



1

AG-Astro-Praxis-Sonne

Praktische Astronomie in der Wilhelm-Foerster-Sternwarte

Leitung : Dieter Maiwald und Matthias Kiehl



2

Sonne im Weißlicht

Sonne im Weißlicht

- Objektivsonnenfilter sind ein muss bei Newton- und bei allen Cassegrain-Teleskopen
- Prüfung ob das Objektivsonnenfilter unbeschädigt ist, kleine Löcher oder Risse. Das Sonnenfilter muss fest auch bei starkem Wind sitzen
- Bei Linsenteleskopen kann man auch mit dem Herschelkeil und Graufilter beobachten.
- Das Sucherfernrohr ist abgedeckt. Stattdessen ein Sonnensucher verwenden.
- Teleskop niemals unbeaufsichtigt lassen. Besucher könnten das Sonnenfilter für den Objektivdeckel halten...Zum Einstellen der Sonne die kleinste Vergrößerung nehmen. Als Einstellhilfe den Schatten des Teleskops beobachten und danach orientieren.
- Sonnenrelativzahl bestimmen.
- Hinweise dazu von der Fachgruppe Sonne der Vereinigung der Sternfreunde VdS.



4

Sonne im Ha /Call Licht

Die Lunt Teleskope

Lunt-Teleskope

- Standard-Modell 60mm ED-Refraktor $f=420\text{mm}$
- Als Komplettmodell oder als Aufsatz für vorhandene Teleskope
- Etalon Filter $<0,65\text{\AA}$
- Pressure Tuner (Luftdruckausgleich)

Beispielteleskop Lunt 60

Ein vorne aufgesetzter, nicht abgeschatteter Etalon-Filter erzeugt eine Halbwertsbreite von unter 0,75 Angström. Protuberanzen und Oberflächendetails können so gefahrlos beobachtet werden. Durch seine extrem kompakten Abmessungen ist es ein idealer Reisebegleiter. Der Zenitspiegel, in dem der Blockfilter eingebaut ist, ist mit einem Helikalfokussierer für 1,25" Okulare ausgestattet.

Wichtige Feature:

- 60mm freie Öffnung ohne zentrale Obstruktion
- 420mm Brennweite
- interner Etalon mit Luftdruck-Tuning System: **"Pressure Tuner PT"**
- Halbwertsbreite **<0,75 Angström**

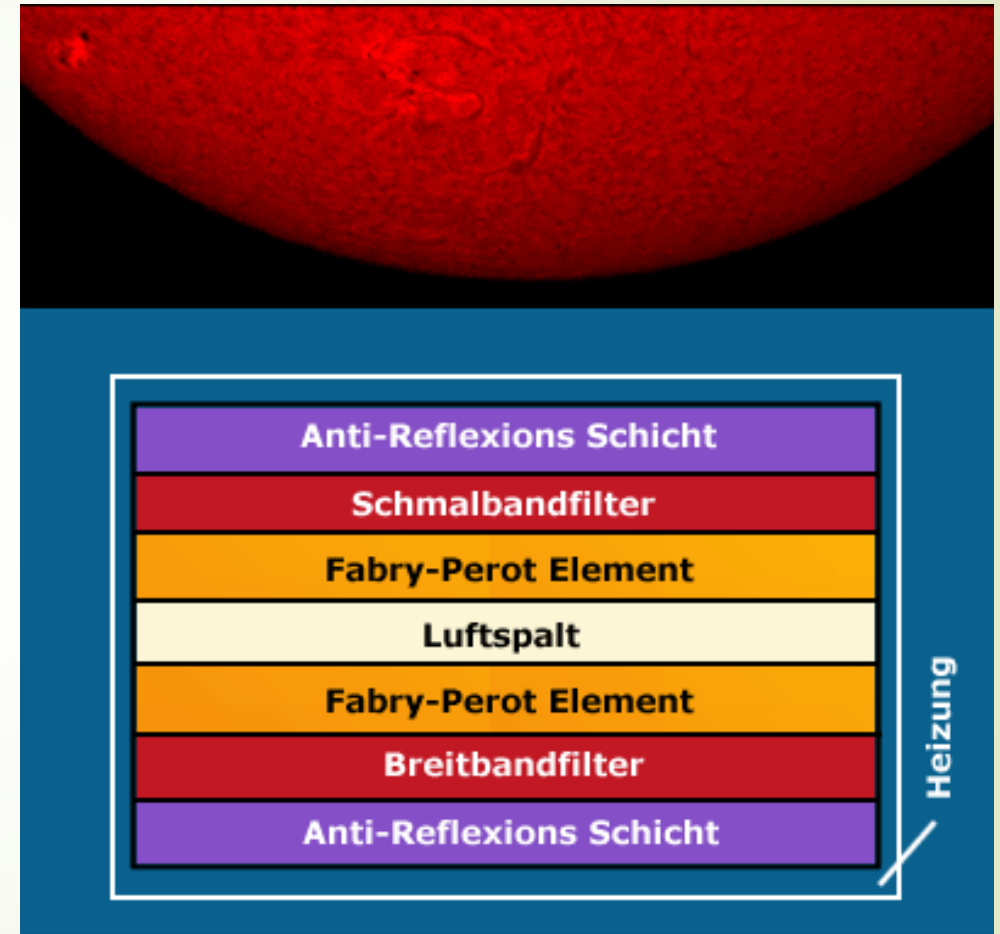
Beispielteleskop Lunt 60

Auch **Double-Stacking** mit einer Verkleinerung der Halbwertsbreite auf $<0,5$ Angström ist möglich. Dafür hat Lunt Solar Systems extra den neuen LS60C Double-Stack Filter in einem kompakten Gehäuse konstruiert (siehe unter "Empfohlenes Zubehör"). Dieser Filter kann direkt auf die LS60THa Teleskope aufgeschraubt werden und bietet wesentlich mehr Details und Kontrast auf der Sonnenoberfläche.

Preis ab 3,5K

Wie funktioniert ein H-alpha-Filter?

- Die Grafik zeigt Ihnen schematisch den Aufbau eines engbandigen H-alpha Filters der modernen Generation. Zuerst trifft das Licht im Filter auf eine Anti-Reflexions-Schicht (die Lichtintensität der Chromosphäre ist ungefähr 1 Million mal schwächer als das der Photosphäre, deshalb darf kein oder kaum Streulicht im Filter entstehen). Danach passiert das Licht ein Filter, welches ein Großteil des unerwünschten Lichtes aus dem Spektrum herausfiltert.
- Es folgt das Herz des Filters, ein Fabry Pérot Interferometer, auch Fabry Pérot Etalon genannt.
- Anschließend folgt ein weiteres Filter, welches Nebenlinien ausfiltert und die H-alpha Linie isoliert und eine weitere Anti-Reflexionsschicht. Der ganze Filterblock sitzt in einem Gehäuse und wird auf eine ganz bestimmte Temperatur geheizt.

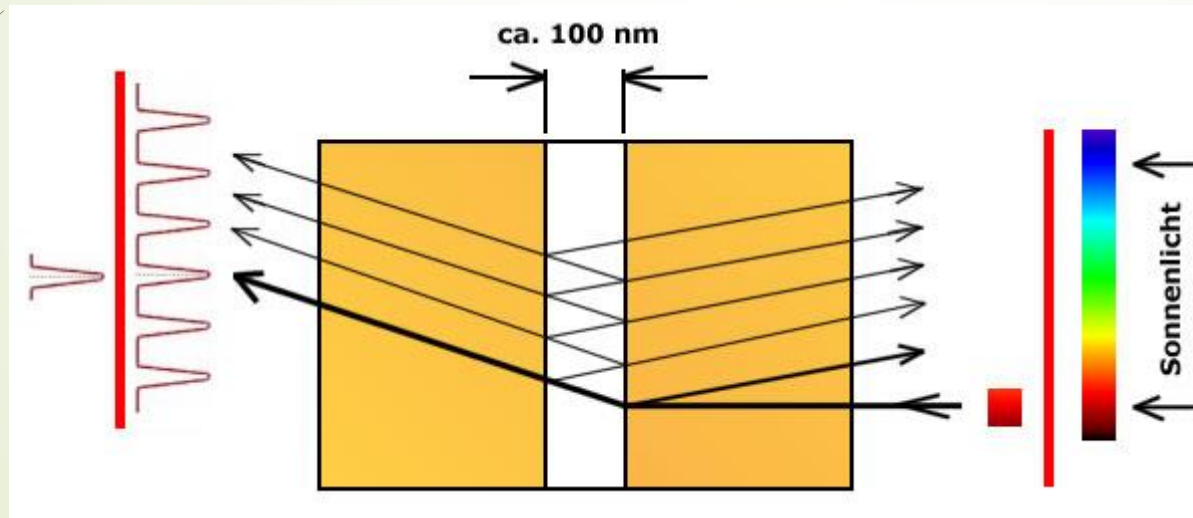


Fabry-Pérot-Interferometer

- Das **Fabry-Pérot-Interferometer**, auch **Pérot-Fabry-Interferometer**, wurde 1897 von den französischen Physikern Charles Fabry und Alfred Pérot entwickelt. Es ist ein optischer Resonator, der aus zwei teildurchlässigen Spiegeln gebildet wird. Ist der Spiegelabstand unveränderbar (bspw. Glas mit aufgedampften Spiegeln), so werden diese Aufbauten auch als Maßverkörperung benutzt und dann als **Fabry-Pérot-Etalon** bezeichnet. Ein eintreffender Lichtstrahl wird nur dann durch diesen Aufbau geleitet (transmittiert), wenn er dessen Resonanzbedingung erfüllt.

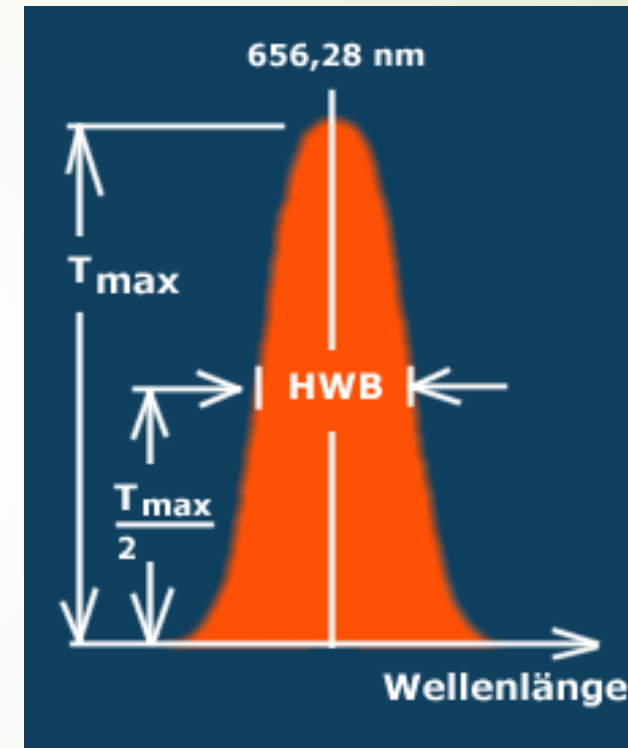
Etalon

- Etalons funktionieren wie ein Fabry-Pérot-Interferometer und sind extrem planparallele Substrate ($\parallel < 1''$) definierter Dicke. Je nach Anwendungsfall sind die beiden Seitenflächen identisch mit einem teilreflektierenden Spiegel beschichtet. Der Abstand zweier Transmissionsmaxima ist abhängig von der Etalondicke.



Was ist die Halbwertsbreite (HWB) eines (H-alpha) Filters

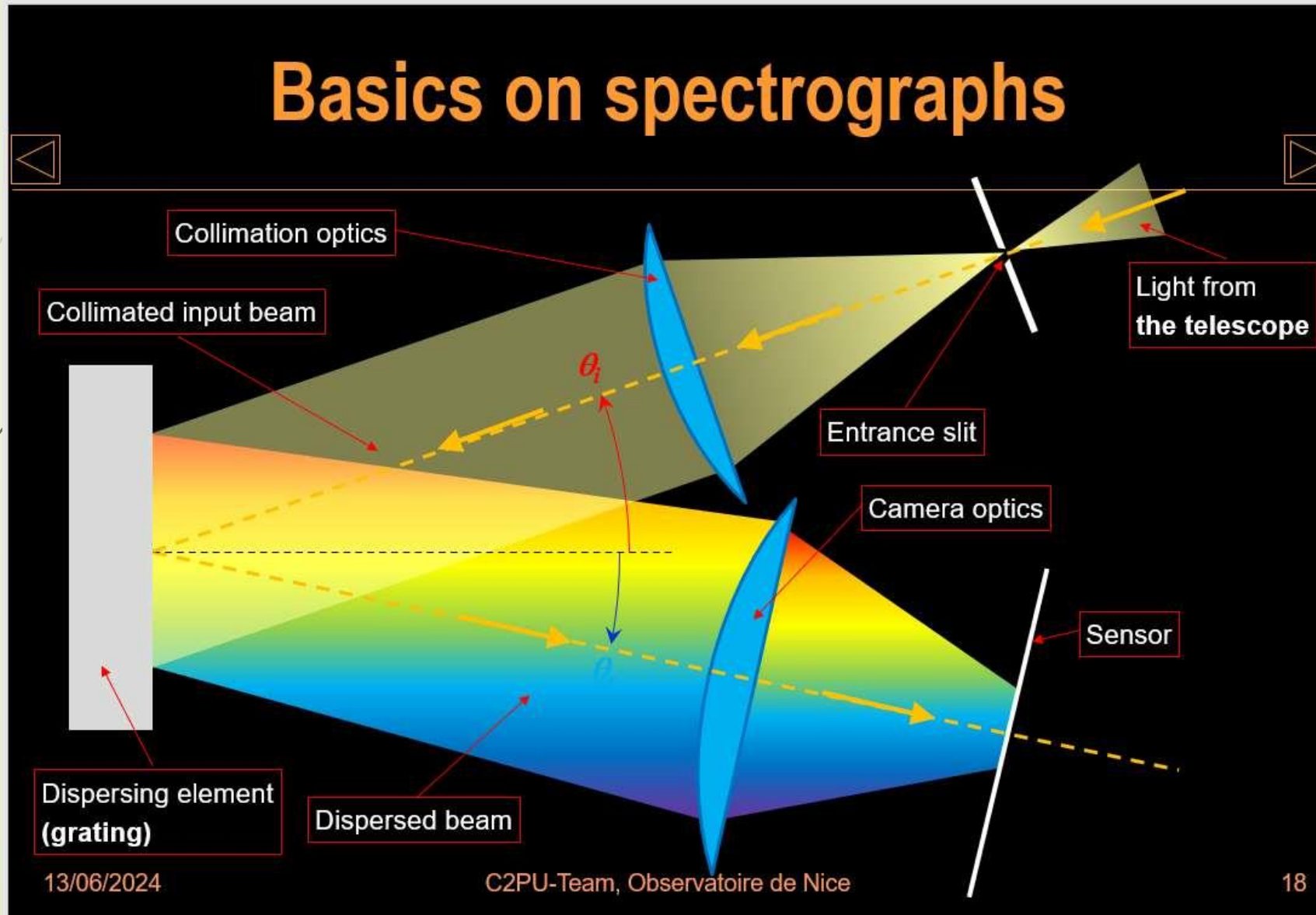
- Die Grafik zeigt den Begriff der Halbwertsbreite. Auf der waagerechten Achse ist die Wellenlänge in Nanometer angegeben und auf der senkrechten die Transmission (Lichtdurchlässigkeit) eines Filters. Die HWB ist definiert als Wert in Nanometer oder Ångström bei einer Transmission von $T/2$ max.
- Um Oberflächendetails im H-alpha Licht sehen zu können, bedarf es Halbwertsbreiten $< 1 \text{ Å}$ (0.1 nm). Als Beispiel: Die Deep-Sky-H-alpha-Filter, die in der CCD Technik zur Aufnahme von H-II Regionen eingesetzt werden haben HWBs von um die 10 bis 50 Å ($1 \text{ bis } 5 \text{ nm}$).
- Zudem muss natürlich das Filter bis auf einige Zehntel Nanometer genau auf der Wellenlänge der H-alpha Linie liegen. Deshalb werden diese Filter beheizt, weil man über die Temperatur das Filter genau auf die Linie schieben kann.
- Mit abnehmender HWB werden die Protuberanzen schwächer und mehr Oberflächendetails treten hervor



Merkmale der Sonne im H-alpha Licht

- Chromosphäre
- Protuberanzen
- Filamente
- Spikulen
- Feldübergangsbögen
- Sonnenfackeln

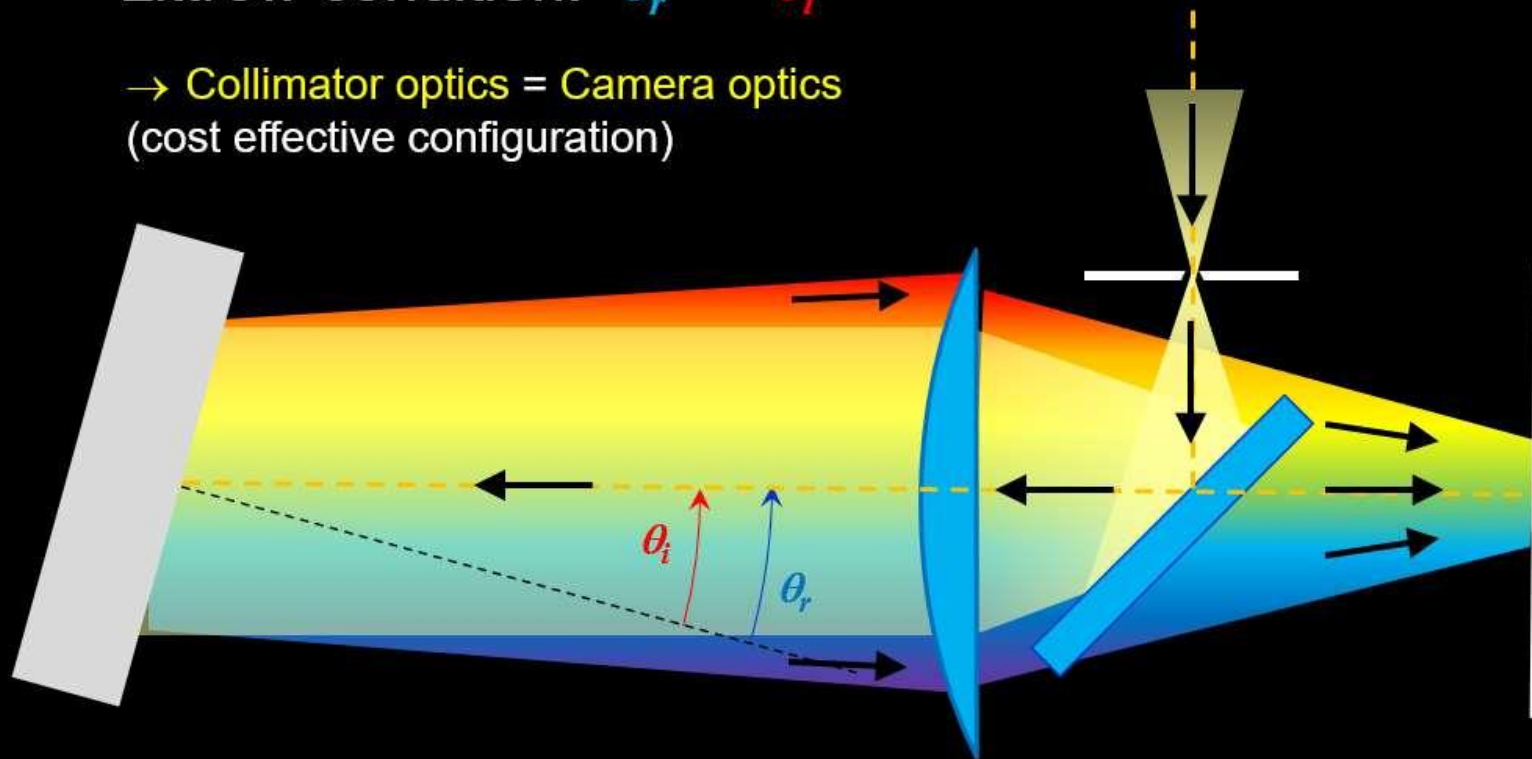
Spektrograph



Littrow configuration

Littrow condition: $\theta_r = \theta_i$

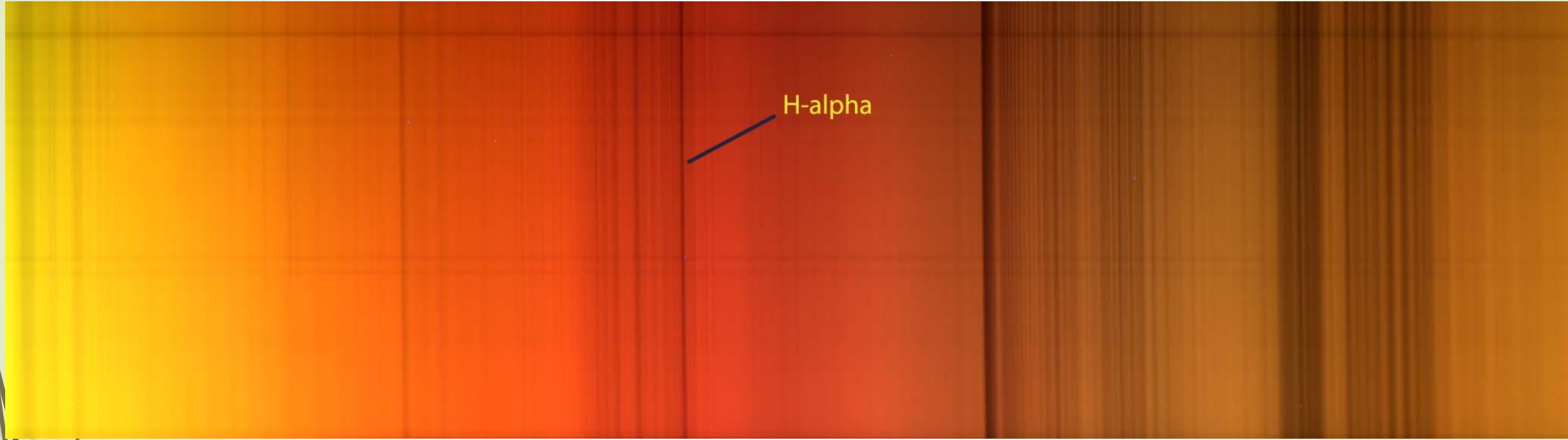
→ Collimator optics = Camera optics
(cost effective configuration)



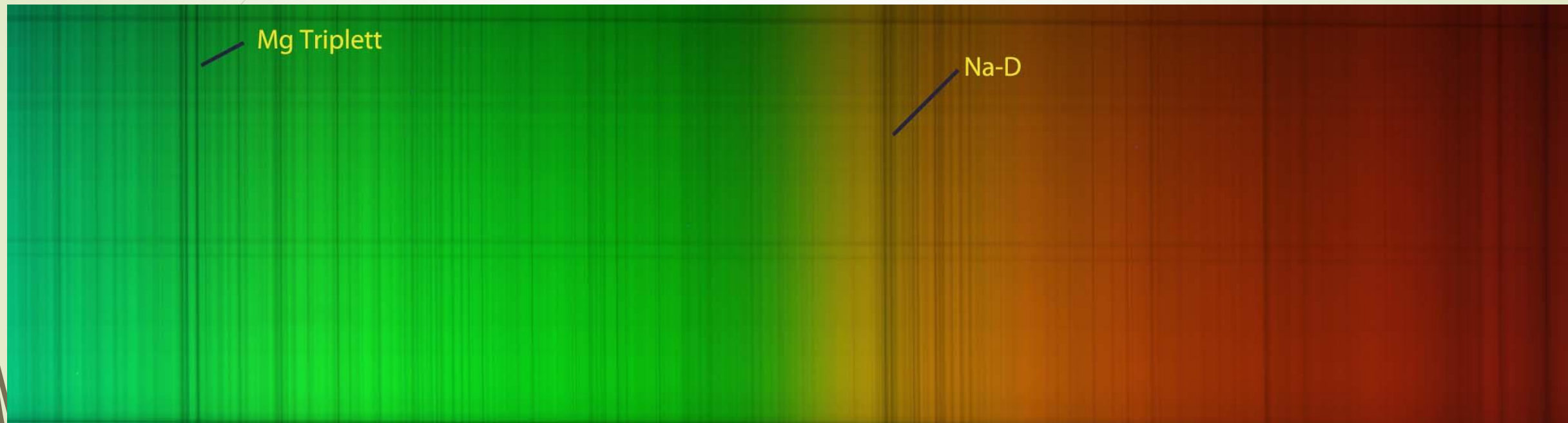
L200-Spektrograph



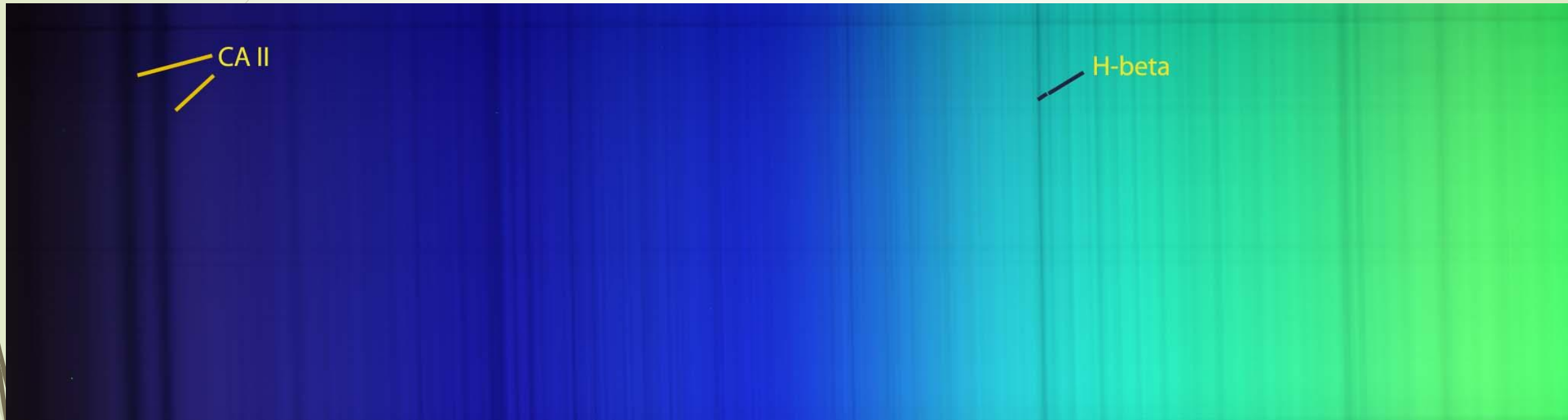
Sonnenspektrum



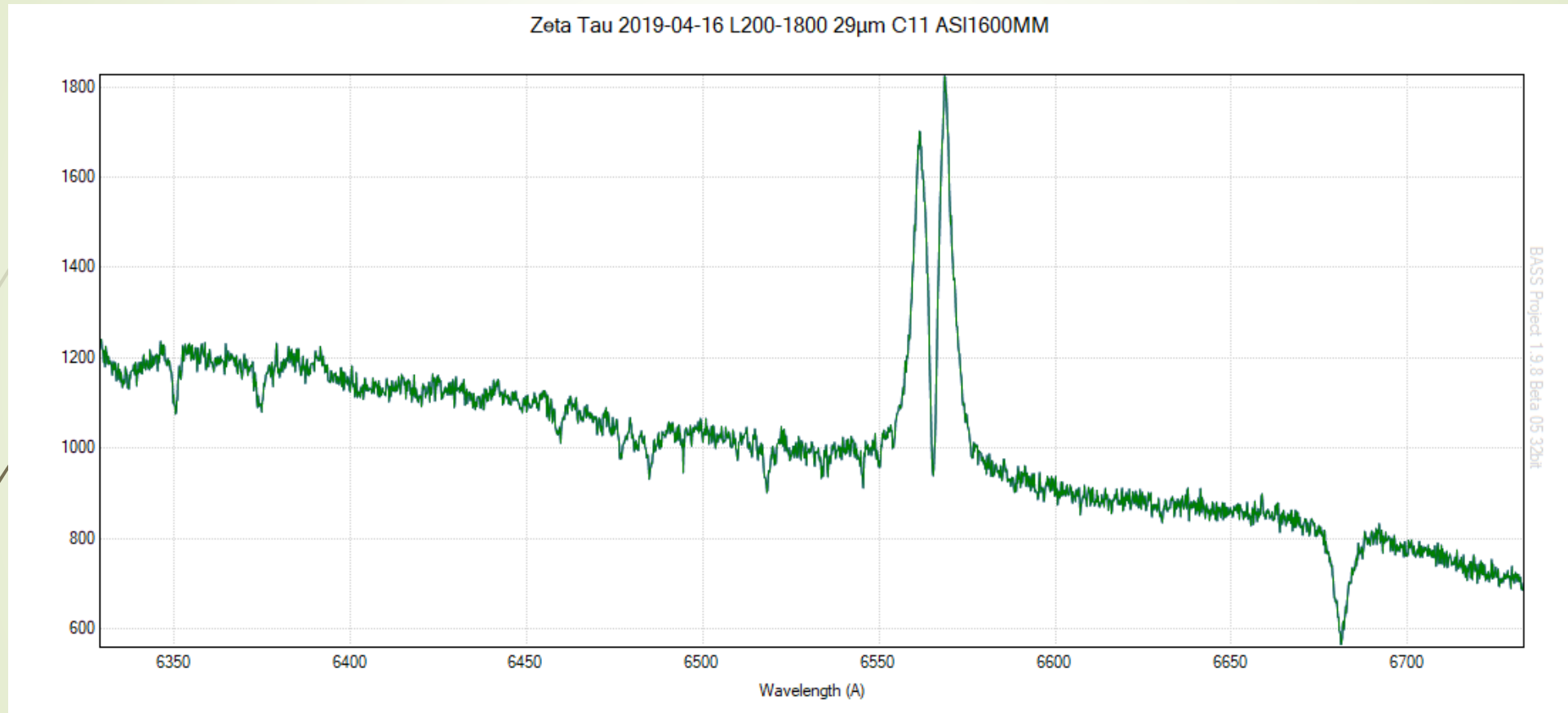
Sonnenspektrum



Sonnenspektrum



Hochaufgelöstes Sternspektrum um H-alpha



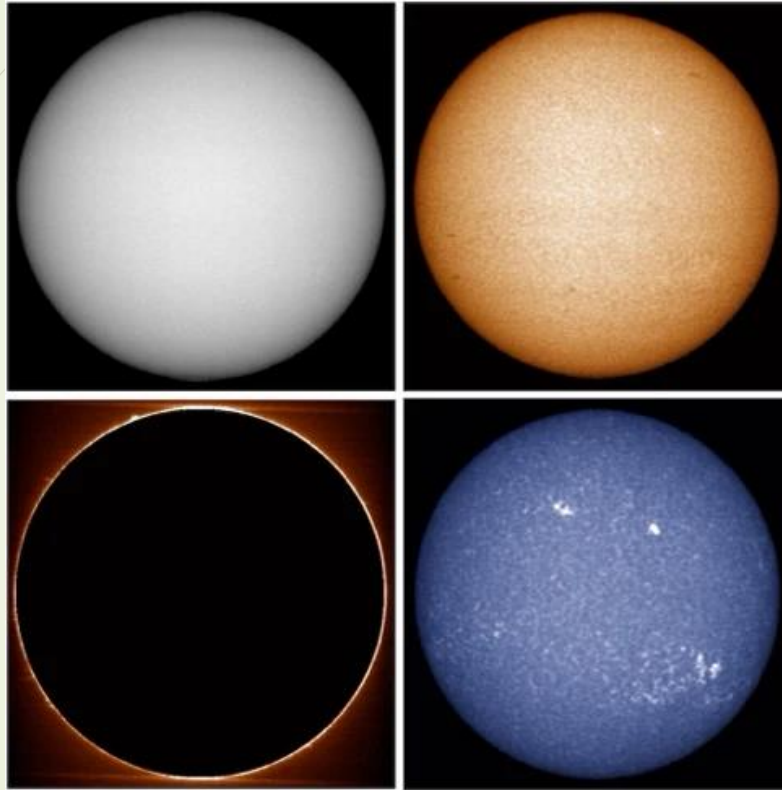
Der Spektroheliograph

Selbstbau mit dem 3D-Drucker

Projekt Sol'Ex von Christian Buil

- Webseite von Christian Buil das Projekt [Sol'Ex](#)

Die Farben der Sonne

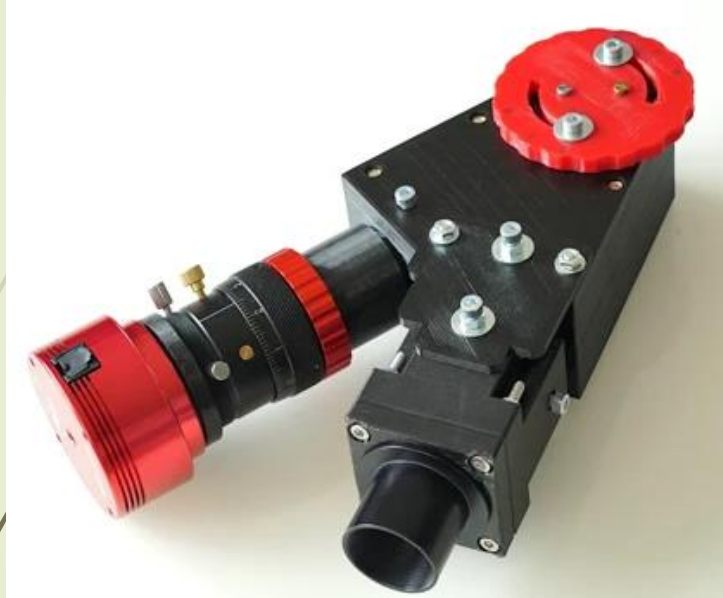


Die Sonne in Ha, Calcium und beliebige Wellenlänge

Spektroheliograph Sol`Ex

- Der Spektroheliograph Sol`Ex zerlegt in erster Linie das Sonnenlicht in seine einzelnen Wellenlängen.
- Der Instrumenteneingang besteht aus einem schmalen, 10 Mikrometer breiten und 4,5 mm hohen Eintrittsspalt, der sich im Brennpunkt des Teleskops befindet.
- Danach folgt ein achromatisches Dublett mit 80 mm Brennweite, das speziell für Sol`Ex optimiert wurde. Diese Linsen sorgen dafür, dass die aus einem Spalt austretenden Lichtstrahlen parallel zueinander verlaufen und dann auf ein holografisches Beugungsgitter mit 2.400 Linien/mm treffen, das für die spektrale Streuung des Lichts sorgt.
- Ein Objektiv mit einer Brennweite von 125 mm, das ebenfalls speziell für Sol`Ex hergestellt wurde, bündelt schließlich alle Strahlen in der Detektorebene.
- In der Gitterebene beträgt das Öffnungsverhältnis des angenommenen Strahlenbündels etwa 1:10,6. Das ist auch das optimale Arbeitsöffnungsverhältnis. Die optimale Brennweite des Objektivs beträgt, um die Sonne komplett abzubilden, abhängig von der Pixelgröße der Aufnahmekamera ungefähr 420 mm.

Spektroheliograph Sol'Ex



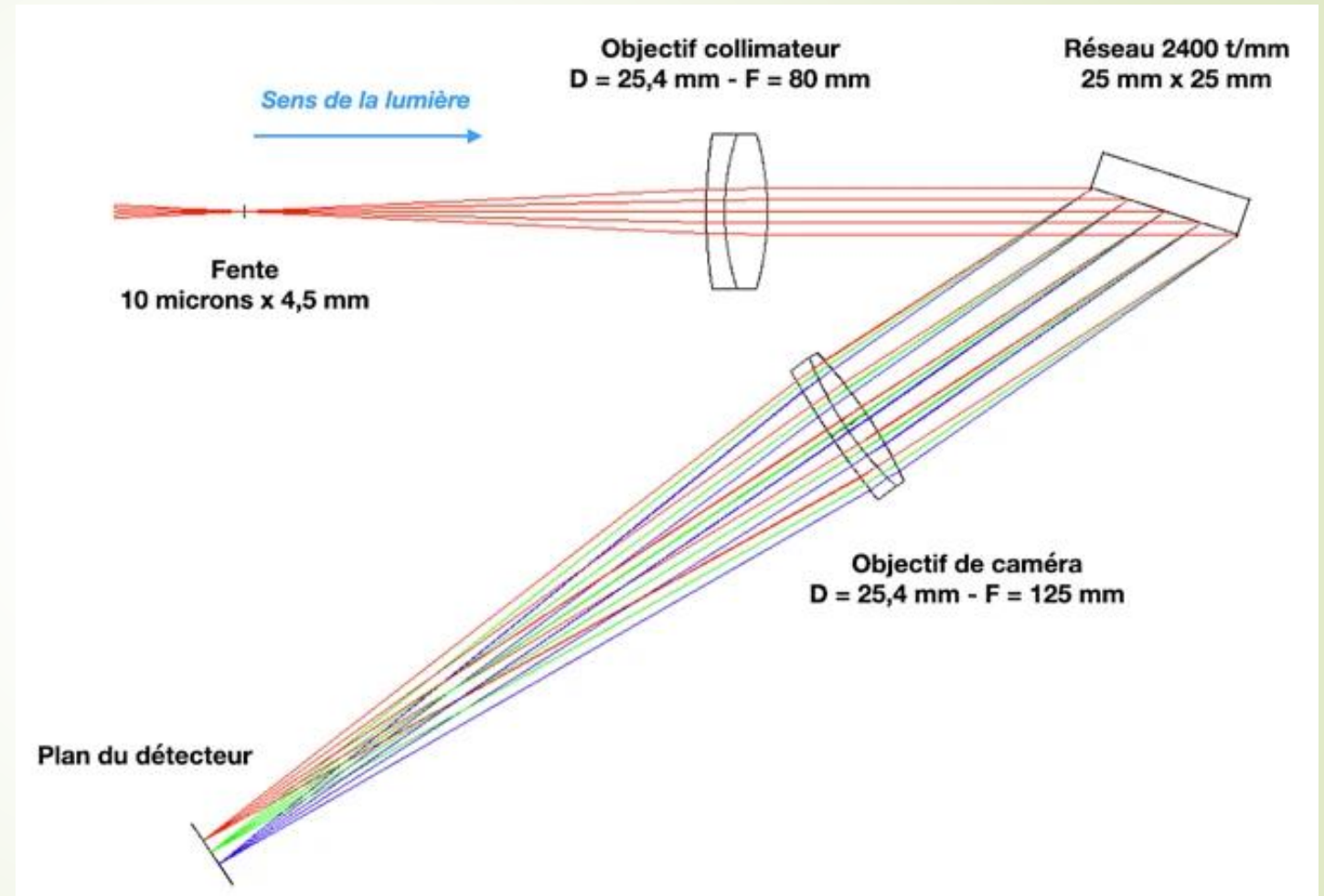
Spektroheliograph Sol'Ex

Ein bisschen Instrumententheorie ...
Diejenigen, die sehr resistent gegen
Mathematik sind,

können diesen Teil überspringen, es
wird sie nicht daran hindern,

Sol'Ex zu bauen und zu benutzen! Für
alle anderen finden Sie hier eine
Begründung

für die Konstruktion dieses Instruments,
seine Größe und den Ursprung
seiner Leistung. Wenn Sol'EX ein
Spektroheliograph ist, so ist es vor
allem ein Spektrograph, d.h. ein
Instrument, das die Zerlegung
der Lichtstrahlung in Wellenlängen,
oder, wenn man will, in Farben,
aufzeichnet.



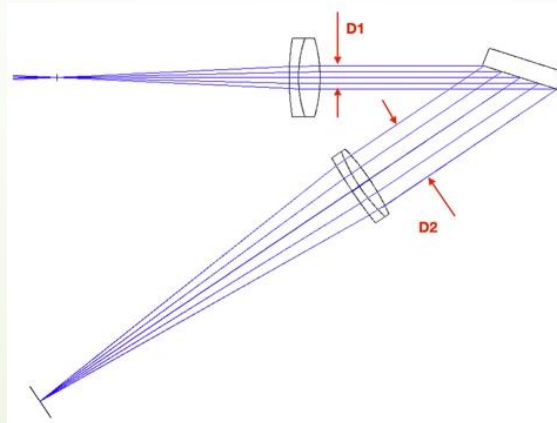
Spektroheliograph Sol'Ex

Der Instrumenteneingang besteht aus einem schmalen Eintrittsspalt, 10 Mikrometer breit und 4,5 mm hoch, der sich im Brennpunkt des Teleskops befindet. Danach folgt ein Linsenkollimator mit 80 mm Brennweite. Dieses achromatische Dublett wurde speziell für Sol'Ex optimiert und verwendet ein besonderes Glas mit hohem Brechungsindex. Dieses Objektiv sorgt dafür, dass die aus einem Spalt austretenden Lichtstrahlen parallel zueinander verlaufen. Diese treffen dann auf ein holografisches Beugungsgitter mit 2400 Linien/mm, das für die spektrale Streuung des Lichts sorgt. Ein Objektiv mit einer Brennweite von 125 mm, das ebenfalls speziell für Sol'Ex hergestellt wurde, bündelt schließlich alle Strahlen in der Detektorebene. Die durchschnittliche Richtung der Strahlen vor und nach dem Gitter bildet ein "V" mit einem Innenwinkel von 34° . Dieser Winkel wird als "Gesamtwinkel" bezeichnet. Er verleiht Sol'Ex seine charakteristische allgemeine Form.

Es fällt sofort der sehr starke Einfallswinkel der vom Kollimator auf das Gitter kommenden Strahlen auf, der bei der H-alpha-Wasserstofflinie mit einer Wellenlänge von 656 nm etwa 72° beträgt. Dieser hohe Einfallswinkel führt zu einer starken Vignettierung der vom Teleskop gesammelten Strahlen. Das Gitter ist dann ungefähr die Pupille des Systems. In der Dispersionsebene (der Ebene der Abbildung) beträgt die akzeptierte Strahlöffnung etwa $f/10,6$. In der senkrechten Ebene und unter Berücksichtigung des durch den 4,5 mm hohen Spalt abgedeckten Feldes beträgt die Öffnung des Systems etwa $f/5,6$. Welche Bedeutung hat das alles? Nehmen wir an, Sie verwenden ein Teleskop mit einem Durchmesser von 65 mm und einer Brennweite von 420 mm. Das Öffnungsverhältnis dieses Systems ist also $420/65 =$ ungefähr 6,5. Wenn dieser Refraktor mit Sol'Ex verwendet wird, beträgt seine effektive Apertur also $f/6,5$ entlang der Achse senkrecht zur Einfallsebene (es ist die physikalische Apertur des Teleskops, die begrenzt) und $f/10,5$ in der Einfallsebene (es ist Sol'Ex, das begrenzt). Könnte man den effektiven Umriss des Nutzbereichs am Eingang des Refraktors zeichnen, hätte man die Form einer Ellipse und nicht eines Kreises.

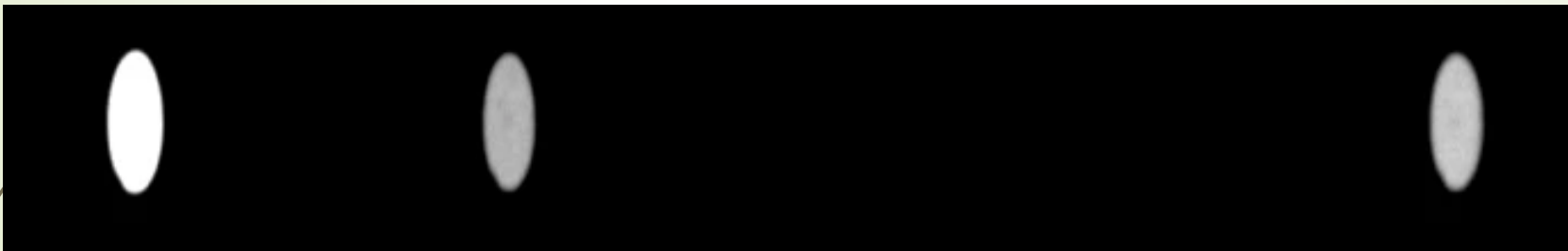
Spektroheliograph Sol'Ex

Die Größe von Sol'Ex führt daher zu einem Verlust an Lichtstrom, da das Teleskopobjektiv abgeblendet wird (es sei denn, man verwendet ein $f/10$ -Teleskop). Diese Situation ist für die Sonnenbeobachtung nicht kritisch, da der verfügbare Lichtstrom wirklich reichlich ist. Die Refraktoren und fotografischen Objektive, die mit Sol'Ex verwendet werden können, können zwischen $f/5,6$ und $f/9$ geöffnet werden, ohne dass sich dies merklich auf die Bilder auswirkt. Wenn Ihr Instrument jedoch grundsätzlich sehr lichtstark ist, können Sie verschiedene Blenden vor dem Objektiv wählen und auf eine mögliche Verbesserung der Bildqualität testen. Ich gebe Beispiele im Abschnitt "Beobachtung". Außerdem wird so vermieden, dass sich unnötig viel Lichtstrom auf einen kleinen Punkt am Eingang zu Sol'Ex konzentriert. Zum Beispiel, wenn Sie $f/2,8$ ein fotografisches Objektiv verwenden möchten, sollten Sie auf $f/5,6$, oder sogar $f/7,5$ (Beugung noch nicht verschlechtern Leistung im Allgemeinen in Bezug auf Spezifikationen. von Sol'Ex) zu stoppen. Der starke Aufprall auf das Gitter führt zwar zu einem Strömungsverlust, erweist sich aber andererseits als sehr vorteilhaft, was die Schärfe des aufgenommenen Spektrums betrifft. Um diesen letzten Punkt zu verstehen, müssen wir den großen Unterschied in der Größe des Lichtstrahls in der Einfallsebene vor und nach dem Gitter (D1 bzw. D2) beachten:



Spektroheliograph Sol'Ex

Diese Eigenschaft, die für die Verwendung eines Gitters spezifisch ist, wird als Anamorphose bezeichnet. Die Anamorphose wirkt sich nicht nur auf die Größe der Strahlenbündel aus, sondern auch auf die Größe des Spaltbildes auf dem Detektor. Das Bild der Spaltbreite wird um einen Faktor $D1 / D2$, den so genannten Anamorphosefaktor, verkleinert. Die Größe bleibt jedoch entlang der sogenannten Raumachse, die senkrecht zur Dispersionsachse verläuft, unverändert. Zur Veranschaulichung dieser Situation zeigt das folgende Dokument das Bild einer Lichtleitfaser, die vorübergehend den Sol'Ex-Spalt ersetzt und anfangs einen runden Umriss hat, deren Bild aber schließlich oval ist:



Die durch die Anamorphose hervorgerufene Verringerung der optischen Breite des Spaltes hat einen erheblichen Nettoeffekt auf das spektrale Auflösungsvermögen von Sol'Ex, d. h. auf die Schärfe der Details des Spektrums, die beobachtet werden können. Im Fall von Sol'Ex ist diese Auswirkung sehr positiv. Er ist verantwortlich für die hohe Leistung, die Sol'Ex als kompaktes Instrument erreicht.

Spektroheliograph Sol'Ex

Machen wir ein paar Berechnungen. Zunächst der Zusammenhang zwischen dem Gesamtwinkel G ($G = 34^\circ$ bei Sol'Ex) und dem Einfallswinkel α auf das Gitter :

$$\alpha = \arcsin(k m \lambda_0 / (2 \cos G/2) + G/2)$$

wobei k die Beugungsordnung ist (hier $k = 1$), m die Rillendichte (hier $m = 2400$ Linien/mm) und λ_0 die Wellenlänge im Zentrum des Sensors (hier $0,6563 \times 10^{-3}$ mm). Wir haben auch, $G = \alpha - \beta$, mit β , der Beugungswinkel.

Für die Beobachtung der H-Alpha-Linie (6563 Å) beträgt der Einfallswinkel der Strahlen auf das Gitter genau $\alpha = 72,4^\circ$, während der Beugungswinkel (nach dem Gitter) $\beta = 38,4^\circ$ beträgt. Der Anamorphosefaktor ergibt sich aus der Formel:

$$A = \cos(\alpha) / \cos(\beta)$$

wobei $A = \cos(72,4^\circ) / \cos(38,4^\circ) = 0,386$. Dies bedeutet, dass die Breite des Eingangsspaltes etwas verringert wird. (optisch) auf $0,386 \times 10$ Mikrometer = 3,86 Mikrometer. Dieses Ergebnis führt zu einer Verbesserung der spektralen Auflösung. Es sollte hinzugefügt werden, dass die Optik von Sol'Ex in Richtung der roten Linie des Wasserstoffs, aber auch eines großen Teils des sichtbaren Spektrums, fast durch Beugung begrenzt ist, d.h. sie ist sehr gut (da man nicht gleichzeitig einen sehr breiten Spektralbereich erforscht).

Spektroheliograph Sol'Ex

The resolving power R is defined by the formula $R = \lambda / \Delta\lambda$, with λ the observation wavelength and $\Delta\lambda$ the finest detail observed in the spectrum in units of wavelength. Note that R is a dimensionless number. The larger is R , the more small details are observed in the spectrum. We show that:

$$R = f_c / w \times (\tan(\alpha) + \sin(\beta) / \cos(\alpha))$$

Das Auflösungsvermögen R wird durch die Formel $R = \lambda / \Delta\lambda$ definiert, wobei λ die Beobachtungswellenlänge und $\Delta\lambda$ das feinste im Spektrum beobachtete Detail in Einheiten der Wellenlänge ist.

Beachten Sie, dass R eine dimensionslose Zahl ist. Je größer R ist, desto mehr kleine Details werden im Spektrum beobachtet. Wir zeigen, dass: $R = f_c / w \times (\tan(\alpha) + \sin(\beta) / \cos(\alpha))$

Wie wir gesehen haben, sind α und β der Einfallswinkel bzw. der Beugungswinkel auf dem Gitter. Außerdem ist f_c die Brennweite des Kollimators, hier $f_c = 80$ mm, und w ist die physikalische Breite des Spalts, hier $w = 10$ Mikrometer = $0,010$ mm. Das Phänomen der Anamorphose wird durch den Term in Klammern dieser Formel beschrieben, ebenso wie der Einfluss der Ätzdichte des Gitters. Wenn wir die Berechnung um die H-Alpha-Linie herum durchführen, finden wir:

$$R = 80 / 0,010 \times (\tan(72,4^\circ) + \sin(38,4^\circ) / \cos(72,4^\circ)) = 41600$$

Unter Berücksichtigung der verbleibenden optischen Aberrationen können wir davon ausgehen, dass das Auflösungsvermögen von Sol'Ex nahe bei $R = 40.000$ liegt, was für ein so kleines Instrument eine bemerkenswerte Leistung darstellt. Wir lösen daher theoretisch im roten Bereich (aber über eine kleine Wellenlängenbreite) spektrale Details von $\Delta\lambda = \lambda / R = 6563 / 40.000 = 0,16 \text{ \AA} = 0,016 \text{ nm}$. Durch diese Feinheit ist die Reinheit der von Sol'Ex gelieferten monochromatischen Bilder höher als die von Interferenzfiltern, die viel teurer sind.

Spektroheliograph Sol'Ex

Erinnern Sie sich an die grundlegende Formel für Gitter, die den Beugungswinkel der Beugung mit dem Einfallswinkel in Beziehung setzt:

$$\sin(\alpha) + \sin(\beta) = m \times \lambda$$

Mit m , der Gravurdichte, hier $m = 2400$ Linien/mm und λ die Wellenlänge, hier $\lambda = 0,6563 \text{e-}3$ mm. Sie können überprüfen, ob die Werte für α und β korrekt sind. Ein weiterer wichtiger optischer Parameter ist der spektrale Dispersionsfaktor in der Ebene des Detektors. Dabei geht es um die Bewertung des kleinen Spektralbereichs, den ein Pixel des Detektors abdeckt. Dieser Parameter, der mit r bezeichnet wird, wenn er in A/Pixel ausgedrückt wird (streng genommen handelt es sich um eine reziproke Dispersion), kann mit der folgenden Formel berechnet werden:

$$r = 1 \text{e}7 \times p \times \cos(\beta) / m / f_o$$

mit p der Pixelgröße in Millimetern und f_o der Brennweite des Kameraobjektivs, hier $f_o = 125$ mm.

Angenommen, eine CMOS-Kamera verwendet einen Sony IMX178 CMOS-Sensor (z. B. die ASI178MM-Kamera von ZWO).

Die Pixelgröße beträgt in diesem Fall 2,4 Mikrometer, wobei $p = 2,4$ Mikrometer = 0,0024 mm und

$$r = 1 \text{e}7 \times 0,0024 \times \cos(38,4^\circ) / 2400 / 125 = 0,063 \text{ A / Pixel}$$

Spektroheliograph Sol'Ex

Es ist wichtig, das zuvor berechnete spektrale Auflösungselement $\Delta\lambda$, das 0,16 Å beträgt, mit der Abtastung des Spektrums durch die Pixel des Detektors, 0,063 Å/Pixel, zu vergleichen.

Es zeigt sich, dass wir $0,16 / 0,063 = 2,53$ Pixel pro Auflösungselement haben, d. h. wir liegen über der Shannon-Grenze (oder Nyquist-Grenze), die bei zwei Abtastpunkten pro Auflösungselement liegt. Dies ist eine gute Größenordnung für Sol'Ex.

Beachten Sie, dass das Shannon-Kriterium nicht eingehalten wird, wenn die ASI178MM-Kamera im 2x2-Binning betrieben wird (was 4,8 Mikrometer großen Pixeln entspricht), so dass Informationen verloren gehen. Für Aufgaben, die eine hohe Präzision erfordern (insbesondere Dopplermessungen), ist es am besten, eine Kamera mit kleinen Pixeln zu verwenden und wenn möglich im 1x1-Binning zu arbeiten.

Diese Überlegungen zur Abtastung rechtfertigen die Verwendung eines Kameraobjektivs mit einer relativ langen Brennweite von $f_o = 125$ mm. Eine weitere nützliche Formel ist diejenige, die die spektrale Dispersion in Å/mm angibt, der sogenannte Plattenfaktor, der mit dem Buchstaben P bezeichnet wird:

$$P = 1e7 \times \cos(\beta) / m / f_o$$

Mit den Werten unseres Beispiels finden wir,

$$P = 1e7 \times \cos(38,4) / 2400 / 125 = 26,1 \text{ Å / mm}$$

Nun wollen wir uns mit dem Thema der Sonnenbilder selbst befassen. In erster Näherung ist die Schärfe der auf der Sonnenoberfläche in Bogensekunden beobachteten Details entlang der Spektralachse durch die Breite des Spaltes im Brennpunkt des Teleskops nach folgender Formel gegeben:

$$V_x = 206264 \times w / F$$

Spektroheliograph Sol'Ex

Dabei ist w die physikalische Breite des Spaltes und F die Brennweite des Teleskops. Angenommen, wir verwenden einen Refraktor mit einer Brennweite von 420 mm, in diesem Fall mit $w = 0,010$ mm, so ergibt sich

$$V_x = 206264 \times 0,010 \text{ mm} / 420 = 4,9 \text{ Bogensekunden}$$

In Wirklichkeit ist die Situation komplizierter, weil man auch die Größe der Pixel und die Anamorphose berücksichtigen muss, aber die Größenordnung ist gut. Entlang der räumlichen Achse lautet die Formel,

$$V_y = 206264 \times p \times f_c / f_o / F$$

das heißt

$$V_y = 206264 \times 0,0024 \times 80/125/420 = 0,75 \text{ Bogensekunden}$$

Dieses Ergebnis ist jedoch sehr theoretisch, da es geometrisch ist. In der Praxis muss man unter Berücksichtigung der optischen Aberrationen eher mit einer Auflösung von 3 Bogensekunden auf der Sonnenscheibe rechnen. Ebenso ist es üblich, mit einem 2x2-Binning zu arbeiten; in diesem Fall beträgt die effektive Pixelgröße $p = 2,4 = 4,8$ Mikrometer. Letztendlich kann man davon ausgehen, dass die spektrale Auflösung in diesem Beispiel nahe bei 3 Bogensekunden liegt. Atmosphärische Turbulenzen können diese Leistung durchaus verringern. An einem heißen Tag kann das Seeing leicht 3 Bogensekunden überschreiten. Wenn Ihr Seeing besser ist, können Sie die Winkelauflösung der Bilder erhöhen, indem Sie die Brennweite des Refraktors verlängern (ich betone diesen Punkt im Abschnitt "Beobachtung").

Spektroheliograph Sol'Ex

Schließlich muss die Frage beantwortet werden: Kann ich das Bild der gesamten Sonnenscheibe in einem einzigen Scan mit einem Teleskop mit Brennweite F erfassen?

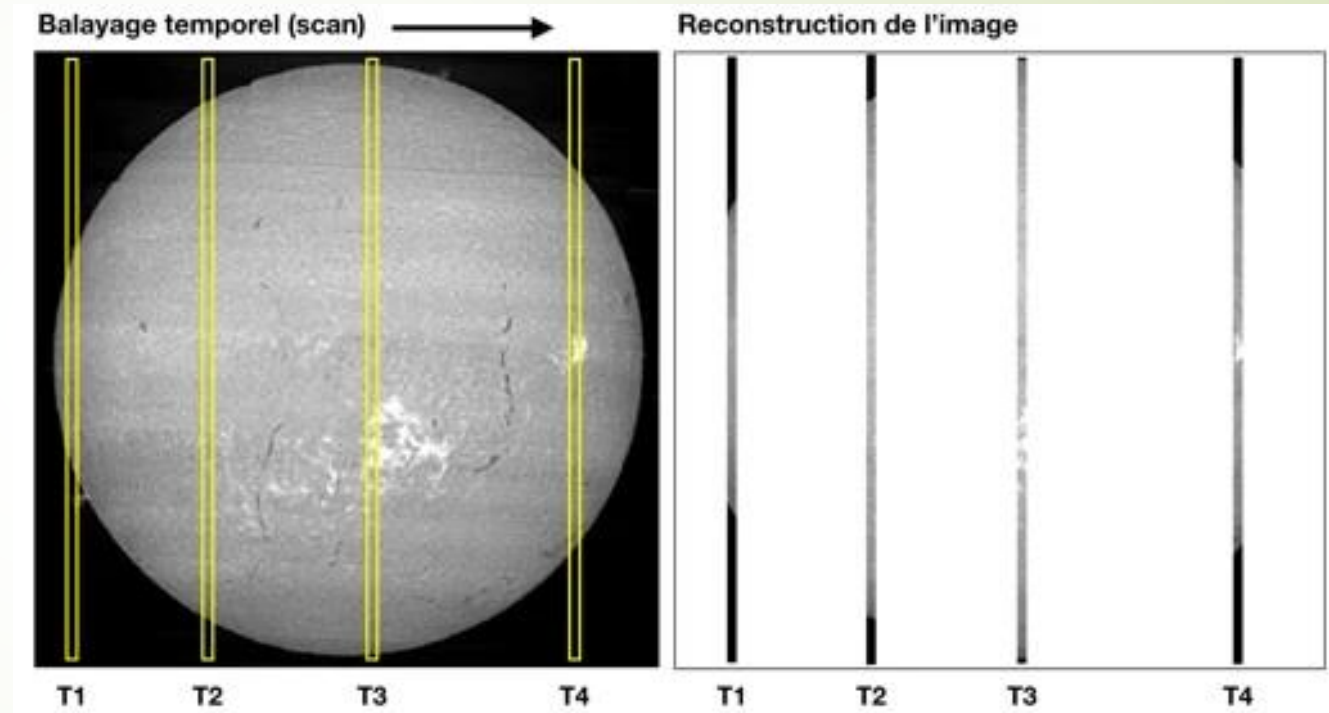
Der scheinbare Durchmesser der Sonne ändert sich je nach Jahreszeit leicht, aber wir betrachten hier den Durchmesser von $0,53^\circ$, der sehr repräsentativ ist. Da die Länge des Sol'Ex-Spaltes 4,5 mm beträgt, ist die gewünschte Grenzbrennweite durch die Formel gegeben:

$$F_{\text{limite}} = 4,5 / \tan(0,53^\circ) = 486 \text{ mm}$$

Es ist jedoch ratsam, einen Spielraum von mindestens 10 % einzuplanen, um die Scheibe über die Länge des Spaltes vernünftig abzubilden. Daher ist eine Brennweite F von 440 bis 450 mm das angemessene Maximum. Außerdem sind die Ränder des Spalts etwas weniger scharf als die Mitte, was zu einer möglichen leichten Unschärfe an den Polen der Scheibe führt, wenn man in Rektaszension schwenkt. Letztlich ist eine Brennweite von etwa 420 mm oder weniger ideal, wenn Sie die gesamte Scheibe bequem erfassen möchten. Natürlich kann die Brennweite auch viel länger sein, wenn dieser letzte Punkt nicht Ihre Priorität ist, weil Sie die Sonnenoberfläche so detailliert wie möglich erfassen möchten.

Spektroheliograph Sol'Ex

- Kurz gesagt, die Beobachtungsmethode besteht darin, den Eingangsspalt des Spektrographen in Rektaszension abzutasten. Die lange Achse des Spaltes steht senkrecht zu dieser Bewegung. Gleichzeitig werden die Spektralbilder mit hoher Geschwindigkeit aufgenommen. Im Nachhinein wird die Bildsequenz von einem Computer verarbeitet, um das Bild der Sonne Zeile für Zeile anhand eines bestimmten Bereichs des Spektrums (z. B. einer Spektrallinie) aufzubauen. In der Regel werden während der Zeit, in der die Sonne vor dem Spalt vorbeizieht, 2.000 bis 5.000 Bilder des Spektrums aufgenommen. Einzelheiten finden Sie im Abschnitt "Beobachtung". Es sind zahlreiche Videos verfügbar, die zeigen, wie dies in der Praxis am Boden geschieht.



Spektroheliograph Sol'Ex

- Quelle VdS Projekte
- Der Sol'Ex funktioniert bis zu einer Brennweite von 1200 mm. Für diese längeren Brennweiten müssen die jeweiligen Teilbereiche der Sonne gescannt werden, um ein Gesamtmosaik zu erstellen.
- Beispielteleskop 60mm ED-Refraktor $f=350\text{mm}$
- Als Aufnahmekamera wird ASI178MM (Mono) verwendet
- Als Aufnahmesoftware eignen sich SharpCap und auch FireCapture.
- Das Teleskop wird auf die Montierung gesetzt und in Richtung Sonne geschwenkt. Dabei halte ich die Hand oder ein Blatt Papier über den Okularauszug, um so zu erkennen, wann sich die Sonne ins Blickfeld bewegt. Die Interpretation des Schattens des Teleskopes ist hilfreich bei der Beurteilung, in welche Richtung die Montierung geschwenkt werden sollte. Ist dies gelungen, setze ich den Sol'Ex an das Teleskop und befestige ihn. Hierbei ist es wichtig, dass er entsprechend der Stundenachse ausgerichtet wird.

Spektroheliograph Sol`Ex im Einsatz

- Die Nachführung wird auf Solar eingestellt. Die Kamera wird mit dem Notebook verbunden und SharpCap gestartet. Ob die Montierung über den PC oder über den Handcontroller gesteuert wird, sei jedem selbst überlassen. Ich nehme beim Sol`Ex den Handcontroller meiner Sky-Watcher-Montierung AZ-EQ6.
- Einstellungen für die ZWO-Kamera ASI178MM sind:
 - Output Format = SER file (*.ser) (Auto)
 - Colour Space = MONO16
 - High Speed Mode = On
 - Turbo USB = 80
 - Gain = 206
 - Exposure = 3,157 ms
- Zuerst wird auf das Spektrum selbst fokussiert. Dies geschieht am Sol`Ex selbst mit dem Heliofokalauszug, an dem die Kamera sich befindet. Goldene Regel: Lasst Euch bei jedem Fokussieren immer genug Zeit. Sitzt der Fokus nicht, ist die folgende Arbeit für die Katz`.

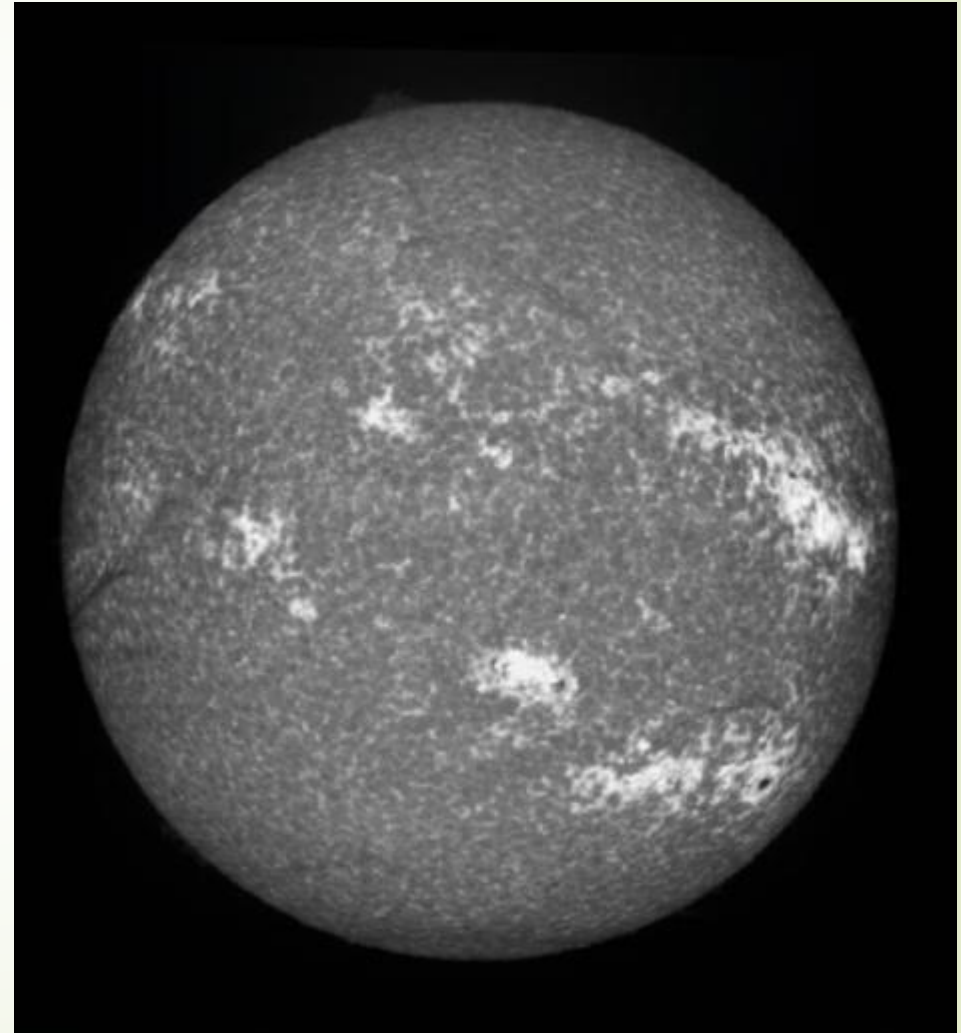
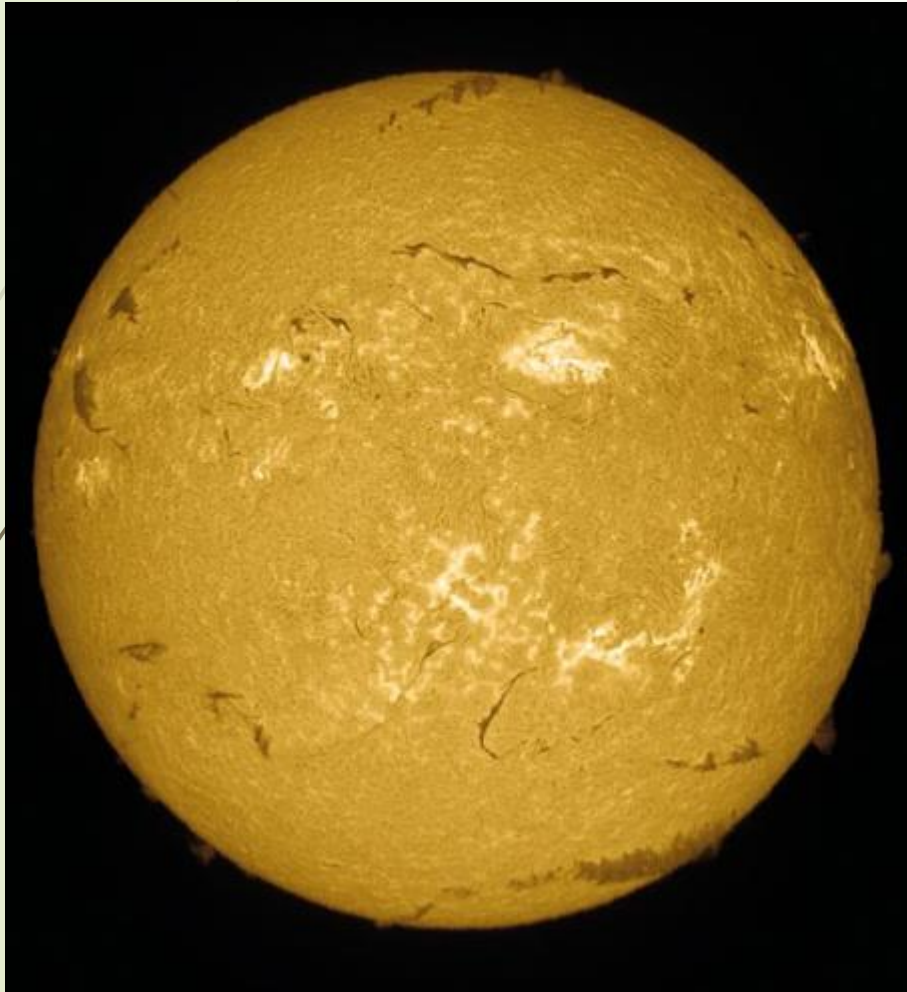
Spektroheliograph Sol'Ex im Einsatz

- Jetzt wird in unserem Falle eine ROI (region of interest) um die Ha-Absorptionslinie gezogen. Da die Linie konstruktionsbedingt etwas gekrümmt ist, sollte die Höhe 120 bis 160 Pixel betragen.
- Ist die Linie zentriert, suchen wir uns den Sonnenrand. Dieser wird nun am Teleskop selbst fokussiert. Auch hier lieber mehr Zeit investieren als zu wenig.
- Da wir die Sonne über die Stundenachse entlang der Rektaszension scannen, bewegen wir das Teleskop mit der Steuerung an den oberen Rand mit der entsprechenden Steuerungstaste. Dabei fällt auf, dass in der Absorptionslinie – senkrecht zum Verlauf – schwarze Linien erscheinen und verschwinden. Das sind die Filamente der Sonne und wir können diese verwenden, um unseren Fokus noch ein wenig zu verbessern.
- Bei der Ca-Linie sieht man weiße Auslöschungen, die ebenfalls hervorragend zum Nachfokussieren geeignet sind. Obacht! Wechselt man die Absorptionslinie, muss das Spektrum noch einmal am Sol'Ex nachfokussiert werden.

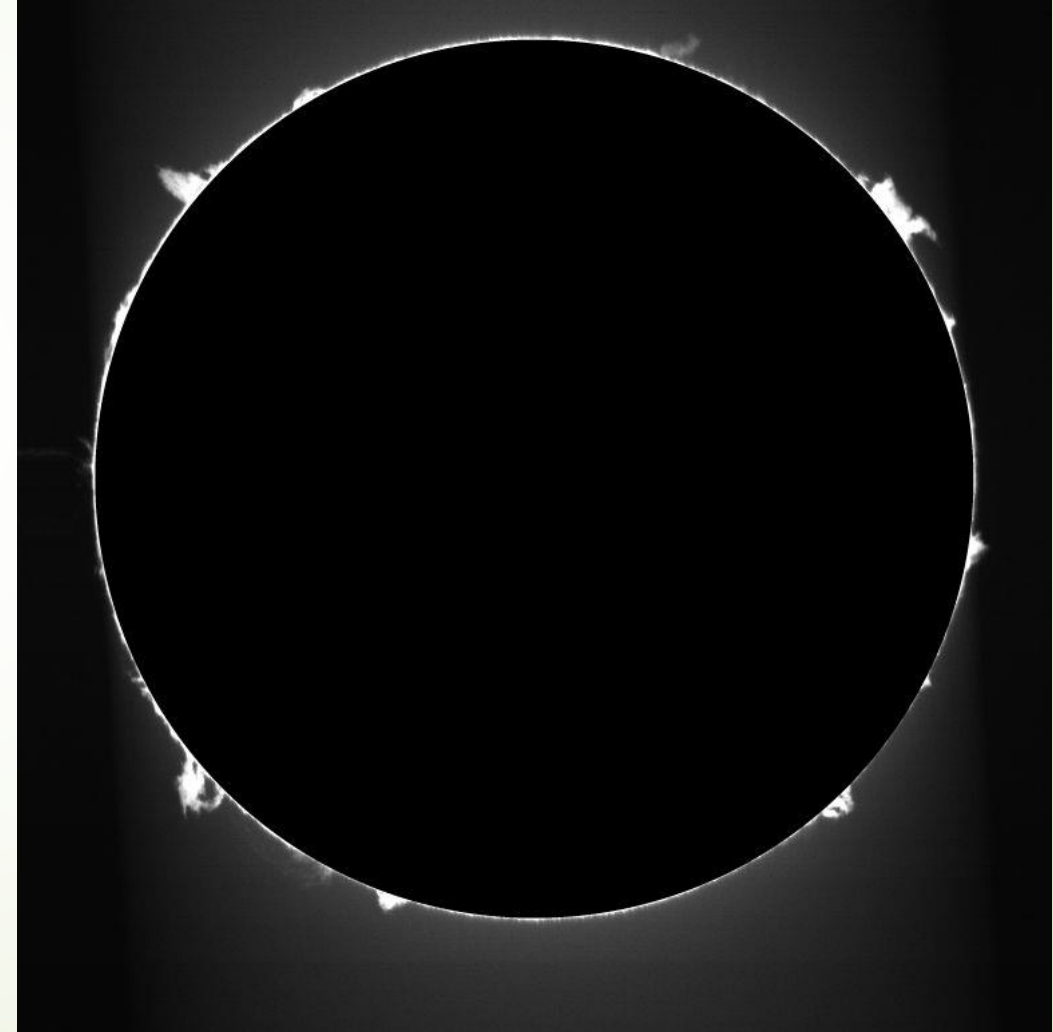
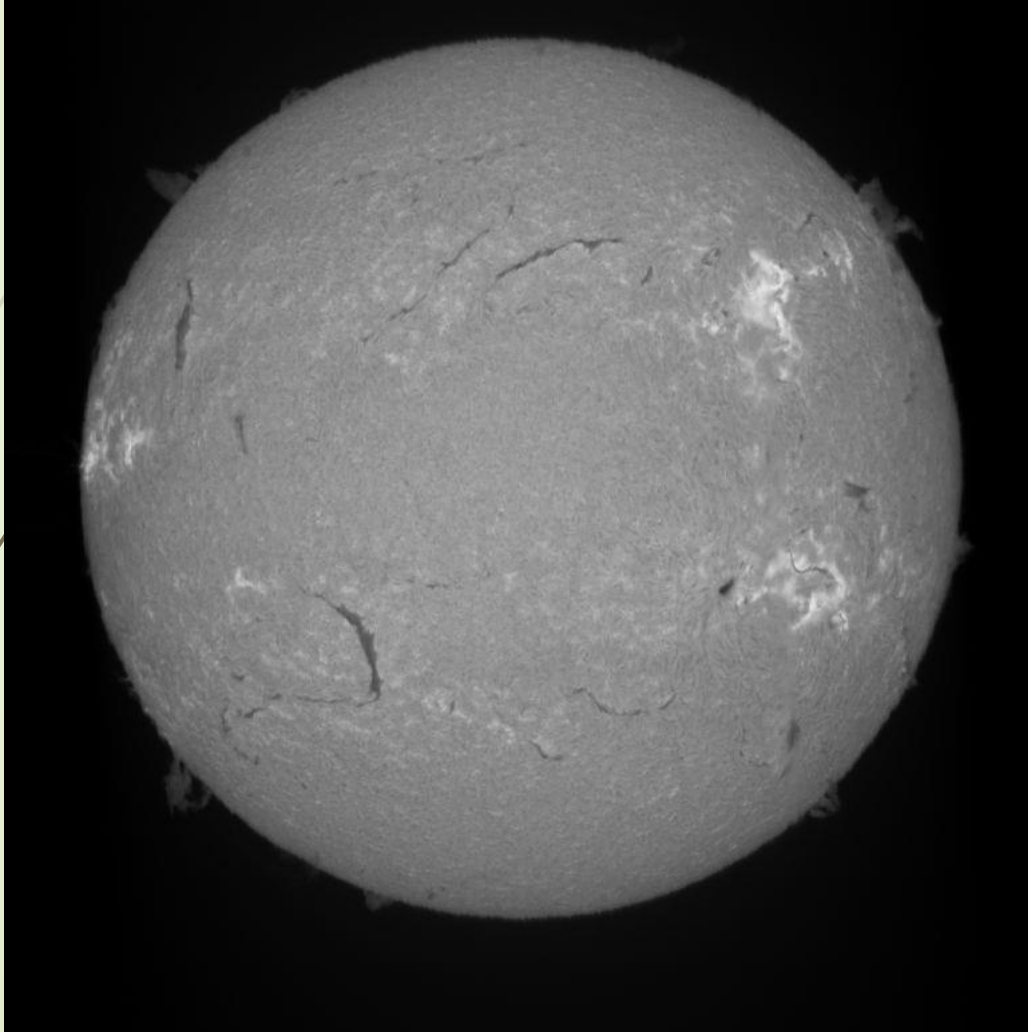
Spektroheliograph Sol'Ex im Einsatz

- Der Scanvorgang selbst hängt wieder von der eigenen Technik ab. In meinem Fall ergibt Rate 2 (8-fache Geschwindigkeit) die besten Ergebnisse. Das muss jeder selbst für sich und sein Equipment herausfinden. Das Teleskop hat eine Brennweite von 350 mm und so passt die Sonne komplett auf den Chip.
- Nun wird die Aufnahme gestartet und die Sonne mit achtfacher Geschwindigkeit durch das Bild bewegt. Es ist auch möglich, die Sonne von unten nach oben, also in umgekehrter Richtung, zu scannen. Pro Bild-abschnitt mache ich mehrere Durchläufe.
- Die Auswertung erfolgt über die beiden Programme, die ich schon erwähnt habe. Welches man bevorzugt, ist wiederum Geschmackssache. Die Software kann einige Aufnahmefehler korrigieren, reagiert allerdings sehr empfindlich auf Verwacklungen. Es sollte also eine Phase zur Aufnahme abgewartet werden, in der es möglichst windstill ist. Die Weiterverarbeitung erfolgt in der Regel mit der üblichen Bildbearbeitung.

Spektroheliograph Beispiele



Spektroheliograph Beispiele



Zusammenfassung

- Teleskop $f=420-450\text{mm}$, der Spalt ist nur 4 mm lang, nur einen Scan
- Kamera Pixelgröße $2-3\mu\text{m}$, ASI178MM, ASI290MM
- Äquatoriale Montierung – Sonne am Spalt vorbei ziehen lassen und SER-File aufnehmen
- Spalt rechtwinklig auf 1° genau senkrecht zur Stundenbewegung
- Nachführgeschwindigkeit über Handsteuerung 4x, 8x und 16x