

Marcus Frischherz, Matrikelnummer 08225094

# 280413-1 Astronomische Instrumente

## Übung 3

### Spektroskopie 1

Ein Spektrograph besitzt bei der Wellenlänge  $\lambda = 500 \text{ nm}$  ein spektrales Auflösungsvermögen von  $R = 2200$ .

a) Berechnen Sie das Wellenlängenelement  $\Delta\lambda$  für dieses Instrument.

Antwort:

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} \Rightarrow \Delta\lambda = \frac{\lambda}{R} \approx 0,227 \text{ nm}$$

b) Wieviele Detektor-Pixel sollten idealerweise das Wellenlängenintervall 450 bis 550 nm abdecken?

Antwort:

Nyquist Kriterium: 2 Pixel pro aufgelöstem Wellenlängenelement.

$$\text{Anzahl Pixel} = 2 \cdot \frac{(550-450)\text{nm}}{0.227\text{nm}} = 880$$

### c) NaD Doublet

Das NaD Doublet (589,0nm, 589,6nm) ist in Sternspektren ein wichtiger Indikator für die Präsenz eines statischen Magnetfeldes (Zeman-Effekt). Wie groß muss die spektrale Auflösung  $R$  mindestens sein, um das NaD Doublet in zwei Einzellinien auflösen zu können (im Sinne des Rayleigh-Kriteriums)? Wird diese Auflösung vom beschriebenen Spektrographen erreicht?

Antwort:

Die beiden Linien liegen 0,6 nm auseinander, und das Wellenlängenelement wurde mit 0,227 nm bestimmt, das heißt: Ja, die Auflösung des gegebenen Spektrographen ist ausreichend.

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{589,6\text{nm}}{0,6\text{nm}} \approx 983$$

Die Auflösung muss mindestens 983 betragen, um die NaD Doublette auflösen zu können.

## Spektroskopie 2

TU Boo ist ein spektroskopischer Doppelstern mit einer Periode von 8 h. Die Massen der beiden Sterne sind 1,1 und 0.44  $M_{\odot}$ . Sie wollen die Radialgeschwindigkeiten der beiden Sterne spektroskopisch messen. Annahme: Sterne bewegen sich auf Kreisbahnen

**a) Welche Radialgeschwindigkeiten würden Sie an Hand der gegebenen Massen erwarten?**

Antwort:

Wir verwenden die Binary Mass function (3. Kepler'sches Gesetz) und nehmen an, dass der Betrachtungswinkel  $\sin i = 1$

$$f = \frac{M_2^3}{(M_1 + M_2)^2} = \frac{T \cdot v_1^3}{2\pi G} \Rightarrow$$

$$v_1 = M_2 \sqrt[3]{\frac{2\pi G}{T(M_1 + M_2)^2}}$$

$$v_2 = M_1 \sqrt[3]{\frac{2\pi G}{T(M_1 + M_2)^2}} = v_1 \frac{M_1}{M_2}$$

```
In [2]: import numpy as np

# Constants
Msun = 1.989e30 # kg
G = 6.67e-11    # Gravitational constant (N m^2/kg^2)
c = 2.998e8     # m/s
hour = 3600     # seconds

M1 = 1.1 * Msun
M2 = 0.44 * Msun

v1 = M2 * (2 * np.pi * G / ( 8 * hour * ((M1 + M2)**2))) ** (1/3)
print (f'v1 = {v1:.0f} m/s = {(v1 / 1000):.1f} km/s')

v2 = M1 * (2 * np.pi * G / ( 8 * hour * ((M1 + M2)**2))) ** (1/3)
print (f'v2 = {v2:.0f} m/s = {(v2 / 1000):.1f} km/s')

v2 = v1 * M1 / M2
print (f'v2 = {v2:.0f} m/s = {(v2 / 1000):.1f} km/s (Kontrolle)')

v1 = 101303 m/s = 101.3 km/s
v2 = 253257 m/s = 253.3 km/s
v2 = 253257 m/s = 253.3 km/s (Kontrolle)
```

## b) Welche spektrale Auflösung benötigen Sie dafür?

Der Intermediate Dispersion Spectrograph (IDS) am 2.5m Isaac Newton Telescope (Kanarische Inseln) hat eine Dispersion von 0.031 nm/pixel bei  $\lambda = 460$  nm. Ist die spektrale Auflösung ausreichend für das Beobachtungsprogramm?

Antwort:

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda}$$

$$\text{Nyquist: 2 pixel pro 0.0031 nm bei 460 nm} \Rightarrow R_{IDS} = \frac{460 \text{ nm}}{2 \cdot 0.031 \text{ nm}} \approx 7420$$

Die Verschiebung der Spektrallinien bei radialer Bewegung beträgt  $\Delta\lambda = \lambda \frac{\Delta v}{c}$

$$R_{min} = \frac{c}{v_1}, \text{ weil } v_2 > v_1$$

```
In [3]: Rmin = c / v1
        print(f'Rmin = {Rmin:.0f}')
```

Rmin = 2959

Die Auflösung ist ausreichend.

## c) Beschreiben Sie kurz wie Sie die Beobachtung und Auswertung durchführen würden.

Antwort:

Bei der Beobachtung ist die Periodenzeit von 8 h zu beachten. Das heißt, die Beobachtungen sollten entweder mindestens 8 h im Stück sein, oder zumindest in verschiedenen Nächten alle Bereiche der Phase enthalten. Gut wäre es, auch eine Spektrallinie, die nicht von TU Boo ist mitzubeobachten, z.B. vom Himmel. In der Auswertung kann die von der Bewegung verursachte Verschiebung dann direkt mit der stationären Linie verglichen werden, was das Kalibrieren erheblich vereinfacht: es muss nicht mehr absolut auf die Wellenlänge kalibriert werden.

## Cassegrain Spektrograph

Am ESO 1.52m Teleskop war über viele Jahre ein Boller & Chivens Cassegrain Spektrograph im Einsatz.

### a)

Berechnen Sie auf Basis der in der Tabelle angegebenen Kenndaten für Teleskop- und Spektrographenoptik (anamorphotischer Vergrößerungsfaktor= 0.8) den Abbildungsmaßstab in der Detektorebene (Pixelgröße des CCDs:  $15 \times 15 \mu m^2$ ).

Welche Spaltbreite müssen Sie wählen, um die maximale spektrale Auflösung zu erreichen (Nyquist Kriterium)?

Telescope Aperture	Telescope f-ratio	Slit Scale	B & C camera f-ratio	Collim. Focal Length	Config. Angle	Camera Focal Length
(m)	(f/)	(" mm <sup>-1</sup> )	(f/)	(mm)	(°)	(mm)
1.52	14.9	9.2	8.3	750	49	127.0

Antwort:

$$\text{Spektrograph: } V = r \frac{f_{\text{Kamera}}}{f_{\text{Kollimator}}} = 0.8 \frac{127}{750} = 0.135$$

$$2 \text{ Pixel} = 30 \mu m. \text{ Spaltbreite } s = \frac{s'}{V} = \frac{30 \mu m}{0.135} = 221 \mu m$$

b)

Sie wollen die Radialgeschwindigkeiten für eine Rotationskurve einer Spiralgalaxie an Hand der H  $\alpha$  ( $\lambda = 656,3 \text{ nm}$ ) Emissionslinie mit einer Genauigkeit von  $\pm 50 \text{ km/s}$  bestimmen. Wählen Sie aus der nachfolgenden Tabelle das optimale Gitter aus. Welcher Gitterwinkel und welche Spaltbreite muss am Spektrographen eingestellt werden?

Grating #	Grooves mm <sup>-1</sup>	Blaze angle	Blaze wavelength, Å	Dispersion		(CCD #39)	
				Order	Å mm <sup>-1</sup>	Å px <sup>-1</sup>	sp. range
1	225	5°20'	7236	1	331	4.96	7000 <sup>a</sup>
			3618	2	165	2.48	2500 <sup>a</sup>
15	300	4°18'	4550	1	246	3.69	7557
25	400	6°30'	5150	1	187	2.81	5755
34	600	7°00'	4000	1	125	1.88	3845
5	900	21°10'	7236	1	87	1.31	2683
			3618	2	43	0.65	1331
20	1200	36°52'	9100	1	64	0.96	1966
			4550	2	32 <sup>b</sup>	0.48	983
33	1200	17°27'	5000	1	65	0.99	2027
32 <sup>c</sup>	2400	31°50'	4000	1	32	0.48	983

Antwort:

$$\Delta\lambda = \lambda \frac{\Delta v}{c}, \Delta\lambda = 50 \text{ km/s}^{-1} \approx 0.11 \text{ nm}$$

$$R_{\min} = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{c}{\Delta v} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{5 \cdot 10^4 \text{ m/s}} = 6000$$

Die Auflösung muss also mindestens 6000 betragen

Für ein geblaztes Gitter muss die Wellenlänge des zu untersuchenden Lichts möglichst gut mit der Blazewellenlänge übereinstimmen. Für 656,3 nm ist das am besten passende Gitter #5 in Ordnung  $m=1$ .

Es hat 900 Linien / mm, die Gitterkonstante  $d = 1 / 900 \text{ mm} = 1111 \text{ nm}$ .

In Littrowanordnung gilt  $\lambda_B = (2d/m) \sin \Theta_B$  bzw.  $\Theta_B = \arcsin(\lambda m / 2d)$

$= \arcsin(656,3 \text{ nm} / 2222 \text{ nm}) = 17^\circ 11' = \text{Gitterwinkel}$ .

Die Dispersion  $D$  für dieses Gitter ist gegeben mit 8.7 nm / mm

Benötigte Spaltbreite

$$s' < \frac{mf_{\text{Kamera}}}{d \cos \beta} \cdot \frac{\lambda}{R}$$

$\beta = 17^\circ 11'$  von oben

$$= \frac{1 \cdot 127 \text{ mm}}{1/900 \text{ mm} \cdot 0.955} \cdot \frac{656.3 \text{ nm}}{6000} = 13.1 \mu \text{ m}$$

$$s = \frac{s'}{V} = \frac{13.1 \mu \text{ m}}{0.135} = 97 \mu \text{ m}$$

c)

Die Ionisationsmechanismen des interstellaren Mediums (Photoionisation vs. Schockionisation) können an Hand folgender Emissionslinienverhältnissen diagnostiziert werden: [N II] (654,8 nm) / Halpha (656,3 nm) und [O III] (500,7 nm) / Hbeta (486,1 nm). Wählen Sie aus der Tabelle ein passendes Gitter aus (zu beachten ist, dass die jeweiligen Linienpaare in Einzellinien aufgelöst sein müssen). Welcher Gitterwinkel und welche Spaltbreite muss am Spektrographen eingestellt werden?

Antwort:

Um eine möglichst hohe Auflösung zu erzielen, wähle ich ein Gitter mit vielen Linien / mm, nämlich #33 mit den Eigenschaften:

1200 Linien / mm, Blazewellenlänge 500 nm, Blaze-Ordnung  $m=1$ , Dispersion 6.5 nm / mm, bzw. 0.099 nm / pixel

Besonders eng liegen N II (654,8 nm) und Halpha (656,3 nm), das gewünschte  $\Delta\lambda$  beträgt also 1,5 nm.

$$R_{\min} = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{656,3}{1,5} \approx 440$$

Die Auflösung muss also mindestens 440 betragen.

Es hat 1200 Linien / mm, die Gitterkonstante  $d = 1 / 1200 \text{ mm} = 833 \text{ nm}$ .

In Littrowanordnung gilt  $\lambda_B = (2d/m) \sin \Theta_B$  bzw.  $\Theta_B = \arcsin(\lambda m / 2d)$   
 $= \arcsin(656,3 \text{ nm} / 1667 \text{ nm}) = 23^\circ 11' = \text{Gitterwinkel}$ .

Die Dispersion D für dieses Gitter ist gegeben mit  $6.5 \text{ nm} / \text{mm}$

Benötigte Spaltbreite

$$s' < \frac{m f_{\text{Kamera}}}{d \cos \beta} \cdot \frac{\lambda}{R}$$

$\beta = 23^\circ 11'$  von oben

$$= \frac{1 \cdot 127 \text{ mm}}{1/1200 \text{ mm} \cdot 0.919} \cdot \frac{656.3 \text{ nm}}{440} = 247.3 \mu \text{ m}$$

$$s = \frac{s'}{V} = \frac{247.3 \mu \text{ m}}{0.135} = 1832 \mu \text{ m}$$

## Langspalt Spektrograph

### Spektroskopie bei hoher Rotverschiebung

Beim QSO CXO J084837.9-445352 ist eine Rotverschiebung von  $z = 3.288$  gemessen worden. Der QSO besitzt eine scheinbare Helligkeit von  $m_R = 24.95 \text{ mag}$  im R Filter.

a)

Welcher Ruhewellenlänge entspricht die R Band ( $\lambda_R = 647,5 \text{ nm}$ ) Aufnahme?

Antwort:

$$z = \frac{\lambda_R}{\lambda_0} - 1$$

$$z + 1 = \frac{\lambda_R}{\lambda_0}$$

$$\lambda_0 = \frac{\lambda_R}{z+1} = 151 \text{ nm}$$

b)

Sie wollen die Lyman alpha Linie ( $\text{Ly-}\alpha = 121,6 \text{ nm}$ ) mit dem assoziierten Ly- $\alpha$  Wald bei

diesem QSO mit dem ESO Instrument FORS2 spektroskopisch beobachten (siehe <http://www.eso.org/sci/facilities/paranal/instruments/index.html>). Wählen Sie ein für diese Beobachtungen geeignetes Grism aus (siehe <http://www.eso.org/sci/facilities/paranal/instruments/fors/inst/grisms.html>).

Auswahlkriterien sind dabei der abgedeckte Wellenlängenbereich und eine möglichst hohe Transmission des Grisms (N.B. der Ly- $\alpha$  Wald erstreckt sich typischerweise über einen Wellenlängenbereich von 120 nm auf der kurzwellenlängigen Seite von Ly- $\alpha$ ).

Antwort:

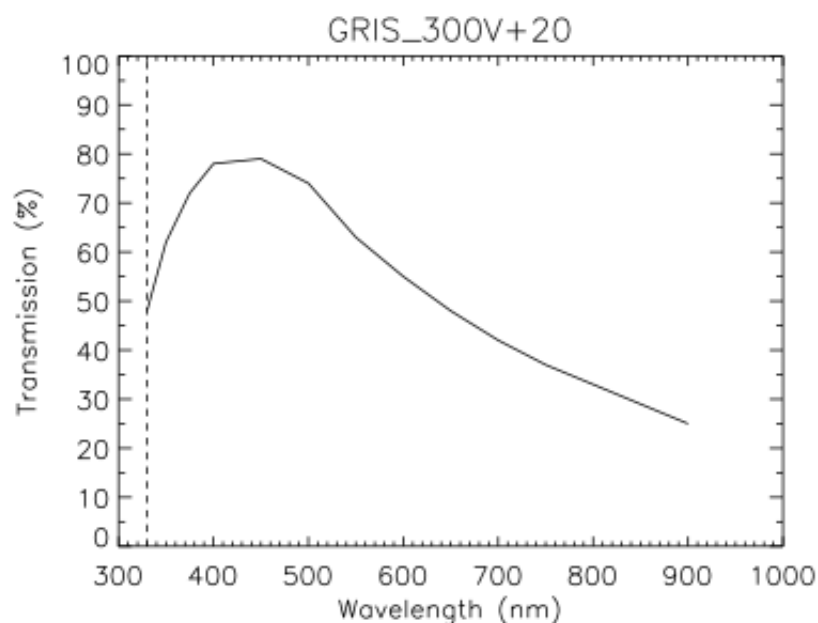
$$z = \frac{\lambda_R}{\lambda_0} - 1$$

$$\lambda_R = (z + 1) \cdot \lambda_0$$

Für Ly- $\alpha$ :  $\lambda_R = 521,4 \text{ nm}$

Wir wollen also zwischen 400 nm und 525 nm beobachten.

Der Vergleich der Tabelle, die oben verlinkt ist, mit dem User Manual zeigt leider eine Diskrepanz: Nicht alle Filter aus der Tabelle sind im Manual, und umgekehrt. Laut Manual, Appendix C.1 gibt es ein Grism GRIS\_300V+20, das besonders geeignet erscheint:

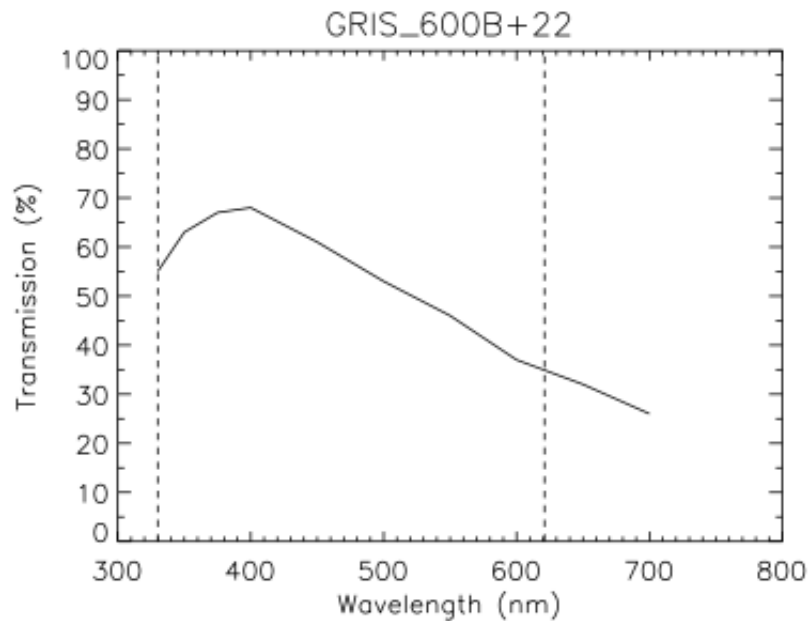


Weil es genau im interessanten Bereich eine sehr gute Transmission hat. Aber es steht nicht in der Tabelle:

Grism name + ESO number	Lambda Central	Wavelength range	Dispersion	Order separation
	[nm]	[nm]	[Å/mm]	filter
standard:				
GRIS_600B+22	465	330 - 621	50	none
GRIS_600V+94	581	443 - 737	49	GG435
GRIS_600R+14	628	501 - 769	45	GG435
GRIS_600I+25	794	663 - 939	44	OG590
GRIS_300V+10 (1)	590	330 - (660)	112	none
GRIS_300V+10	590	445 - 865	112	GG435
GRIS_300I+11	860	600 - 1100	108	OG590
GRIS_200I+28 (2)	743	560 - 1100	162	none
GRIS_150I+27 (1)	720	330 - (650)	225	none
GRIS_150I+27 (1)	720	445 - (880)	230	GG435
GRIS_150I+27	720	600 - 1100	230	OG590
holographic:				
GRIS_1400V+18	520	456 - 586	20.8	none
GRIS_1200B+97	435	366 - 511	24.0	none
GRIS_1200R+93	650	575 - 731	25.0	GG435
GRIS_1200g+96	486	417 - 564	24.3	none
GRIS_1028z+29	860	773 - 948	28.3	OG590
GRIS_600RI+19	678	512 - 845	55	GG435
GRIS_600z+23	901	737 - 1070	54	OG590

Das müsste jetzt mit ESO gekärt werden. Als Alternative bleibt das GRIS\_600B+22, das sowohl im Manual als auch in der Tabelle steht, allerdings eine etwas geringere Transmission hat:





In [ ]:

c)

Schätzen Sie für das gewählte Setup die Integrationszeit ab, die Sie für die Aufnahme eines Spektrums benötigen würden.

[http://www.eso.org/observing/etc/bin/gen/form?](http://www.eso.org/observing/etc/bin/gen/form?INS.NAME=FORIS+INS.MODE=spectro)

[INS.NAME=FORIS+INS.MODE=spectro](#) N.B.: Behandeln Sie den QSO als Punktquelle, verwenden Sie die default Parameter für den Himmelshintergrund („override almanac sky parameters“), beachten Sie, dass auch die Spaltbreite und Detektorwahl die Belichtungszeit beeinflusst!

Es ist praktisch nicht möglich mit diesem Instrument diese Beobachtung zu machen. Die Berechnung des Web-Rechners hat einen Cutoff bei 1 Mio sec, und um irgend einen niedrigeren Wert zu erreichen, muss die größte Spaltbreite (2.5") und ein total unbrauchbares SN Verhältnis von 2 gewählt werden, und dann sind es immer noch 740000 sec, also wesentlich mehr, als im User Mode erlaubt ist:

Warning: Please be aware that without a waiver there is a one-hour execution time limit for Service Mode OBs, and that the times returned here do not include instrument overheads, times for sky measurements, etc. Thus, care must be taken to allow for these additional times when constructing compliant OBs.

## Spektrographengitter

Ein quadratisches Gitter mit einer Seitenlänge von 5 cm besitzt 40 Linien/mm.

a) Berechnen Sie das spektrale Auflösungsvermögen des Gitters für  $m = 2$

Antwort:

$$R = N m$$

mit

N..Anzahl der Linien m..Ordnung

$$N = 50 \text{ mm} * 40 \text{ Linien / mm} = 2000 \text{ Linien} \quad R = 2 * 2000 = 4000$$

b)

Berechnen Sie die Wellenlängen bei denen konstruktive Interferenz auftritt für einen Einfallswinkel von  $30^\circ$  und einem Austrittswinkel von  $-30^\circ$

Antwort:

$$\text{Littrow: Einfallswinkel} = \text{Ausfallswinkel} \quad m\lambda = 2d \sin \Theta$$

$$d = 1 / 40 \text{ mm} = 25 \text{ Micron}$$

$$\sin 30^\circ = 1/2$$

$$\lambda = 1 / m * 25 \text{ Micron}$$

c)

Das Gitter ist als Blaze-Gitter ausgeführt wobei Einfallswinkel = Austrittswinkel =  $30^\circ$  ist. Berechnen Sie die Blaze-Wellenlänge für  $m = 50$