingefärbt ist wird dann bei höherer spektraler Auflösung (Gitter 2) genauer untersucht (siehe Abbildung 2).

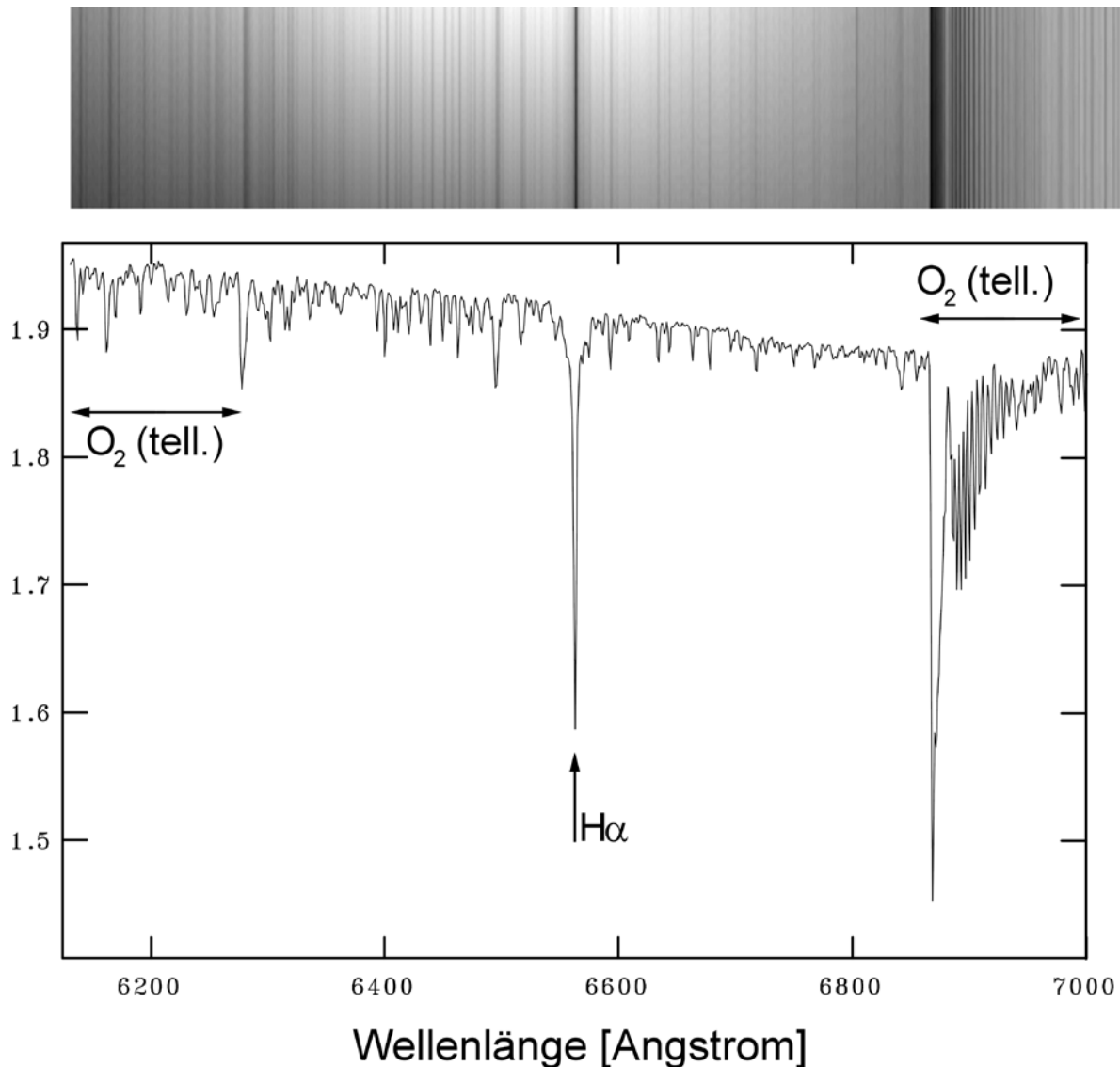


Abbildung 2: Das in Aufgabe 5 mit höherer spektraler Auflösung aufgenommene Sonnenspektrum ist in der oberen Abbildung dargestellt. Die untere Abbildung zeigt die Auswertung dieses Spektrums am PC. Der Effekt der spektralen Auflösung ist beim Vergleich mit Abbildung 5 deutlich zu erkennen. Die $H\alpha$ -Linie ist nun deutlich aufgelöst und es können viele weitere Linien rechts und links neben der $H\alpha$ -Linie detektiert werden, die im niedriger aufgelösten Sonnenspektrum aus Abbildung 5 noch nicht zu erkennen sind. Auch die Absorptionsbanden, erzeugt durch O_2 in der Erdatmosphäre, können nun aufgelöst werden. Es wird die charakteristische Form dieser Absorptionsbanden mit ihrem tiefen Bandkopf, an ihrem kurzwelligen Ende, und den, zu längeren Wellenlängen hin, dann rasch abfallenden Linientiefen deutlich.

5. Fragen zur Vorbereitung

Schwerpunkte:

a) Grundlagen:

- Aufbau Sonne, Oberflächentemperatur, Spektralklasse
- Fraunhoferlinien der Sonnenatmosphäre, Entstehungsort
- Moleküllinien der Erdatmosphäre, Unterschiede zu Linien von Atomen

b) Experimentelles:

- CCD, Aufbau und Funktionsweise
- Dunkelstrom, Ursache und Bedeutung
- Nutzen von Flatfieldaufnahmen
- Gitterspektrograph, Aufbau, Einfluss der Spaltbreite

Weitere Fragen:

- AV1:** Informieren Sie sich über die Bedeutung der Spektroskopie für die Astronomie? Welche astronomischen Entdeckungen waren mit Spektroskopie überhaupt erst möglich?
- AV2:** Wiederholen Sie den grundsätzlichen Aufbau eines Gitterspektroskops bzw. Gitterspektrographen.
- AV3:** Wie berechnet sich allgemein das spektrale Auflösungsvermögen eines Gitterspektrographen? Durch welche Effekte ist es bestimmt? Verdeutlichen Sie sich die Herleitung der entsprechenden Formeln!
- AV4:** Informieren Sie sich über den inneren Aufbau von CCD-Detektoren sowie deren Kenngrößen wie Biaslevel, Dunkelstrom und Linearität. Welche Vorteile bietet der Einsatz moderner CCD-Detektoren?
- AV5:** Wichtig für den Einsatz von Optik, wie Linsen, Prismen, Gitter etc. ist deren Absorptionsverhalten bzw. ihr Reflexionsvermögen in Abhängigkeit von der Wellenlänge. Informieren Sie sich über die Durchlässigkeit bzw. die Reflexivität verschiedener Stoffe. Warum kommen in modernen Spektrographen nur noch Reflexionsgitter zum Einsatz?
- AV6:** Leiten Sie aus dem Bohrschen Atommodell eine Gleichung her, mit der man die Wellenlängen der einzelnen Linien des Wasserstoffs berechnen kann. Berechnen Sie damit die Wellenlängen der H α - H β - und H γ -Linie des Wasserstoffs.
- AV7:** Beschreiben Sie genau wie die dunklen Absorptionslinien (Fraunhofer-Linien) im Spektrum der Sonne entstehen. Zeichnen Sie qualitativ die komplette Balmer-Serie wie sie im Sonnenspektrum zu beobachten ist.

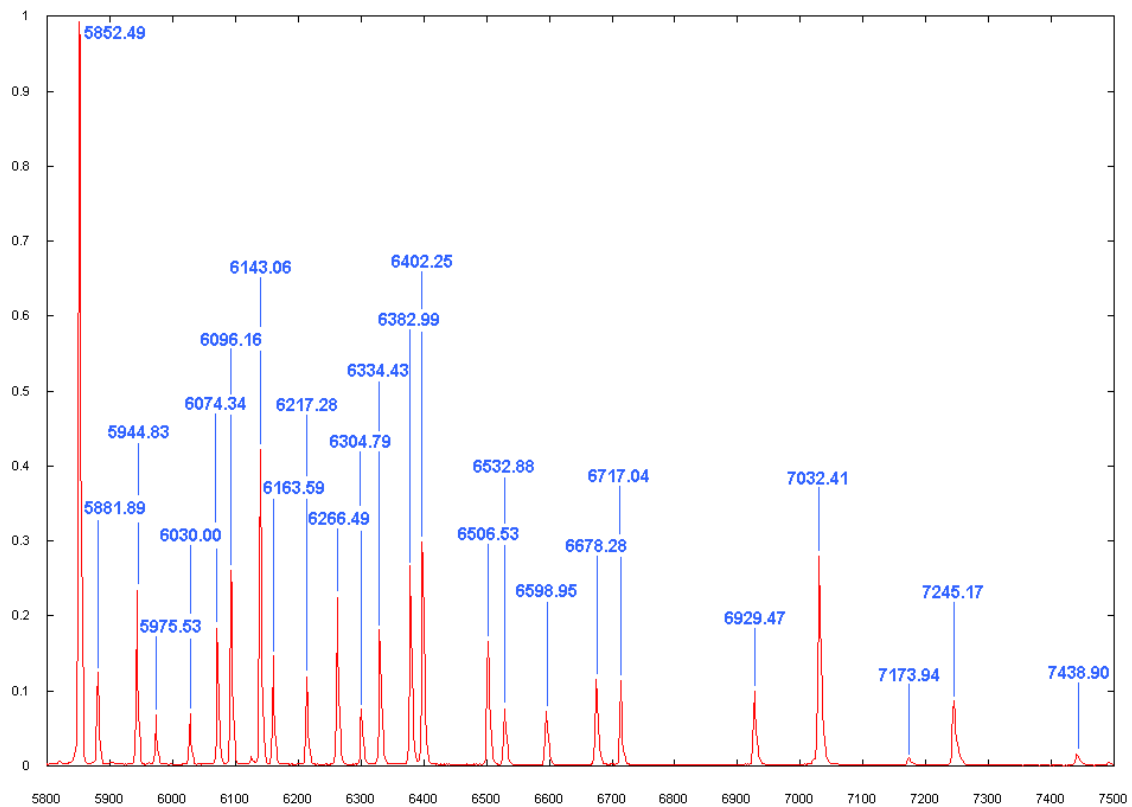
AV8: Obwohl die Sonne fast nur aus heißem Wasserstoff und Helium besteht, kann das Sonnenspektrum im optischen gut durch das Spektrum eines schwarzen Strahlers angenähert werden. Wie entsteht die Schwarzkörperstrahlung der Sonne?

AV9: Informieren Sie sich über

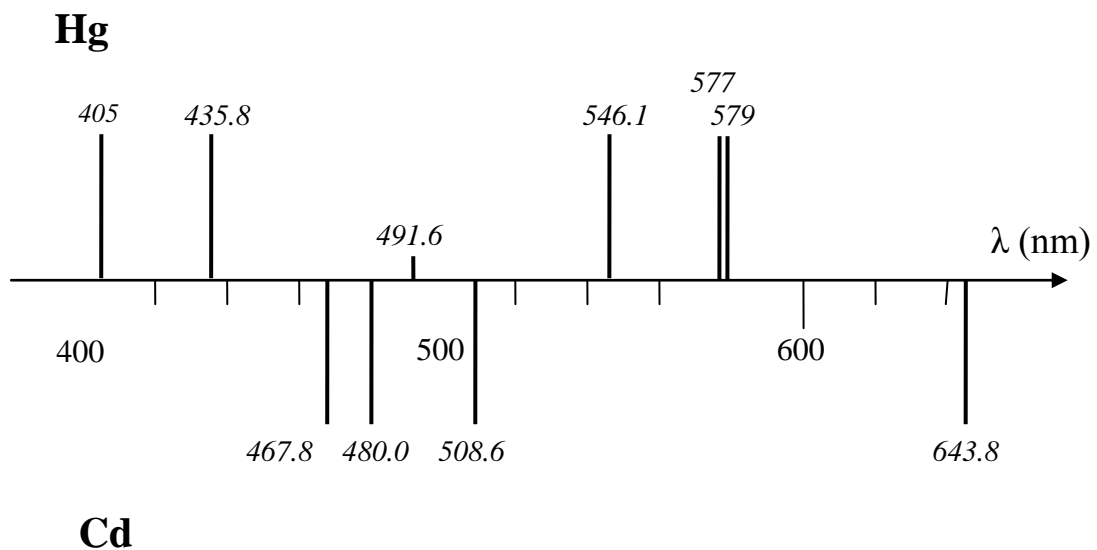
- die Plancksche Strahlungsformel und deren Näherungen
- das Wiensche Verschiebungsgesetz
- das Stefan-Boltzmannsche Gesetz

Anhang

A1 Spektrum der Neon-Glimmlampe



A2 Spektrum der Hg-Cd-Entladungslampe



A3 Hinweise zur Benutzung des Programms MaxIm DL

Fenster: CCD Control Window

Flag: Setup,

Einstellungen: SBIG Universal, ST-402, Swap Chips: No, Guide Chip: Internal,
External Trigger: Off

Funktionen

- Connect/Disconnect
- Cooler On/Cooler Off
- Cooler (in Main CCD Window): Setpoint für Chiptemperatur, max. 30 Grad unter Raumtemperatur erreichbar, Kühler sollte nicht dauerhaft mit 100% laufen

Flag: Settings,

Einstellungen:

- Subframe (Auswahl eines Bereiches auf der CCD)
- Binning (Zusammenfassung von Punkten auf der CCD – On-Chip oder Off-Chip möglich (Achtung: Read-Noise vervielfacht bei Off-Chip)
- Auto-Calibration (none wählen)
- Options: Camera Settings (Binning)

Flag: Expose,

Auswahl:

- Light, Bias, Dark, Flat (Achtung: Auto-Kalibration unter Settings auf none)
- Exposure time, delay
- Check Box: New Buffer (sonst wird überschrieben)

Flag: Focus (kontinuierliche Aufnahme, komprimierte Einstellungen,),

Auswahl:

- continuous
- Dark (Dunkelkorrektur)
- Fast (schneller readout - geringere bit-Tiefe)

Fenster: CCD Image

Fenster: Information

Mode: - Aperture für Photometrie hier zu verwenden

- Region (einfacher als Aperture nicht zu verwenden)
- Area (einfacher als Aperture nicht zu verwenden)
- Astrometric (für Astrometrie nicht zu verwenden)

Angaben: - Pixelposition (Räumliche Kalibrierung mgl.)

- Pixelhelligkeit
- Maximum, Minimum, Average, Median, Standardabweichung im Aperturkreis (innerer Kreis)
- Intensität, Magnitude, Signal-Rausch-Verhältnis für Objekte in der Apertur relativ zur Helligkeit im Annulus (äußerer Ring) (Magnitudenkalibrierung auf vorgeg. Intensität und Exposuretime mgl.)

Einstellung der Apertur – Mausklick rechts: Radiusangabe Apertur, Gap, Annulus

Fenster: Screen Stretch

Auswahl des Helligkeitsbereichs zur Darstellung im Image window

Vordefiniert: Low, Medium, High (resolution – siehe settings)

Fenster: Line Profile

Mode u.a.: - Line

- Horizontal Line

- Horizontal Box (Anzeige Mittelwert, Min, Max, Standardabweichung)

File Format: *.fits

Lesbar mit MaxImDL, DS9

Fits Header lesbar und editierbar mit MaxImDL (Ctrl+F)

Fits Header lesbar auch mit DS9 (File → Display Fits Header)

A4 Kalibration der aufgenommenen Sonnenspektren mit „VSPEC“

a. Extraktion der Spektren

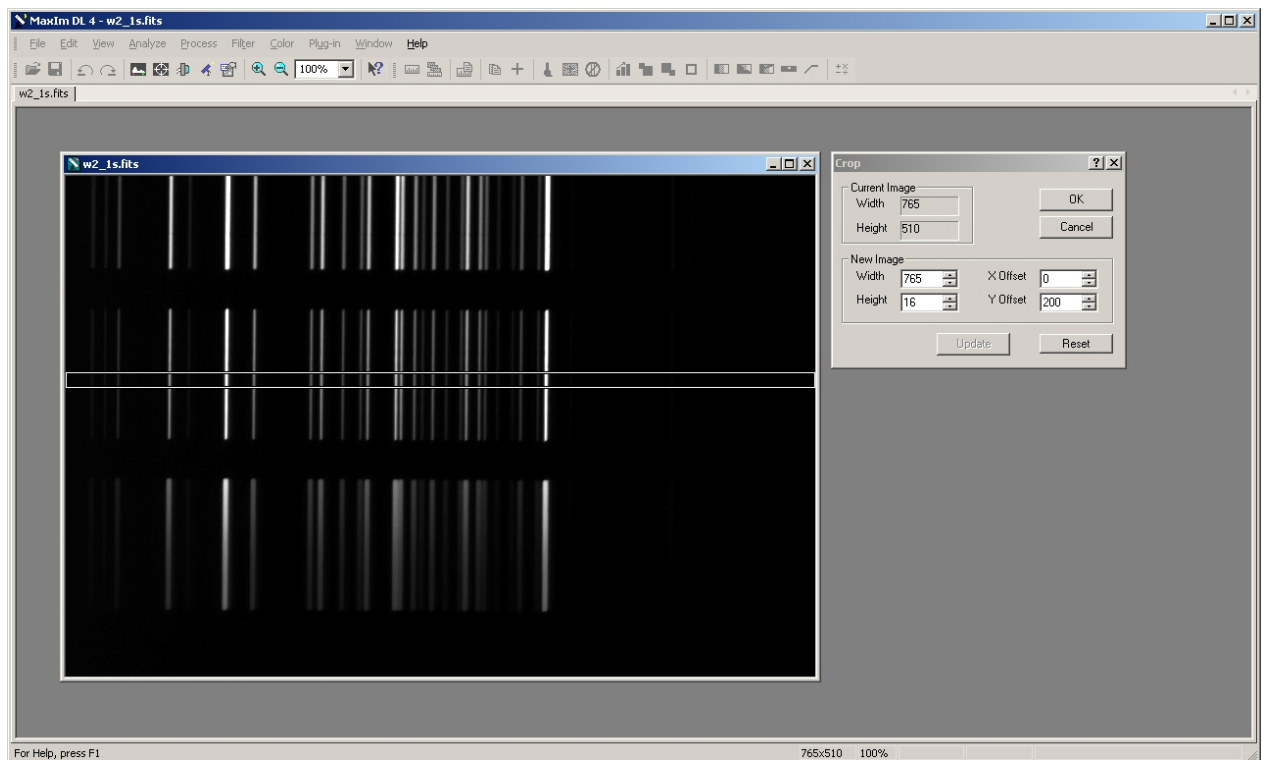
Zunächst die aufgenommenen Bilder in MaxImDL laden z.B. spec.fits (Sonnenspektrum) und cal.fits (Kalibrationsspektrum).

- In MaxImDL Spektren aus Bildern mit „Crop“ extrahieren, dabei immer den gleichen Bildausschnitt für Sonnenspektren und Kalibrationsspektren wählen

Höhe: 16 Pixel

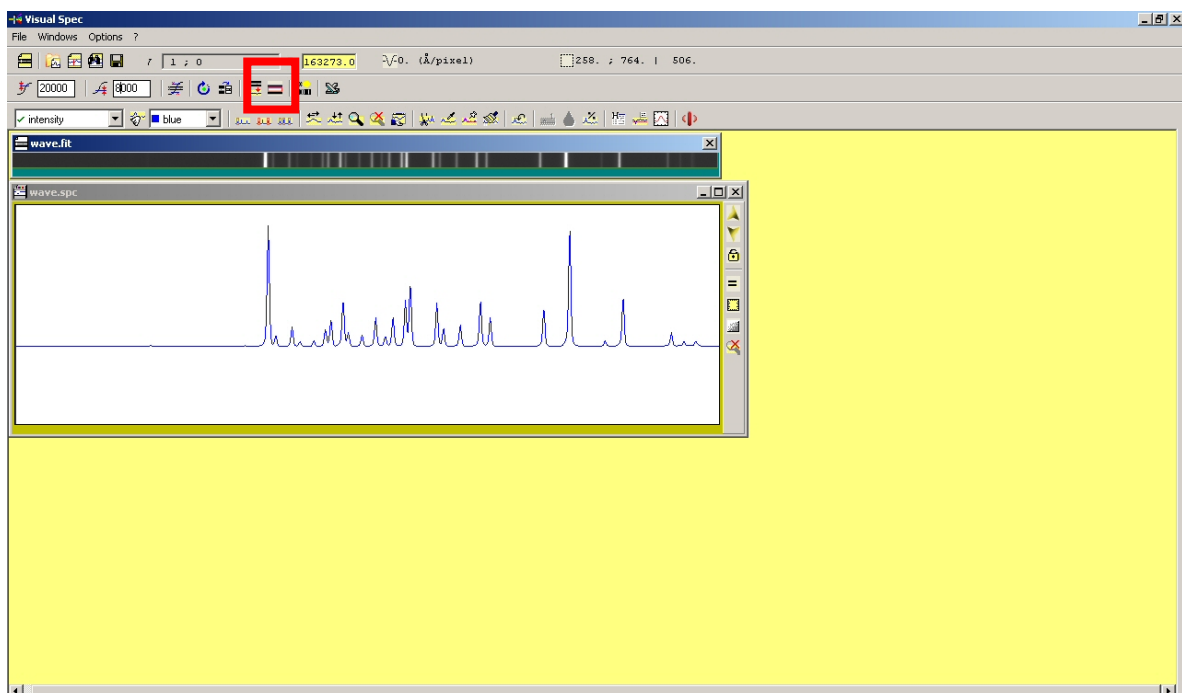
Breite: 765 Pixel

- Extrahierte Spektren unter neuem Namen (z.B. cal_ext.fits) abspeichern

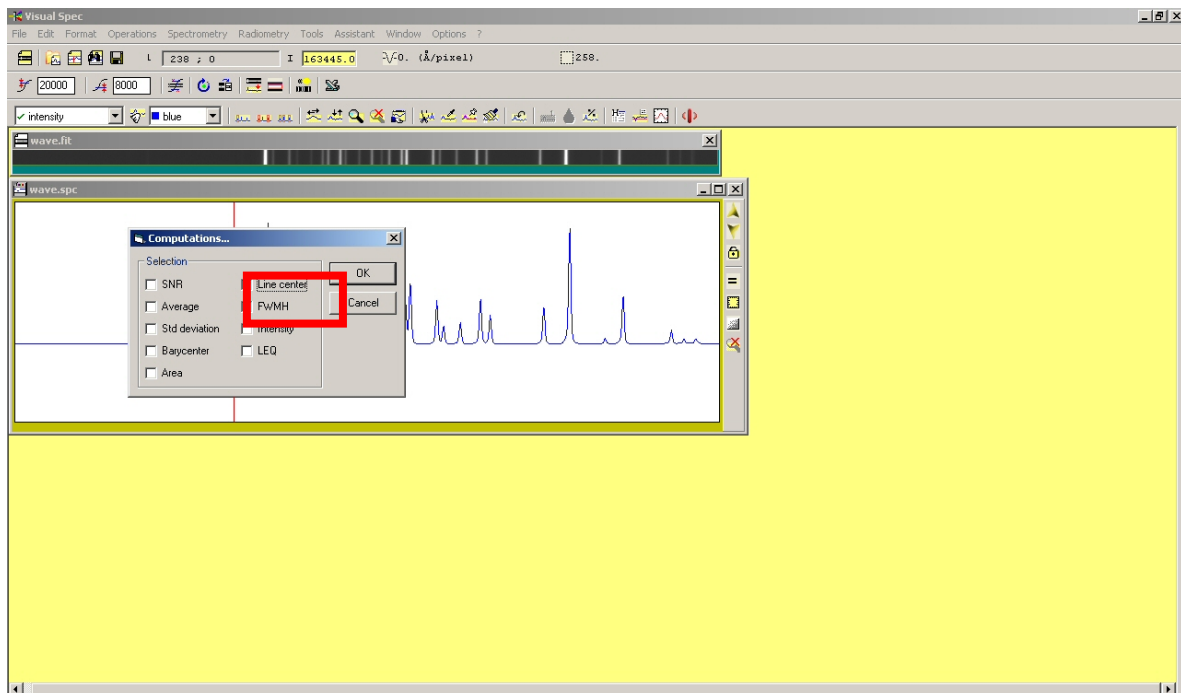


b. Bestimmen der Linienpositionen mit „VSPEC“

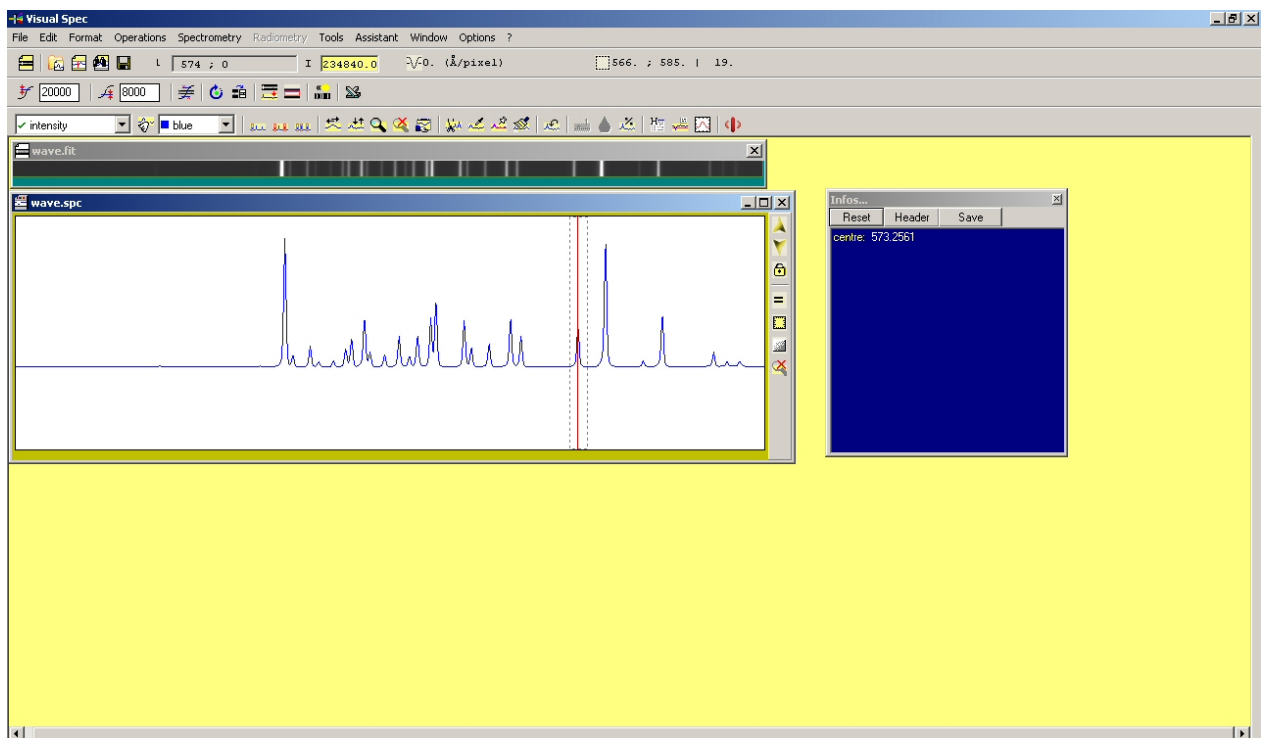
- Einlesen des Kalibrationsspektrums
- Profil extrahieren mit "Object binning"



- Rechte Maustaste drücken und „computation“ auswählen
- Auswahl von "Line center"

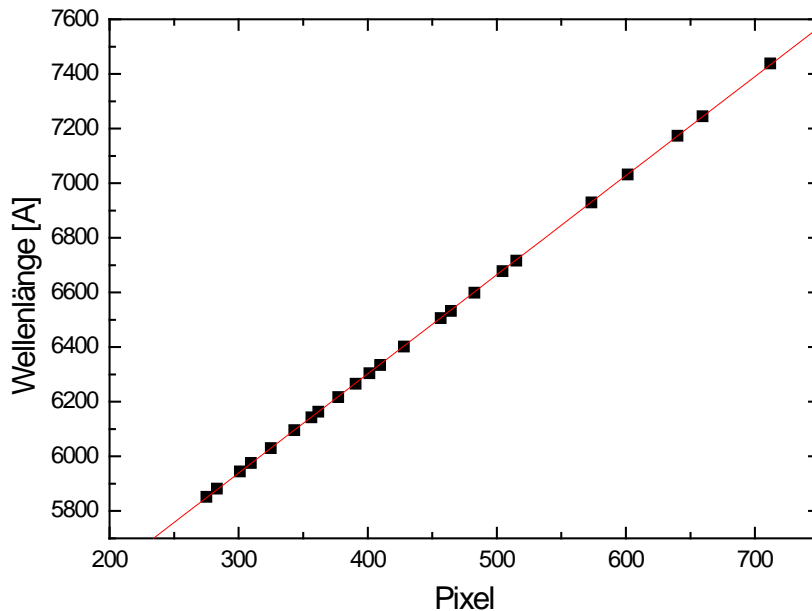


- Auswahl der Linien durch überziehen mit Cursor bei gedrückter linken Maustaste
- Rechte Maustaste drücken und „Computation“ auswählen
- Gemessenes Linienzentrum erscheint im Fenster „Infos“
- Linienpositionen sowie zugehörige Wellenlängenwerte aufschreiben



c. Kalibration mit ORIGIN und MaxImDL

- Mit Origin Werte plotten (x: Pixel-Position, y: Wellenlänge) und Gerade fitten
→ Bestimmung der Dispersion (CDEL1) in Angstrom/Pixel und der Startwellenlänge (CRVAL1) in Angstrom jeweils mit Fitfehler



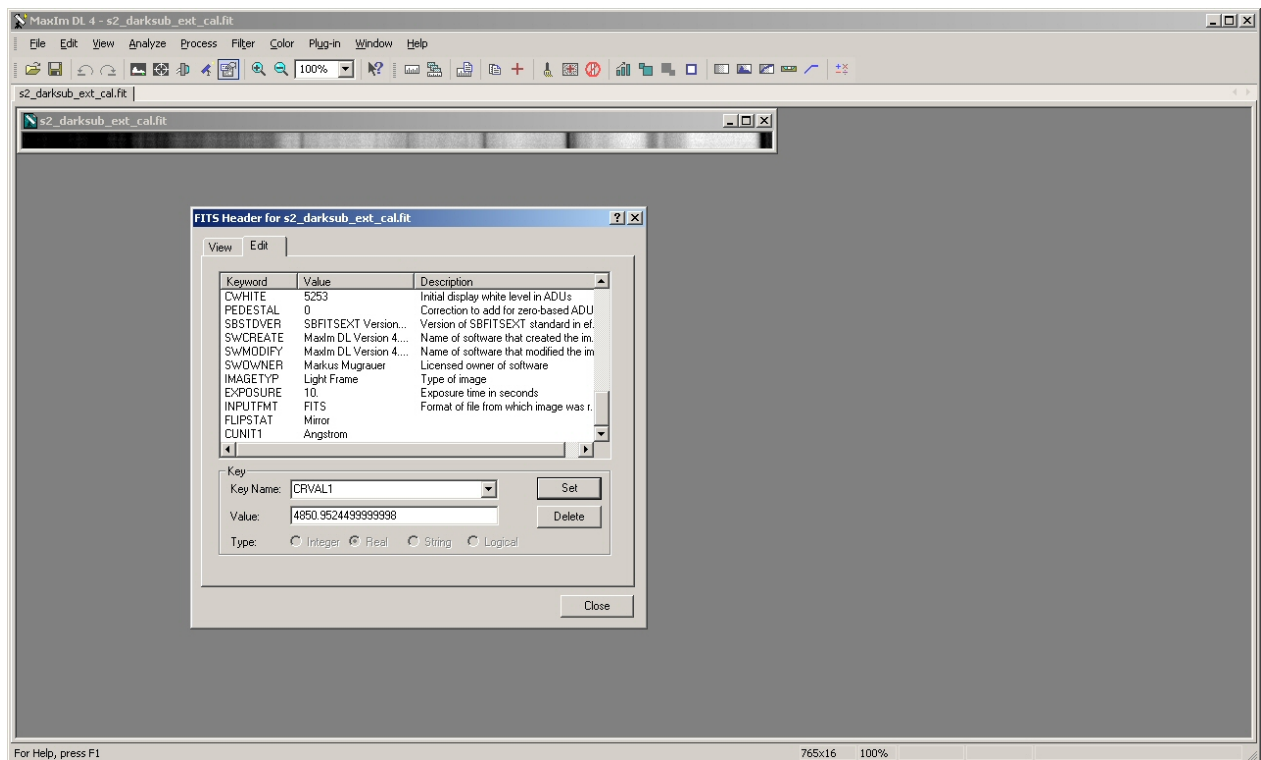
Die Zuordnung der Kalibration zum Sonnenspektrum wird mit MaxImDL durchgeführt

- Entsprechendes Spektrum laden und im „Fits Header Window“ (Ctrl+F) unter „Edit“ folgende Keywords setzen:

CRVAL1		(Type Real)
CDEL1		(Type Real)
CUNIT1	Angstrom	(Type String)
CTYPE1	Wavelength	(Type String)
CRPIX1	1	(Type Real)

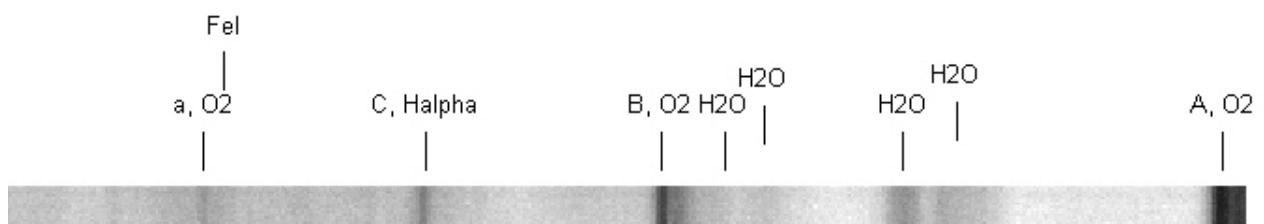
CRVAL ist die bestimmte Startwellenlänge in Angstrom
CDEL1 die ermittelte Dispersion in Angstrom/Pixel

- Bild unter anderem Namen abspeichern (z.B. spec_ext_cal.fits).



A5 Auswertung mit DS9

- Zur Identifikation einzelner Fraunhoferlinien wird das kalibrierte Spektrum (z.B. spec_ext_cal.fits) in DS9 geladen
- Durch Laden der Region Fraunhoferlinien.ds9 (Region → Load Region) können bekannte Fraunhofer-Linien in das Spektrum eingezeichnet und damit leicht identifiziert werden



A6 Messung des Auflösungsvermögens mit verschiedenen Spaltbreiten

- In MaxImDL die einzelnen Spektren extrahieren und diese dann abspeichern, dabei immer den gleichen Bildausschnitt für alle Spektren wählen

Höhe: 16 Pixel

Breite: 765 Pixel

- Spektren in VSPEC laden und Profile extrahieren
- Zentren und Halbwertsbreiten der Linien messen, dazu zunächst "Reset" im Infofenster drücken (löscht die vorherigen Infos)
- Unter dem Menüpunkt "Spectrometry" "Computations" auswählen und neben "Line Center" auch "FWMH" auswählen
- Linien vermessen und Werte aufschreiben
- Für jede Linie die Wellenlänge und die Halbwertsbreite in Angstrom berechnen und damit die mittlere Wellenlänge und Halbwertsbreite bestimmen

→ mittleres Auflösungsvermögen R inkl. Fehler

So kann für jeden Spalt das erreichte Auflösungsvermögen ermittelt werden.

Die Bestimmung der Dispersion sowie des Auflösungsvermögens der drei Spalte soll für beide Gitter durchgeführt werden.