

**Astronomia Observacional:
OBTENCIÓ I REDUCCIÓ D'ESPECTRES
ESTEL·LARS AMB CCD
CLASSIFICACIÓ I CÀLCUL DE VELOCITATS
RADIALS**

Laura Ruiz Dern
Dídac Pérez Peña
Montse Subirà Vallès
Sergi Blanco Cuaresma

Taula de continguts

1.Objectius.....	4
2.Material previ.....	4
3.Instrumentació.....	6
3.1.Telescopi MEADE LX200.....	6
3.2.Càmera CCD model ST8.....	6
3.3.Espectrògraf SBIG model SGS.....	7
4.4. Desenvolupament de la pràctica.....	7
4.1.Metodologia de treball.....	7
5.5. Tractament de dades.....	8
5.1.Selecció de dades.....	8
5.2.Tractament de dades.....	9
5.2.1.Baixa resolució.....	12
5.2.1.1.Bloc 1.....	12
5.2.1.2.Bloc 2.....	16
5.2.1.3.Bloc 3.....	18
5.2.1.4.Bloc 4.....	20
5.2.1.5.Bloc 5.....	24
5.2.1.6.Bloc 6.....	28
5.2.2.Alta Resolució.....	32
5.2.2.1.Bloc 1.....	33
5.2.2.2.Bloc 2.....	37
5.2.2.3.Bloc 3.....	40
6.Conclusions.....	44
7.Bibliografia.....	45

1. Objectius

L'objectiu d'aquesta pràctica és obtenir espectres d'estrelles diferents amb alta i baixa resolució, per tal de classificar-les espectralment. Pel cas de les d'alta resolució, l'anàlisi es centra també en l'obtenció de les velocitats radials de les estrelles seleccionades.

Aquest document presenta els resultats de la pràctica, així com les decisions i valoracions més importants. Per altra banda, el detall del procés de reducció i extracció d'espectres amb IRAF ha estat descrit en un informe separat "Guia de referència per l'anàlisi d'espectres amb IRAF".

2. Material previ

Per a la realització de la pràctica es van preparar dos llistats d'estrelles independents, un per a dur a terme espectres de baixa resolució i l'altre per als d'alta. Els criteris aplicats en cada cas van ser els següents:

Baixa resolució:

- Selecció de 10-15 estrelles
- Prioritat per les 'alfa' de cada constel·lació (les més brillants)
- Ampli ventall de tipus espectrals (O, B, A, F, G, K, M)
- Bona visibilitat durant la nit

Alta resolució:

- Selecció de tres estrelles amb velocitats radials superior, inferior i pròxima a zero, respectivament
- Magnitud inferior a 6-7
- Prioritat als tipus espectrals: O, B i A
- Bona visibilitat durant la nit

Les següents taules mostren la selecció obtinguda de la base de dades del *Simbad*¹ havent validat prèviament la seva visibilitat mitjançant la web d'*Staralt*²:

1. <http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/sim-fid>

2. <http://catserver.ing.iac.es/staralt/>

BAIXA RESOLUCIÓ

Estrella			Ascensió recta			Declinació			Magnitud	Tipus espectral
			h	m	s	°	'	"		
Regulus	HD87901	SAO 98967	10	08	22,31	+11	58	1,95	1,35	B7V
Dubhe	HR4301	SAO 15384	11	3	43,67	+61	45	3,72	1,79	K0I
Alderamin	HD203280	SAO 19302	21	18	34,77	+62	35	8,06	2,46	A7IV
Alphard	HD81797	SAO 136871	09	27	35,24	-08	39	30,97	2,00	K3III
Procyon	HD61241	SAO 115756	07	39	18,11	+05	13	29,98	0,34	F5V
Castor	HD60178J	SAO 60198	07	34	35,86	+31	53	17,80	1,59	A2V
Kochab	HD131873	SAO 8102	14	50	42,33	+74	9	19,82	2,08	K4III
Beta Leo	HD102547	SAO 99809	11	49	3,58	+14	34	19,42	2,14	A3V
Beta Cmi	HD58715	SAO 115456	07	27	9,04	+08	17	21,54	2,89	B8V
Meissa	HD 36861J	SAO 112921	05	35	8,28	+09	56	2,99	3,39	O8III
Beta Tauri	HD35497	SAO 77168	05	26	17,51	+28	36	26,82	1,68	B7III
Thuban	HD123299	SAO 16273	14	04	23,35	+64	22	33,06	3,68	AO3
Menkalinan	HD 40183	SAO 40750	05	59	31,77	+44	56	50,77	1,90	A2IV
Sirius A	HD48915	SAO 151881	06	45	8,92	-16	42	58,02	-1,47	A1V
Betelgeuse	HD 39801	SAO 113271	05	55	10,29	+07	24	25,33	0,42	M2Iab
Merak	HD95418	SAO 27876	11	01	50,48	+56	22	56,74	2,35	A1V
Pollux	HD62509	SAO 79666	07	45	18,95	+28	01	34,31	1,15	K0IIIB
Beta Cma	HD44743	SAO 151428	06	22	41,99	-17	57	21,30	2,00	B1II-III
Aldebaran	HD29139	SAO 94027	04	35	55,24	+16	30	33,49	0,99	K5III
Cappella	HD34029	SAO 40186	05	16	41,36	+45	59	52,77	0,08	G5IIle+

ALTA RESOLUCIÓ

	Estrella		Ascensió recta		Declinació		Velocitat radial	Mag V	Tipus espectral
$v_r < 0$	LHS 44	HD 103095	11 52 58,77		+37 43 07,24		-98,0	6,45	G8Vp
	HR 4383	SAO 15478	11 20 53,77		+67 06 02,64		-56,2	6,21	G8
	HR 4264	SAO 43535	10 56 14,52		+42 00 29,36		-55,5	6,04	K2III
	HD 94190	SAO 7237	10 55 13,02		+77 05 15,24		-85,6	6,86	M3III
	HD 91948	SAO 15243	10 38 19,87		+60 07 28,30		-65,0	6,79	F6V
	HD 91564	SAO 43390	10 35 08,59		+41 54 32,14		-57,8	6,94	K5
	HD 76169	SAO 27052	08 56 56,95		+56 53 20,17		-55,6	6,96	K2
	HD 75959	SAO 61125	08 54 14,73		+30 34 44,81		-60,1	5,42	G7III
	LTT 12137	SAO 60611	08 10 11,48		+35 27 17,95		-54,8	6,61	F8
	HD 119581	SAO 16143	13 42 06,45		+65 16 23,11		-64,0	6,61	A2
	HR 5216	SAO 28901	13 50 27,74		+58 32 22,05		-40,0	6,46	A3V

	Estrella		Ascensió recta		Declinació		Velocitat radial	Mag V	Tipus espectral
$v_r \sim 0$	HR 2969	SAO 26488	07 44 04,18		+50 26 01,66		0,0	5,32	A0IIIn
	* f UMa	SAO 27136	09 08 52,26		+51 36 16,73		-0,1	1,83	A1m
	HR 4283	SAO 27868	11 00 25,55		+51 30 07,57		0,0	6,39	G9III
	BD+38 2025A	SAO 61411	09 20 59,40		+38 11 19,00		0,6	4,07	F2V
	* 32 Lyn	SAO 60896	08 33 21,73		+36 26 11,15		0,0	6,20	F5Vbwv
	HD 100235	SAO 62590	11 32 12,53		+36 14 50,11		0,9	6,59	K0
	HR 4581	SAO 62784	11 59 17,54		+33 10 01,21		-0,7	5,96	K1III
	HR 4521	SAO 28142	11 46 55,62		+55 37 41,48		0,6	5,26	K3III

$v_r > 0$

Estrella		Ascensió recta	Declinació	Velocitat radial	Mag V	Tipus espectral
HD 85829	SAO 27432	09 56 06,02	+52 16 08,34	58,1	6,63	K0
HR 3511	SAO 42581	08 52 10,03	+42 00 09,85	52,7	5,99	K0III
HD 63793	SAO 60396	07 52 08,46	+36 10 09,06	60,0	6,92	M0
* 32 Cnc	SAO 80245	08 33 00,10	+24 05 05,25	74,7	6,34	G9III
HR 3664	SAO 61361	09 15 14,25	+34 38 00,66	56,4	5,99	G6III
LHS 2216	SAO 61808	10 01 00,66	+31 55 25,22	56,0	5,40	G3Va
HD 100041	SAO 81863	11 30 54.88	+28 27 05.65	82,7	6.78	MIII

3. Instrumentació

3.1. Telescopi MEADE LX200

El telescopi MEADE LX200 és un telescopi de diàmetre d'obertura de 400mm i distància focal de 4064 mm. Té una raó focal f/10 i una muntura *Paramount* equatorial (és a dir, que treballa amb el sistema de coordenades equatorial).

Es tracta d'un reflector Schmidt-Cassegrain format pels següents elements principals alineats simètricament respecte l'eix òptic:

- Mirall primari: situat a la part superior del cos del telescopi. Té forma còncaua parabòidala ja que la seva funció és concentrar tota la llum que recull en un punt (el focus).
- Mirall secundari: situat a la part davantera del telescopi, de forma convexa hiperbòlica. Reflecteix els raigs provinents del primer mirall dirigint-los al segon focus, extern al tub del telscopi, a on es forma la imatge.
- Placa correctora (lent d'Schmidt): lent especial adossada al mirall secundari. Permet corregir l'aberració produïda en el mirall primari.
- Buscador: permet trobar l'objecte més fàcilment abans de centrar-lo amb l'ocular.

3.2. Càmera CCD model ST8

Les característiques principals de la càmera CCD ST-8 utilitzada són les següents:

- Xip: KODAK KAF-1603ME de 1530x1020 píxels, cadascun d'ells de 9x9µm
- Sensibilitat: 2.5 electrons per ADU (*Analogic Digital Unit*, és a dir, cada unitat en la imatge digital ha estat produïda per 2.5 electrons)
- *Read-out noise* (RON): 15 electrons per píxel que equivalen a 15electrons x (1ADU/2.5electrons) = 6ADU per píxel.

- Bits per píxel: 16 bits
- Nombre màxim de comptes: $2^{16} = 65.536$
- Temperatures de treball: 20-25°C per sota de la temperatura ambient (mínim -25°C)

3.3. Espectrògraf SBIG model SGS

L'espectrògraf permet obtenir espectres i enregistrar-los mitjançant una càmera o detector CCD. Concretament, l'espectrògraf emprat en la pràctica (SBIG *Self-Guiding Spectrograph*) està acoblat a una càmera CCD ST-8 com la detallada en l'apartat anterior. Els elements principals són:

- Escletxa: amplades de 18µm i 72µm
- Xarxes de difracció: funcionen per reflexió a 150línies/mm per a baixa resolució i 600línies/mm per a alta resolució. El canvi d'una a l'altra es duu a terme a través d'una palanca commutadora
- Cargol micromètric: permet desplaçar la xarxa de difracció per tal de centrar l'espectre
- Xip d'autoguiat: xip que no passa per la xarxa de difracció. El pas de llum per aquest es governa a través d'una altra palanca commutadora
- LED: permet il·luminar l'escletxa per al centrat de l'estrella

4. 4. Desenvolupament de la pràctica

4.1. Metodologia de treball

L'observació es va dur a terme al Centre d'Observació de l'Univers del Montsec (COU)

Declinació	44' 12"
Altitud	~800 m sobre el nivell del mar
Dia d'observació	05/04/2011
Franja horària	19.00 – 00.00 UT

Un cop iniciat el telescopi i amb els programes *The Sky* (amb sistema de seguiment especial *ProTrack* activat) i *CCDOps* (per tal de connectar la càmera CCD amb l'ordinador i poder adquirir les imatges dels espectres) en funcionament, es va refredar la càmera CCD a -10°C, es va ajustar el micròmetre amb el doblet al mig, es va centrar l'escletxa i es va procedir a realitzar els espectres de baixa resolució.

Després de certs problemes inicials amb la CCD, pels quals no s'obtenia res en analitzar la làmpada de calibració, es van seleccionar sis estrelles per a baixa resolució. Per falta de temps, degut als incidents del començament, no es va poder fer alta resolució. Tot i així, el procediment a seguir és el mateix, en aquest cas amb el micròmetre de tal manera que el doblet estigui a l'esquerra i la banda estreta a la dreta, i la palanca commutadora cap avall.

El procediment seguit va ser el següent:

1. Espectre de la làmpada a 10 segons d'exposició amb palanca commutadora cap amunt (baixa resolució)
2. Extracció dels espectres de les estrelles: Meissa, Betelgeuse, Menkalinan, Procyon, Polux i Castor, a 30 segons d'exposició
3. Obtenció de darks a 10 i 30 segons.

5. 5. Tractament de dades

5.1. Selecció de dades

Donat que no es va poder realitzar alta resolució i, per tal de poder fer un anàlisi més complert de classificació d'estrelles segons el tipus espectral i de determinació de velocitats pel cas d'alta resolució, s'ha optat per prendre els espectres de tots els grups. Com que molts d'ells van fer mesures de les mateixes estrelles, s'han realitzat els espectres de totes i després s'han escollit els millors de cadascuna per tal de poder-ne fer una classificació més acurada.

Les següents taules recullen totes les estrelles observades i analitzades de cada grup:

BAIXA RESOLUCIÓ					
1A	2A	3A	4A	5A	6A
Algieba Regulus Zosma	Capella Denebola Gamma Virgo Regulus Saturn Spica	Betelgeuse Castor Meissa Menkalinan Pollux Procyon	Arcturus Denebola Nekkar Regulus Saturn Spica	Alphard B Canis Minor Capella Castor Mebstuta Menkalinan Pollux Procyon Regulus	Bellatrix Betelgeuse Castor Meissa Mintaka Procyon Propus Saturn

ALTA RESOLUCIÓ					
1A	2A	3A	4A	5A	6A
HD 81192_1	SAO 58636 _1		HIP 28634 _1		SAO 28142_1
HD 81192_2	SAO 69896 _1		HIP 28634 _2		SAO 28142_2
HD 81192_3	SAO 69896 _2		HIP 28634 _3		SAO 81863_1
HD 81192_4	SAO 61125 _1		HIP 230247 _1		SAO 81863_2
HIP 57939_1	SAO 61125 _2		HIP 230247 _2		
HIP 57939_2	SAO 61125 _3		HIP 230247 _3		
HIP 57939_3	SAO 61808 _1		HIP 35136 _1		
SAO 77800 _1	SAO 61808 _2		HIP 35136 _2		
SAO 77800 _2	SAO 61808 _3		HIP 35136 _3		
SAO 77800 _3					

A continuació s'especifica la selecció de dades que es presenten a l'informe en funció del grup. Donat que per a alta resolució no es va repetir l'observació de cap estrella, totes han estat seleccionades per al posterior anàlisi.

GRUP	ALTA RESOLUCIÓ	BAIXA RESOLUCIÓ
1A	HD 81192_3 HIP 57939_3 SAO 77800 _2	Algieba Regulus Zosma
2A	SAO 58636 _1 SAO 69896 _1 SAO 61125 _1 SAO 61808 _3	Capella Gamma Virgo_45 Saturn
3A		Betelgeuse Procyon
4A	HIP 28634_1 HIP 30247_1 HIP 35136_2	Arcturus Denébola Nekkar Spica
5A		Alphard B Canis Minor Mebisuta Menkalinan Pollux
6A	SAO 28142_2 SAO 81863_2	Bellatrix Castor Meissa Mintaka Propus

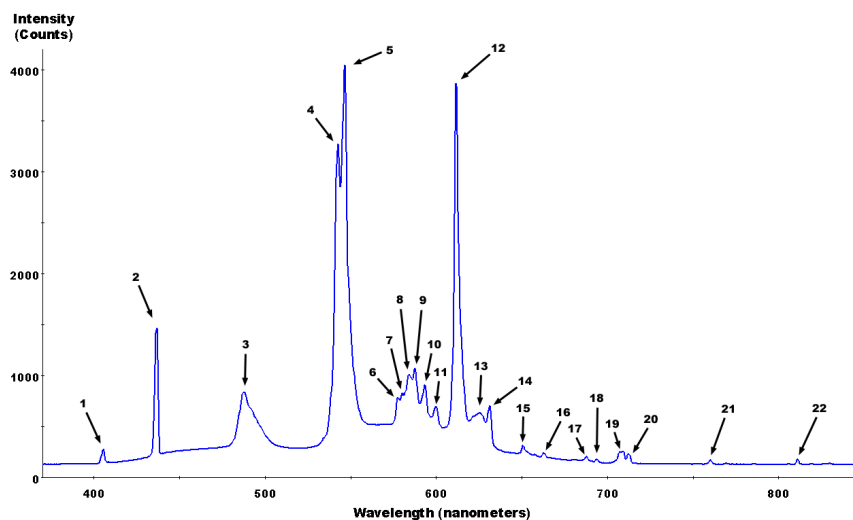
5.2. Tractament de dades

Per extreure prèviament els espectres de totes les estrelles per tal de poder-los classificar, s'han emprat dues vies equivalents:

1. Tractament amb els programes *CCDOps*, *Spectra* i *Excel*:
 - reducció d'imatges (extreure dark, fer un binningX2 i fer un crop) amb *CCDOps*
 - obtenció del fitxer de text de l'espectre de cada estrella i làmpada amb el programa *Spectra*

- representació de cada làmpada (intensitat vs píxel)
 - calibració de cada làmpada, identificant línies en l'espectre i associant-les als seus valors teòrics, segons la imatge i la taula posteriors
 - obtenció de la funció lineal que associa píxels i longituds d'ona per cada làmpada
 - representació dels espectres de cada estrella tenint en compte la conversió de píxels a longituds d'ona, determinada en funció de l'espectre de la làmpada corresponent a un mateix grup (cada grup té una imatge de la làmpada de calibració)
2. Tractament amb l'entorn IRAF (s'explica amb major detall a la Guia de referència per a l'anàlisi d'espectres amb IRAF, que s'adjunta al present informe)
- reducció d'imatges (combinació de darks i extracció)
 - obtenció d'espectres per cada estrella, ajustant per mínims quadrats la traça (aquesta no té per què ser perfectament perpendicular a la imatge), determinació del fons de cel i extracció
 - calibració de les làmpades (per trobar el centre dels pics de les línies seleccionades per l'usuari, *IRAF* realitza un ajustament gaussià) i modificació de les coordenades dels espectres extrets
 - mesura de les línies mitjançant ajustaments gaussians, proporcionant major precisió que la selecció manual del màxim/mínim

L'espectre teòric de les làmpades³ emprat junt amb les línies associades és el següent:



3. http://en.wikipedia.org/wiki/File:Fluorescent_lighting_spectrum_peaks_labelled.png

Peak number	Wavelength of peak (nm)	Species producing peak	Actual line location (nm)
1	405.4	mercury	404.656
2	436.6	mercury	435.833
3	487.7	terbium from Tb ³⁺	~485 to 490
4	542.4	terbium from Tb ³⁺	~543 to 544
5	546.5	mercury	546.074
6	577.7	likely terbium from Tb ³⁺ or mercury	576.960 for Hg or ~578 for Tb
7	580.2	mercury or terbium from Tb ³⁺	579.066 for Hg or ~580 for Tb
8	584.0	possibly terbium from Tb ³⁺ or europium in Eu ³⁺ :Y ₂ O ₃	~580
9	587.6	likely europium in Eu ³⁺ :Y ₂ O ₃	~587
10	593.4	likely europium in Eu ³⁺ :Y ₂ O ₃	~593
11	599.7	likely europium in Eu ³⁺ :Y ₂ O ₃	~598
12	611.6	europium in Eu ³⁺ :Y ₂ O ₃	~611
13	625.7	likely terbium from Tb ³⁺	~625
14	631.1	likely europium in Eu ³⁺ :Y ₂ O ₃	~630
15	650.8	likely europium in Eu ³⁺ :Y ₂ O ₃	~650
16	662.6	likely europium in Eu ³⁺ :Y ₂ O ₃	~661
17	687.7	likely europium in Eu ³⁺ :Y ₂ O ₃	~687-688
18	693.7	likely europium in Eu ³⁺ :Y ₂ O ₃	~693
19	707 and 709	likely europium in Eu ³⁺ :Y ₂ O ₃	~707 and ~709
20	712.3	likely europium in Eu ³⁺ :Y ₂ O ₃	~712
21	760.0	likely argon	758.9315 or 763.5106 (??)
22	811.0	likely argon	811.531

Note that the terbium could be either Tb³⁺, Ce³⁺:LaPO₄ or Tb³⁺:CeMgAl₁₁O₁₉.

Per tal de no ser redundants en la redacció de l'informe, tot i haver emprat les dues vies d'anàlisi, a continuació, en els següents apartats, es presenta el seguit d'estrelles avaluades incloent part dels dos tractaments.

Per cada grup d'estrelles associades a una mateixa làmpada es presenta:

1. Làmpada de calibració:

- imatge de l'espectre de la làmpada de calibració extret amb *CCDOps* sense dark
- representació de l'espectre de la làmpada de calibració obtingut amb *IRAF*
- funció lineal de calibració de cada làmpada, incloent les línies que han estat identificades. Per a aquest punt, cal especificar que, per determinar el valor del píxel experimental dels pics identificats, enlloc de fer-ho per inspecció visual directa, s'han ajustat gaussianes amb l'entorn *IRAF*, obtenint així un valor més precís d'aquest píxel i, per tant, de la funció
- càlcul de la dispersió Å/píxel i Å/mm tenint en compte que amb *CCDOps* s'ha fet un binning x2 (és a dir, hi ha més amstrongs a cada píxel) i que la grandària del píxel de la càmera emprada són 9 micres:

$$\sigma\left(\frac{\text{\AA}}{\text{píxel}}\right)=\frac{\lambda_{\max}(\text{\AA})-\lambda_{\min}(\text{\AA})}{2 \cdot n^{\circ}\text{total píxels}} \quad \text{i} \quad \sigma\left(\frac{\text{\AA}}{\text{mm}}\right)=\frac{\lambda_{\max}(\text{\AA})-\lambda_{\min}(\text{\AA})}{2 \cdot n^{\circ}\text{total píxels}} \cdot \frac{1 \text{ píxel}}{9 \cdot 10^{-3} \text{ mm}}$$

on λ_{\max} i λ_{\min} corresponent al rang de longituds d'ona que abasta la calibració de la làmpada

2. Estrelles associades:

- característiques principals teòriques de l'estrella extretes de la base de dades del *Simbad*
- imatge de l'espectre extret amb *CCDOps* sense dark i girat horitzontalment per coincidir amb l'espectre

extret amb longituds d'ones creixents

- representació de l'espectre de l'estrella obtingut amb *IRAF*, fent zoom a la zona il·luminada
- (en baixa resolució) classificació espectral de l'estrella a partir dels atles:
 - *Identification List of Lines in Stellar Spectra (ILLSS)*⁴
 - Optical (nebular) spectral lines. *European Southern Observatory*⁵
 - *Fast Stellar Spectral Atlas*⁶
 - *Stellar Library for stellar population synthesis models (STELIB)*⁷
 - *A Digital Spectral Classification Atlas*⁸
- (en alta resolució) identificació amb *IRAF* de diverses línies espectrals utilitzant les imatges FITS de STELIB com a mapa (en funció del tipus espectral de l'estrella, obtingut de *Simbad*⁹) i obtenint la informació específica de les línies segons el catàleg de ILLSS. Finalment, un cop localitzades les línies d'interès segons el tipus d'estrella, s'ha mesurat el valor de la longitud d'ona dels pics ajustant gaussianes, per tal de determinar la velocitat radial per efecte Doppler

5.2.1. Baixa resolució

Tenint en compte les estrelles seleccionades per baixa resolució, a continuació es presenta la classificació espectral de cadascuna d'elles. Donat que per cada grup es té una imatge de l'espectre de la làmpada de calibració, s'agrupen les estrelles en blocs (cada bloc correspon a un grup), iniciant aquests amb la corresponent làmpada amb la que s'han calibrat els espectres.

BLOC 1	BLOC 2	BLOC 3	BLOC 4	BLOC 5	BLOC 6
Algieba Regulus Zosma	Capella Gamma Virgo Saturn	Betelgeuse Procyon	Arcturus Denébola Nekkar Spica	Alphard B Canis Minor Mebstuta Menkalinan Pollux	Bellatrix Castor Meissa Mintaka Propus

Cal fer notar que els valors presentats que indiquen a on s'observa la línia han estat obtinguts mitjançant inspecció visual directa i, per tant, la seva funció és exclusivament orientativa.

4. <http://cdsarc.u-strasbg.fr/viz-bin/>

5. <http://www.eso.org/~mwestmoq/lines.html>

6. <https://www.cfa.harvard.edu/~pberlind/atlas/atframes.html>

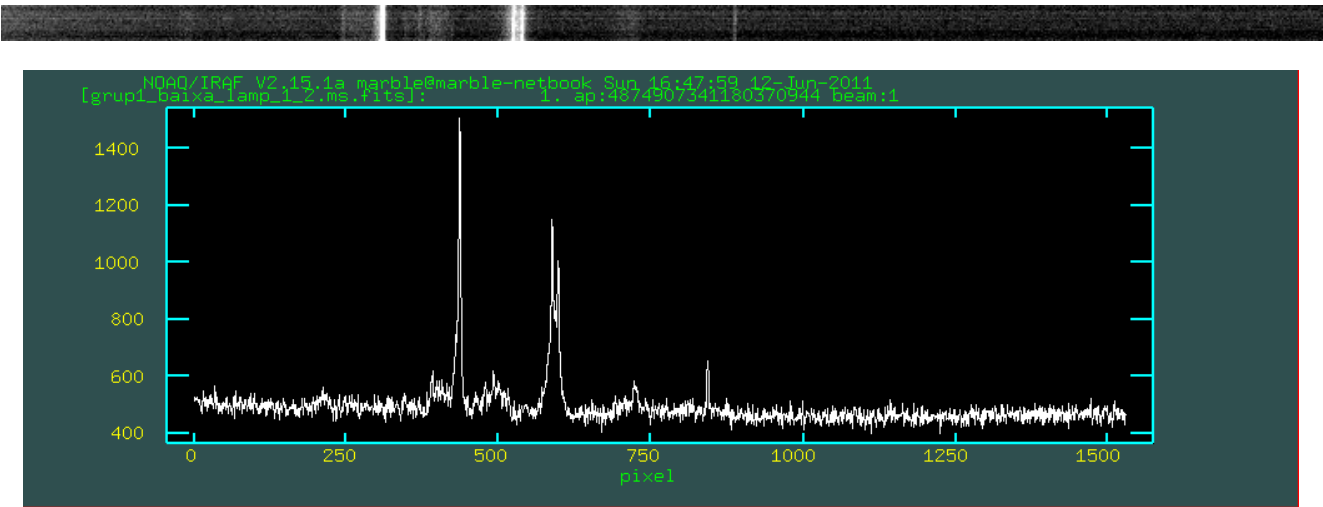
7. <http://www.ast.obs-mip.fr/article181.html>

8. http://ned.ipac.caltech.edu/level5/Gray/Gray_contents.html

9. <http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>

5.2.1.1. *Bloc 1*

LÀMPADA DE CALIBRACIÓ



Línies identificades:

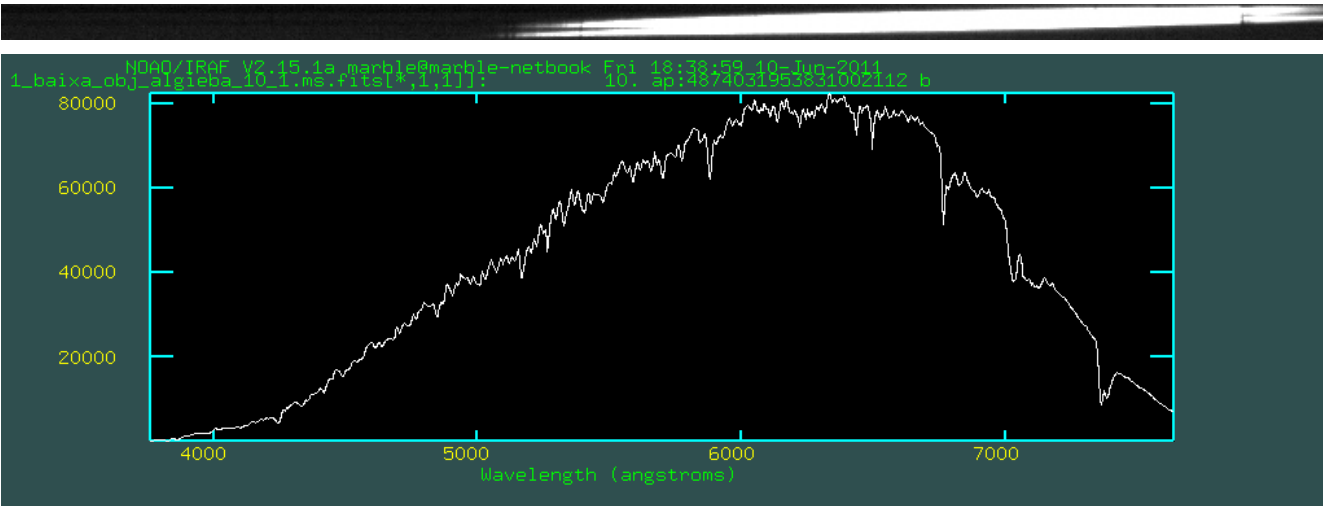
Píxel	λ teòrica associada (Å)
$421,73 \pm 0,05$	4366
$299,00 \pm 0,05$	5424
$294,24 \pm 0,03$	5465
$218,44 \pm 0,02$	6116

Funció de calibració ($y = ax + b$)

Paràmetres		Dispersió	
a (1/píxel)	b (Å)	σ (Å/mm)	σ (Å/píxel)
$-8,610 \pm 0,003$	$7997,7 \pm 0,9$	477,71	4,30

ALGIEBA

Ascensió Recta	Declinació	Magnitud V	Tipus Espectral
10h 19m 58,16s	+19° 50' 30",69	1,98	K0D



Astronomia Observacional – Obtenció i reducció d'espectres estel·lars amb CCD

La majoria de les línies estan a longituds d'ona per sobre de 5500Å. Aquestes bandes d'absorció són amples i tenen la vora esquerra millor definida que la dreta. Amb aquestes característiques es pot fer una primera aproximació a considerar un tipus M o K.

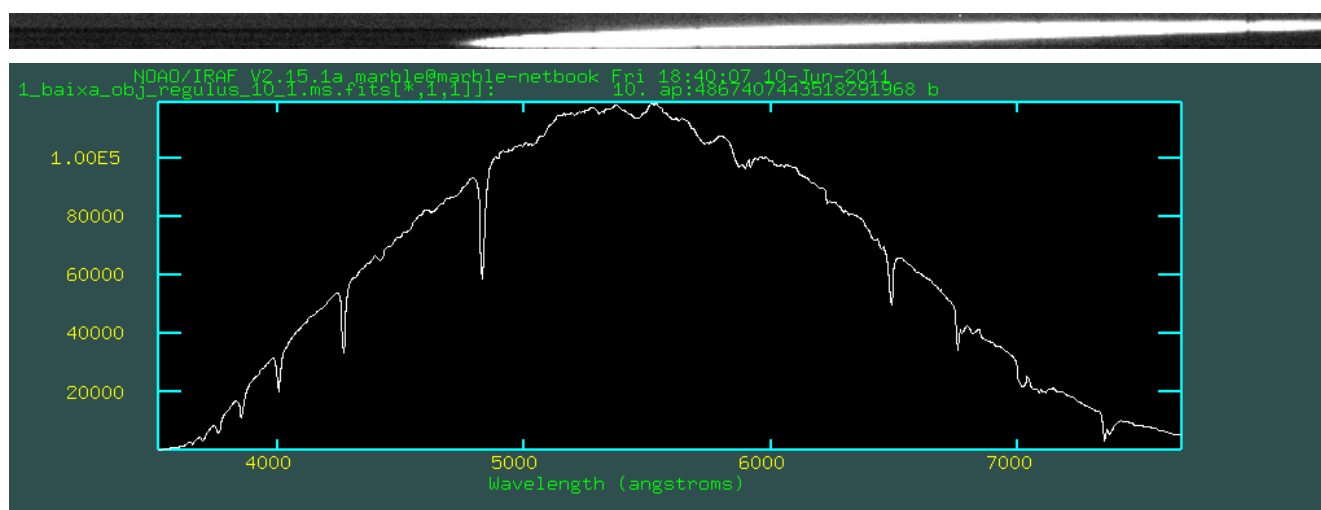
La imatge de l'espectre obtingut permet distingir algunes d'aquestes línies. Determinant aproximadament algunes d'aquestes longituds d'ona, es poden associar a certes línies de l'atles. Per exemple:

Línies espectrals (Å)		Element	Rang de tipus
Observada	Teòrica		
6840	6839,828	Fel	{K0-M2Iab}
6710	6717,556	Fel	{F5-G5V;F2-K0II;G0-K0Ib}
6500	6493,050	FelI	{G5-K5V;F2-K0II;G0-K0Ib}
5920	5916,730	CrI	{K0Ib-M2Ia}
5370	5364,874	Fel	{G2-K0II}
5250	5246,750	CrII	{K0Ib-M2Ia}

Es verifica que la major part de les línies corresponen tant a tipus M com K, però destaca la K en totes elles. És més, la majoria abasten els rangs fins a K0, de manera que es pot afirmar que aquest és el seu tipus spectral.

REGULUS

Ascensió Recta	Declinació	Magnitud V	Tipus Espectral
10h 08m 22,46s	+11° 58' 01",90	1,35	B7V



Domina tota la sèrie de Balmer amb alguna altra línia corresponent a elements més pesats però feble. Donat que les línies no són molt intenses, hi pot haver discussió entre ser una A o una B. Analitzant més concretament les línies, comparant-les amb un atlas, s'han trobat les següents:

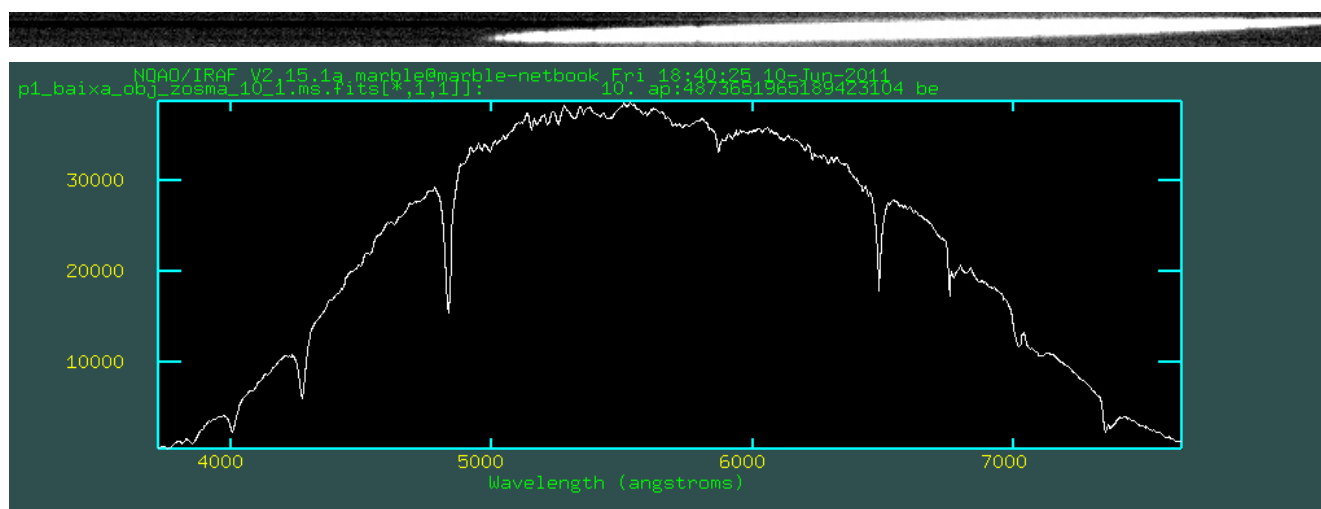
Línies espectrals (Å)		Element	Rang de tipus
Observada	Teòrica		
7600	7592,740	Hell	{O9V-M2Ia}
6800	6783,710	Fel	{O9-B3II}
6700	6678,030	ZrII	{O9V-B9Ia}
4850	4861,330	N III	{O9V-M2Ia}
4380	4387,897	Fel	{O9V-B9Ia}
4100	4101,684	Fel	{O9V-M2Ia}
3900	3919,159	CrI	{O9-B2V}

La majoria dels tipus contenen la B, però no passa el mateix amb l'A, de manera que es pot concloure que l'estrella és de tipus espectral B.

Comparant-la amb altres estrelles del catàleg STELIB, es pot veure com coincideix amb les de tipus B7V i B8V, coincidint amb els valors extrets de la bibliografia.

ZOSMA

Ascensió Recta **Declinació** **Magnitud V** **Tipus Espectral**
 11h 14m 06,41s +20° 31' 26",52 2,56 A4V



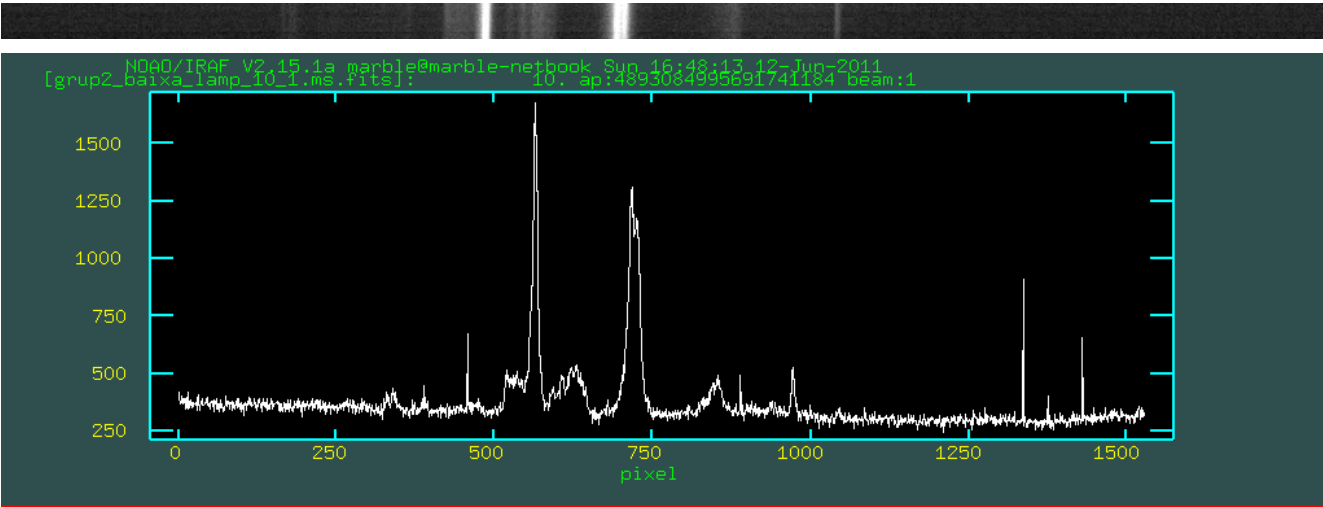
Zosma manté un espectre molt semblant a Regulus, de manera que domina la sèrie de Balmer amb línies més intenses. Altre cop hi pot haver confusió entre l'A i la B. Segons les longituds d'ona determinades, es té:

Línies espectrals (Å)		Element	Rang de tipus
Observada	Teòrica		
6800	6783,710	Fel	{O9-B3II}
6650	6671,510	SmI	{B9-A3V}
4850	4861,330	N III	{O9V-M2Ia}
4300	4249,990	LaII	{A4-G5V;F2III-K0II;G0Ib-M2Iab}
4000	3982,583	MnI	{A4-A7V;A0Ib-F8Ia}

De manera que, en aquest cas no és exactament una B, ja que no totes les línies contenen aquest tipus espectral, sinó que es tracta d'una A amb lluminositat V.

5.2.1.2. *Bloc 2*

LÀMPADA DE CALIBRACIÓ



Línies associades:

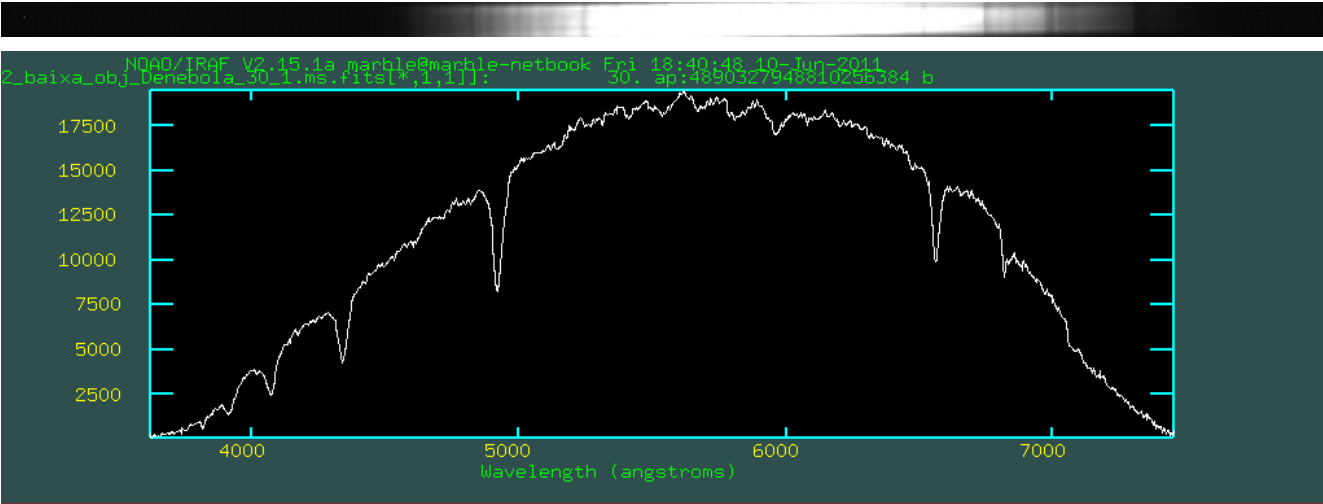
Píxel	λ teòrica associada (Å)
$485,87 \pm 0,02$	4366
$362,52 \pm 0,07$	5424
$358,64 \pm 0,16$	5465
$282,57 \pm 0,07$	6116

Funció de calibració ($y = ax + b$):

Paràmetres		Dispersió	
a (1/píxel)	b (Å)	σ (Å/mm)	σ (Å/píxel)
$-8,61 \pm 0,02$	8548 ± 9	477,62	4,30

CAPELLA

Ascensió Recta	Declinació	Magnitud V	Tipus Espectral
05h 16m 41,29s	+45° 59' 56",50	0,08	G5III



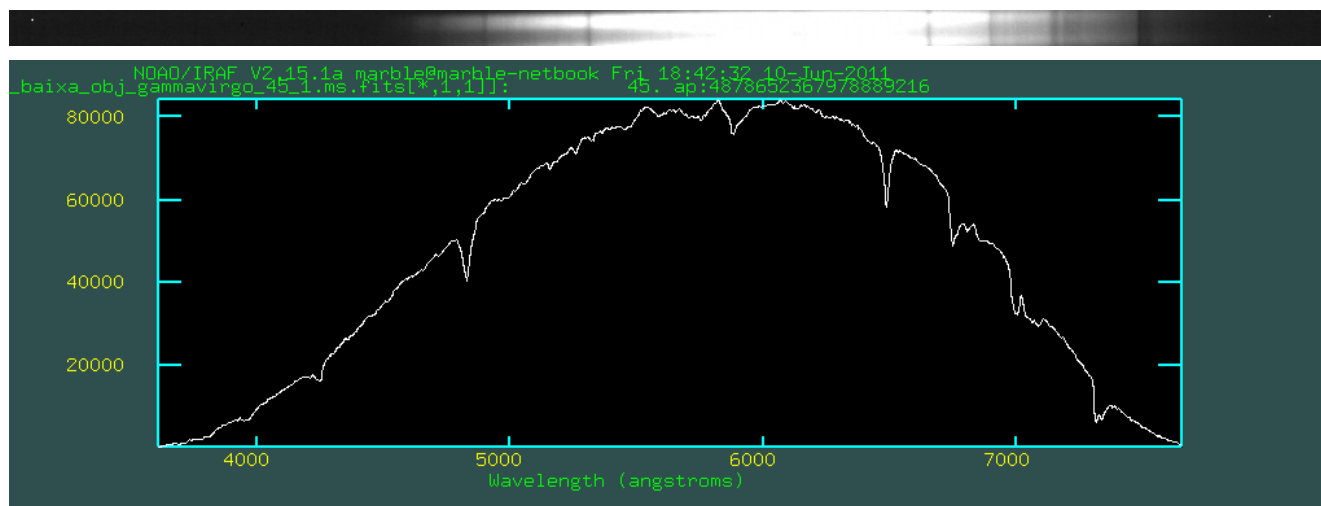
Astronomia Observacional – Obtenció i reducció d'espectres estel·lars amb CCD

S'observen les línies de Balmer, encara que no amb molta intensitat, i les bandes d'absorció són amples i més ben definides per la vora esquerra. Tan podria ésser una M donada la definició de les vores, com una G per la varietat d'intensitats de les línies. Ara bé, si s'analitzen i identifiquen algunes d'elles, s'observa que es tracta d'una G i, més concretament, d'una G5:

Línies espectrals (Å)		Element	Rang de tipus
Observada	Teòrica		
6700	6717,556	FeI	{F5-G5V;F2-K0II;G0-K0Ib}
6500	6493,050	FeII	{G5-K5V;F2-K0II;G0-K0Ib}
6150	6161,194	PrII	{G5-K5V;G0II-K0Iab}
5000	4996,850	NiI	{G5-M2III;K0II-M2Ia}
4400	4367,900	HfII	{G5-K5III;F2-K3II;G0-K0Ib}
4200	4184,895	CrI	{G5-K5V;G5-K5III;F2-K3II;G0-K0Ib}

GAMMA VIRGO

Ascensió Recta	Declinació	Magnitud V	Tipus Espectral
12h 41m 40,00s	-01° 26' 58",28	2,74	F0V

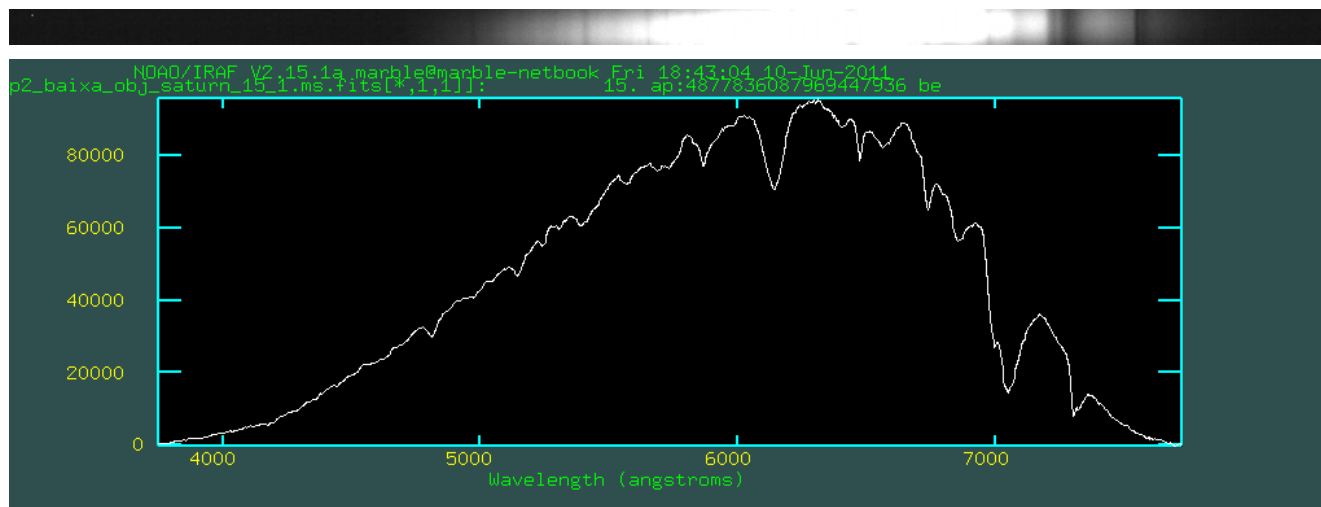


S'observa que la part blava està força ennegrida en relació amb la resta. Tot i així, es veuen les ratlles de Balmer (poc intenses), i algunes línies més, totes relativament dèbils. Com s'observa en la identificació de les longituds d'ona, destaca la línia del Call, de manera que l'espectre correspon al d'un tipus F (caracteritzat per aquest element). Pels rangs obtinguts, es pot acotar el tipus espectral entre F2V i F0V.

Línies espectrals (Å)		Element	Rang de tipus
Observada	Teòrica		
6800	6717,556	FeI	{F5-G5V;F2-K0II;G0-K0Ib}
6500	6499,520	NI	{G5V-K5V;F2-K0II;G0-K0Ib}
5900	5856,960	GdII	{G2-K0II;A0-G0Ia}
4900	5001,489	CaII	{F2-K3II;G0-K0Ib}
4300	4300,828	FeI	{K0-M2V;F2-K3II;G0Ib-K0Ia}

SATURN

Ascensió Recta **Declinació** **Magnitud V** **Tipus Espectral**
 02h 42m 21s 83° 32' 13",2 1,2 a -0,24 G2V (Sol)



Les línies estan totes pràcticament a la zona del vermell, amb intensitats molt variades; a més, s'hi pot observar alguna línia dèbil de Balmer, fet que indica que podria ésser una G o una B, en les quals les línies de Balmer es veuen amb més dificultat. En identificar directament i associar els valors teòrics de l'atles, s'extreu que molt probablement es tracti d'una G, ja que el tipus B no entra dins el rang de variació dels tipus per cada longitud d'ona.

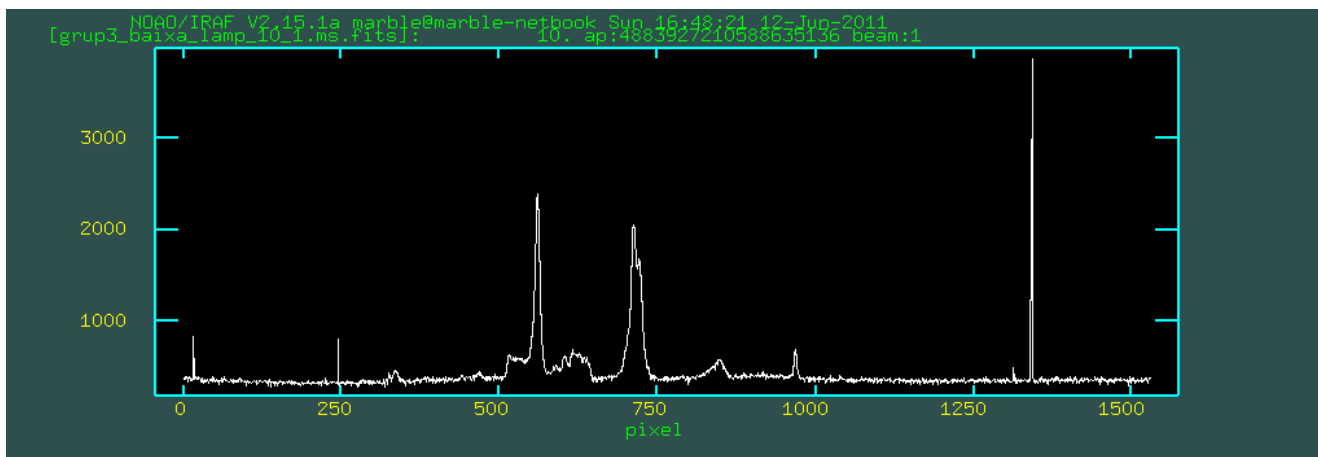
Línies espectrals (Å)		Element	Rang de tipus
Observada	Teòrica		
6500	6499,520	N I	{G5V-K5V;F2-K0II;G0-K0Ib}
6200	6168,860	CoI	{G5-K5V;G5-K5III;G0II-K0Iab}
5800	5790,659	HgI	{G5-K5III;K0II-M2Ia}

A més, comparant l'espectre amb altres estrelles del catàleg d'STELIB, s'ha observat que manté una gran semblança amb les de subtipus V.

5.2.1.3. Bloc 3

LÀMPADA DE CALIBRACIÓ





Línies associades:

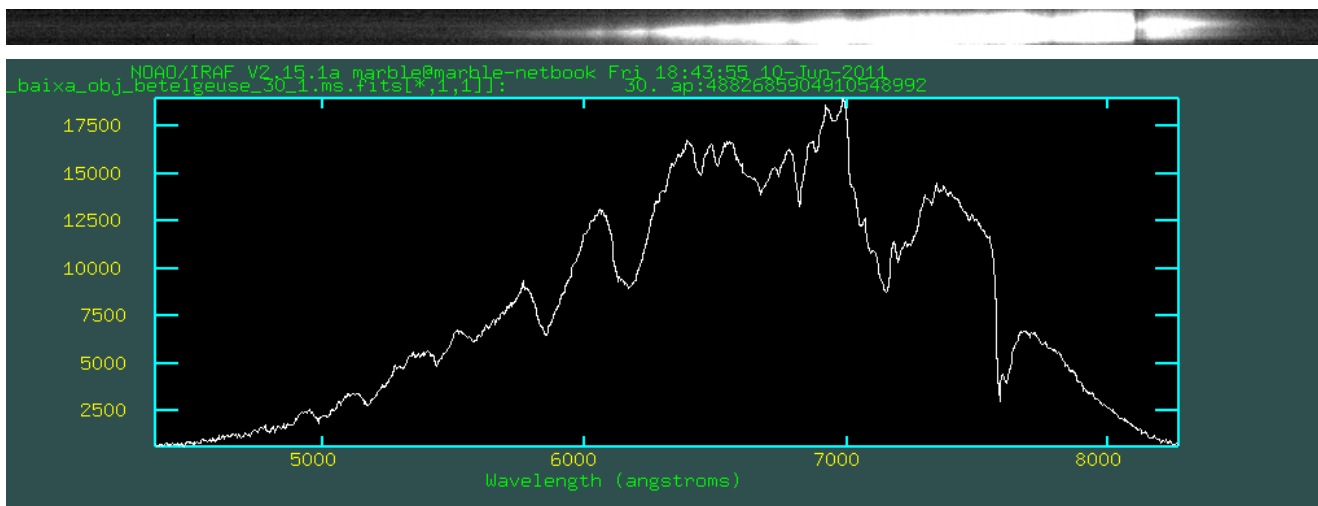
Píxel	λ teòrica associada (Å)
$483,85 \pm 0,04$	4366
$360,49 \pm 0,09$	5424
$356,48 \pm 0,04$	5465
$280,37 \pm 0,02$	6116

Funció de calibració ($y = ax + b$):

Paràmetres		Dispersió	
a (1/píxel)	b (Å)	σ (Å/mm)	σ (Å/píxel)
$-8,601 \pm 0,007$	8527 ± 2	477,22	4,29

BETELGEUSE

Ascensió Recta	Declinació	Magnitud V	Tipus Espectral
05h 55m 10,29s	+07° 24' 25",33	0,42	M2lab

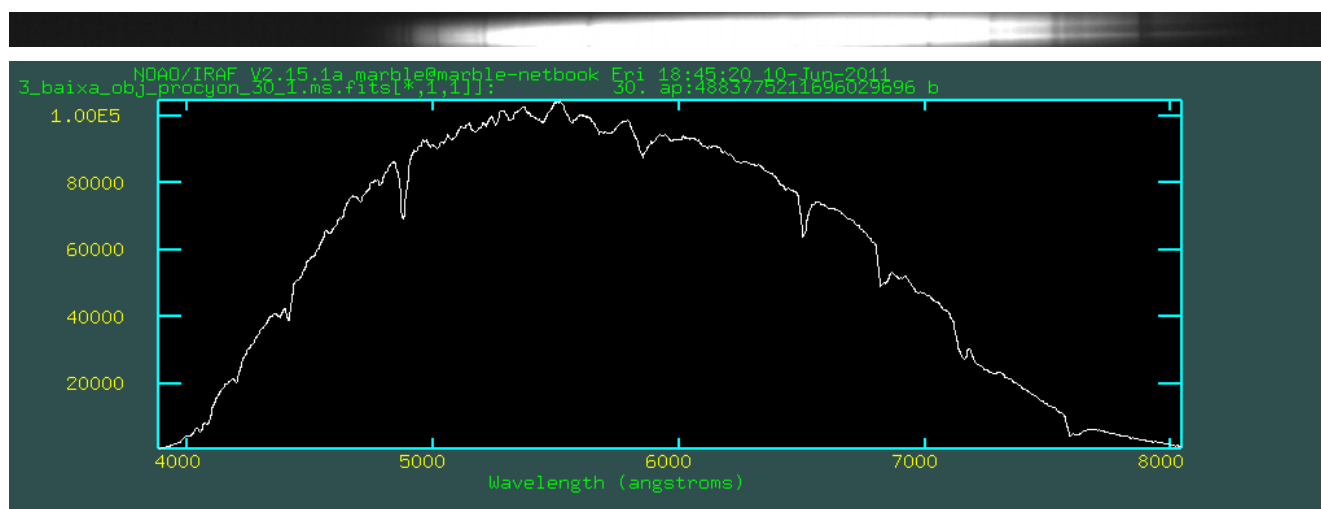


Les línies estan a la zona del vermell i presenten bandes amples de millor definició per la vora esquerra. Les característiques són molt pròpies d'un tipus M, però de nou s'ha procurat precisar identificant algunes d'aquestes línies amb les de l'atles, validant així el tipus associat prèviament:

Línies espectrals (Å)		Element	Rang de tipus
Observada	Teòrica		
7550	7592,740	Hell	{O9V-M2Ia}
7200	7167,010	Nil	{O9V-M2Ia}
6800	6838,860	Fel	{K0-M2Iab}
6200	6213,060	Zrl	{K0Ib-M2Ia}
5800	5785,670	Til	{G0Iab-M2Ia}

PROCYON

Ascensió Recta **Declinació** **Magnitud V** **Tipus Espectral**
 07h 39m 18,54s +05° 13' 39",03 0,34 F5IV-V



Es distingeix alguna línia de Balmer de poca intensitat, de la mateixa manera que les altres bandes són també dèbils i n'hi ha forces. Examinant algunes línies:

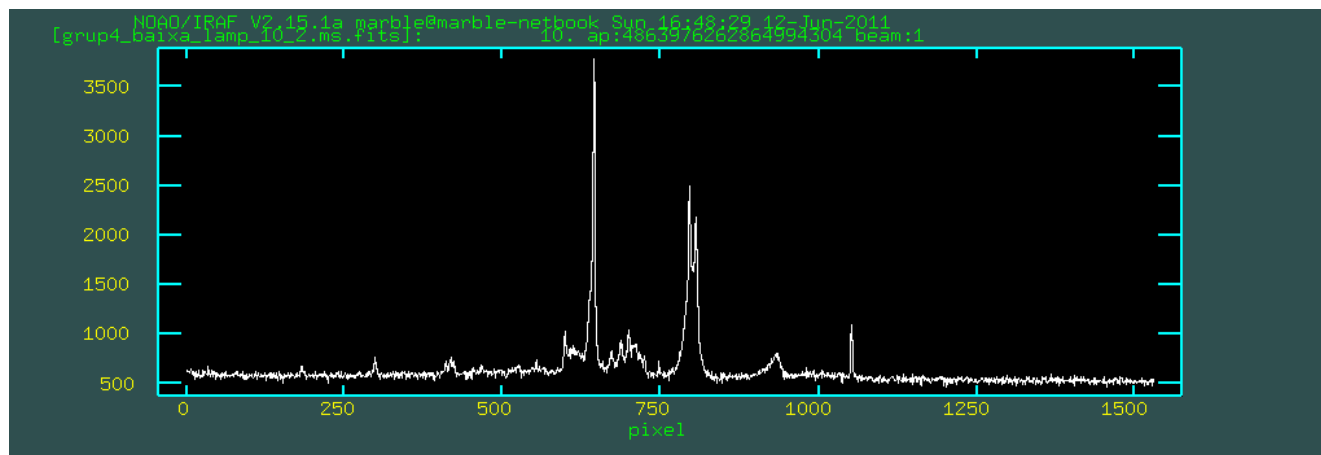
Línies espectrals (Å)		Element	Rang de tipus
Observada	Teòrica		
7600	7592,740	Hell	{O9V-M2Ia}
6700	6717,556	Fel	{F5-G5V;F2-K0II;G0-K0Ib}
6500	6462,454	MnII	{A0-G0Ia}
5850	5853,620	AlII	{A0-G0Ia}
4800	4779,979	CoI	{A0-G0IV}

El tipus no queda del tot determinat, però per la descripció inicial pot ésser una F i, pels rangs de les línies identificades, entre una F5V i una F2III.

5.2.1.4. Bloc 4

LÀMPADA DE CALIBRACIÓ





Línies associades:

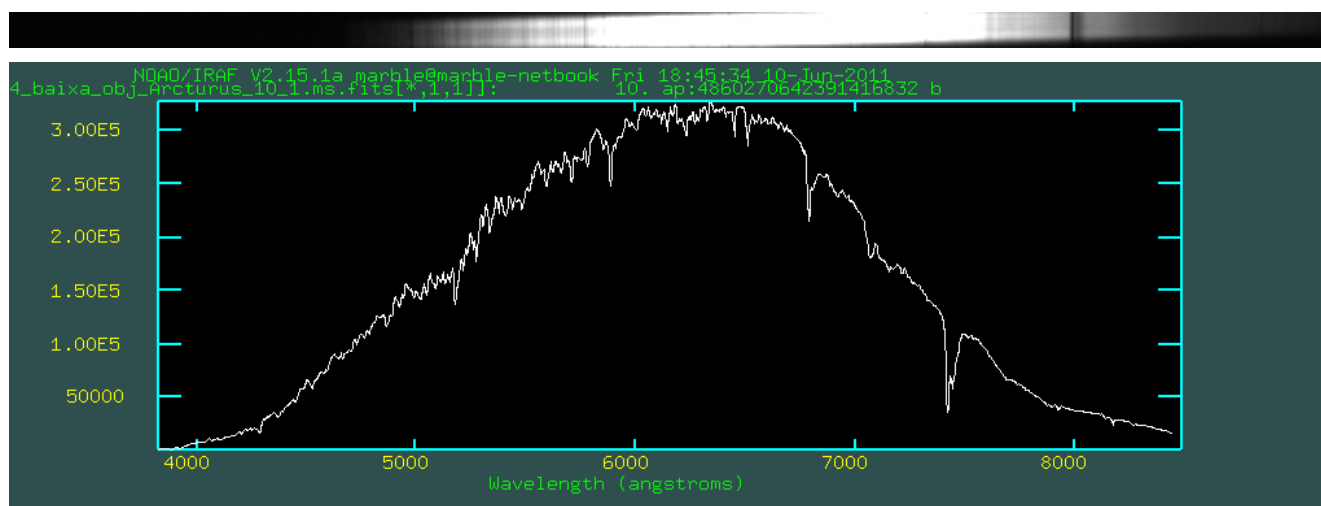
Píxel	λ teòrica associada (Å)
$525,67 \pm 0,02$	4366
$402,96 \pm 0,03$	5424
$398,09 \pm 0,02$	5465
$322,28 \pm 0,01$	6116

Funció de calibració ($y = ax + b$):

Paràmetres		Dispersió	
a (1/píxel)	b (Å)	σ (Å/mm)	σ (Å/píxel)
$-8,606 \pm 0,008$	8890 ± 3	477,49	4,30

ARCTURUS

Ascensió Recta	Declinació	Magnitud V	Tipus Espectral
14h 15m 40,35s	+19° 11' 14",17	-0,04	K1.5III

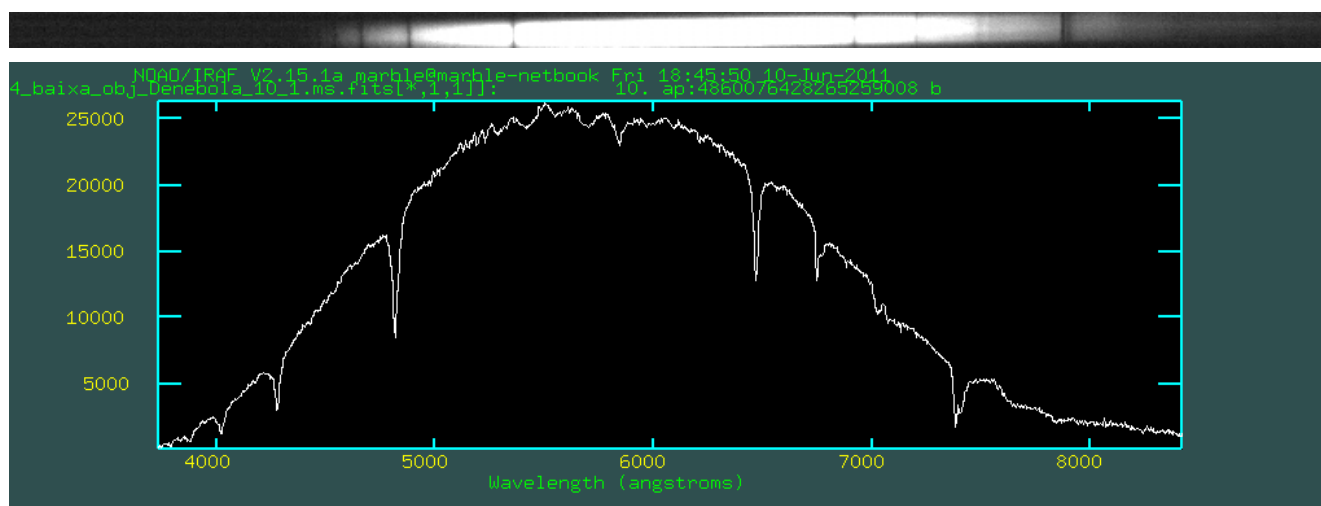


Hi ha moltes ratlles d'intensitat feble, alhora que es van eixamplant conforme s'apropen cap al vermell, definint-se millor la vora esquerra. Com ja s'ha observat en anteriors espectres analitzats, com el d'Algieba, aquestes característiques corresponen a un tipus espectral K. Algunes longituds d'ona associades amb l'atles són:

Línies espectrals (Å)		Element	Rang de tipus
Observada	Teòrica		
7500	7510,740	Aul	{F2-K0II}
6700	6717,556	Fel	{F5-G5V;F2-K0II;G0-K0Ib}
6500	6496,456	Fel	{F2-K0II;G0Ib-M2Ia}
6400	6407,300	FelI	{F2-K0II;G0-K0Ib}
5950	5916,730	CrI	{K0Ib-M2Ia}
5200	5204,518	CrI	{K0-M2Iab}

DENÉBOLA

Ascensió Recta **Declinació** **Magnitud V** **Tipus Espectral**
 11h 49m 03,89s +14° 34' 20",41 2,14 A3V



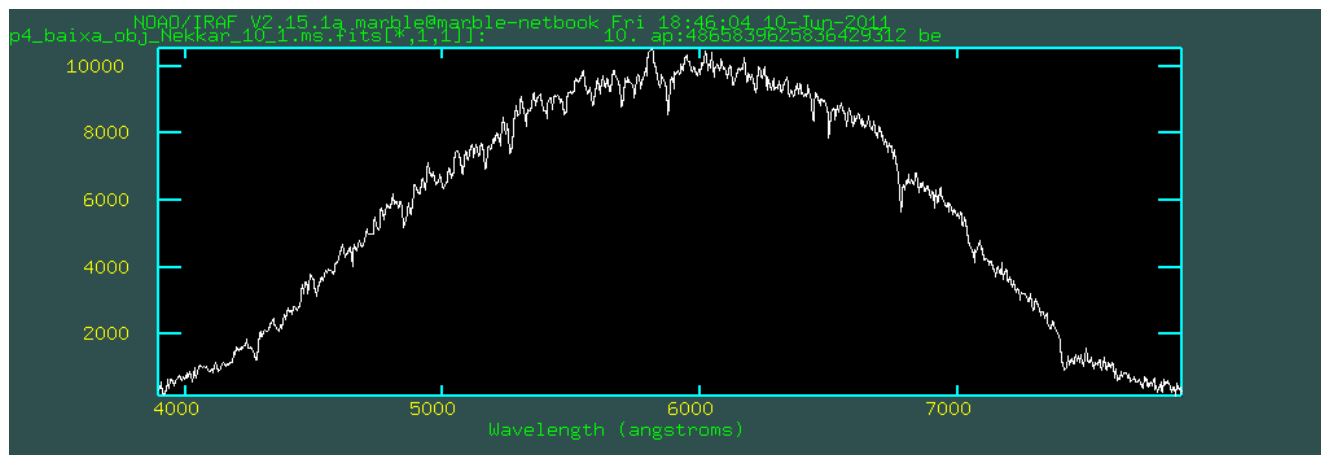
De la mateixa manera que en l'estrella Zosma del bloc 1, es diferencien força bé les línies de Balmer donada la seva intensitat. Per tant, és de tipus A.

Línies espectrals (Å)		Element	Rang de tipus
Observada	Teòrica		
7600	7592,740	HeII	{O9V-M2Ia}
6650	6671,510	SmI	{B9-A3V}
6500	6438,775	Fel	{A0-G0Ia}
4800	4861,330	N III	{O9V-M2Ia}
4300	4296,300	GdII	{A4-A7V;A0-A9III}

NEKKAR

Ascensió Recta **Declinació** **Magnitud V** **Tipus Espectral**
 15h 01m 56,79 +40° 23' 26",29 3,488 G8IIIa



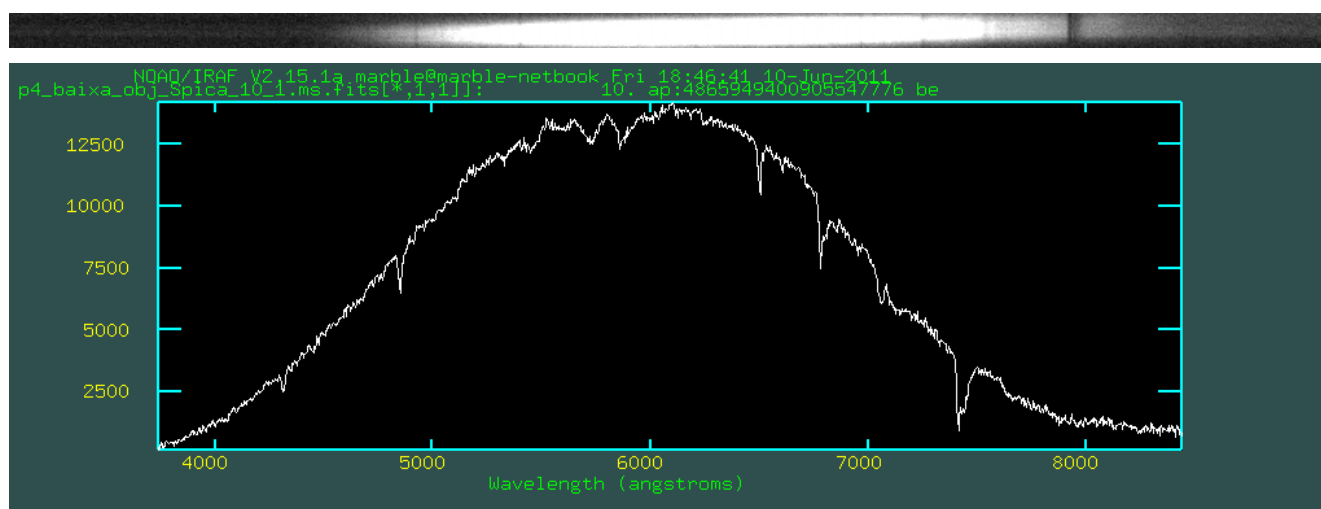


L'espectre té moltes línies d'intensitats diferents i dèbils. Les línies de Balmer pràcticament no es distingeixen. Aquestes propietats, com ja s'ha vist en l'estrella Capella, són pròpies d'un tipus G. En aquest cas, la identificació de les línies per inspecció visual directa ha estat més complicada donat que són molt petites. Per a una millor precisió, caldria, per exemple, ampliar una zona i ajustar una gaussiana tal com s'ha realitzat per la calibració de les làmpades i l'estudi d'alta resolució del següent apartat.

Línies espectrals (Å)		Element	Rang de tipus
Observada	Teòrica		
6800	6717,556	Fe I	{F5-G5V;F2-K0II;G0-K0Ib}
6500	6499,520	N I	{G5V-K5V;F2-K0II;G0-K0Ib}
5900	5895,900	Cr II	{O9V-M2Ia}

SPICA

Ascensió Recta	Declinació	Magnitud V	Tipus Espectral
13h 25m 11,60s	-11° 09' 40",48	1,04	B1III



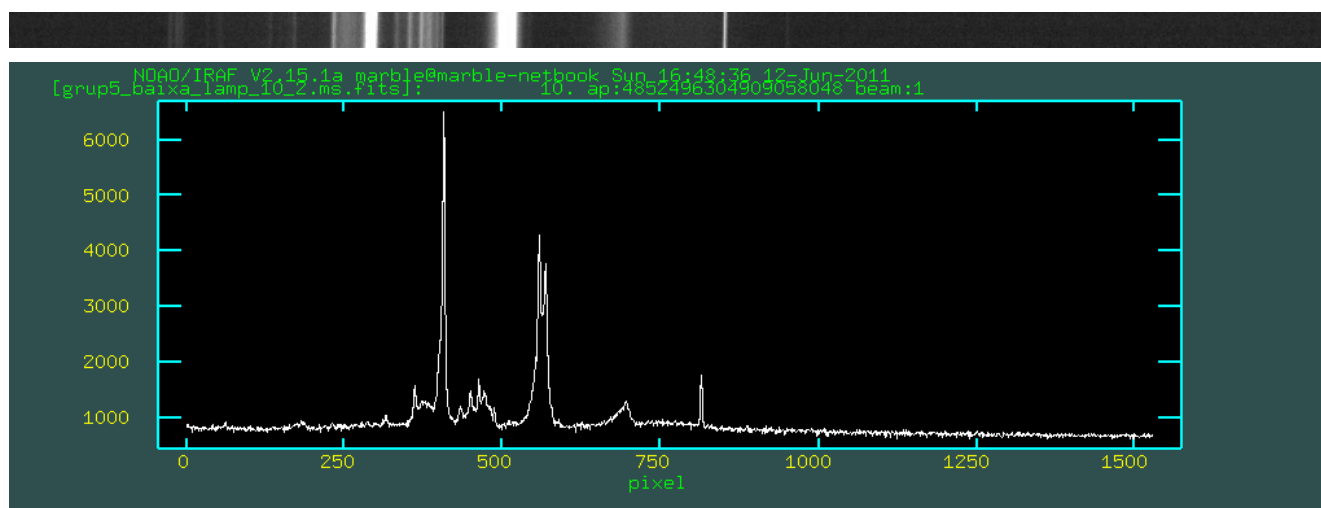
S'observa que s'identifiquen més línies a longituds d'ona altes, i que les ratlles de Balmer són feblement visibles. La majoria de les bandes són dèbils i amb la vora esquerra més ben definida (sobretot com més cap al vermell). Complementant aquestes característiques amb algunes de les línies determinades:

Línies espectrals (Å)		Element	Rang de tipus
Observada	Teòrica		
7600	7592,740	Hell	{O9V-M2Ia}
6800	6783,710	Fel	{O9-B3II}
6650	6671,510	Sml	{B9-A3V}
4850	4861,330	N III	{O9V-M2Ia}

Pels rangs de tipus en el que es troben, l'estrella ha de ser de tipus B. De fet si es compara l'espectre amb el de Regulus (del bloc 1) s'evidencien forces semblances, destacant que les línies en Regulus són molt més intenses que en Spica. Per tant, serà una B però de subtipus inferior, tal com es valida amb la bibliografia.

5.2.1.5. Bloc 5

LÀMPADA DE CALIBRACIÓ



Línies associades:

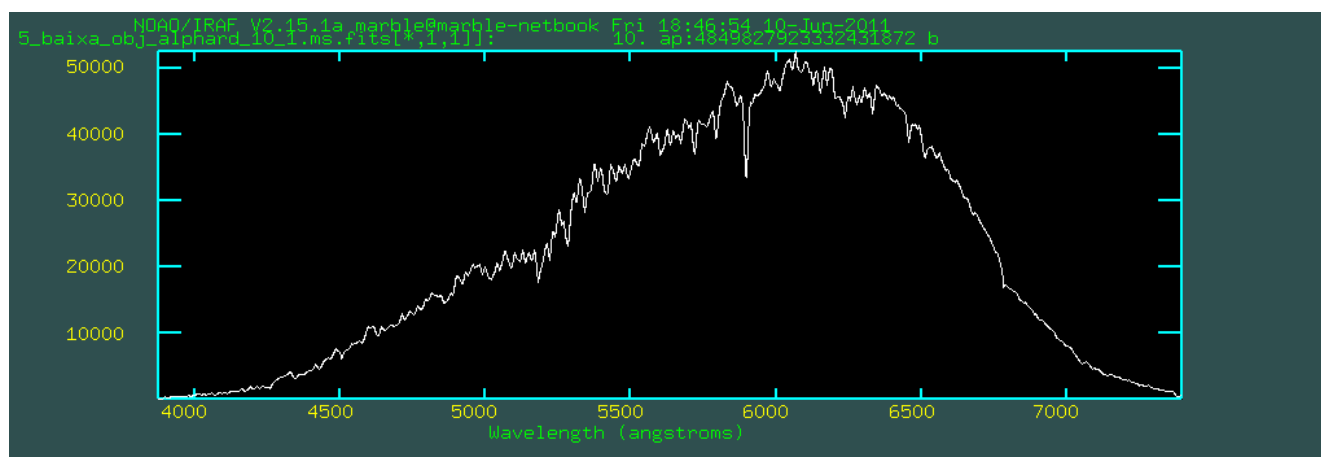
Píxel	λ teòrica associada (Å)
407,18 \pm 0,02	4366
284,46 \pm 0,02	5424
279,68 \pm 0,02	5465
203,655 \pm 0,005	6116

Funció de calibració ($y = ax + b$):

Paràmetres		Dispersió	
a (1/píxel)	b (Å)	σ (Å/mm)	σ (Å/píxel)
-8,60 \pm 0,01	7869 \pm 3	477,22	4,29

ALPHARD

Ascensió Recta	Declinació	Magnitud V	Tipus Espectral
09h 27m 35,25s	-08° 39' 31",26	2,004	K3II-III



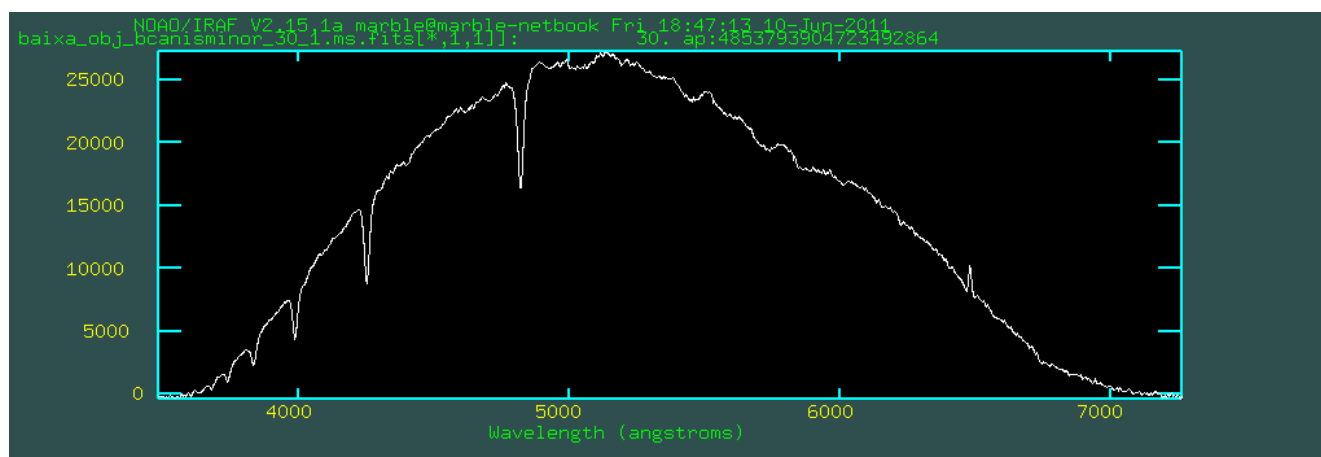
La majoria de les línies estan a la zona del vermell, a longituds d'ona per sobre de 5500Å. Té un espectre molt semblant al d'Algieba i Arcturus, de manera que molt possiblement pugui ésser una M o una K, ja que hi ha moltes línies però alhora no són molt amples. Distingint algunes d'aquestes línies, determinant-ne aproximadament la seva longitud d'ona, s'han associat de l'atles les següents:

Línies espectrals (Å)		Element	Rang de tipus
Observada	Teòrica		
5900	5856,960	GdII	{G2-K0II;A0-G0Ia}
5300	5183,420	LaII	{A0V-M2Ia}

La segona inclou el tipus M, però la primera no. L'estrella és doncs de tipus K.

β CANIS MINOR

Ascensió Recta	Declinació	Magnitud V	Tipus Espectral
07h 27m 09,07s	+08° 17' 21,87	2,886	B8Ve



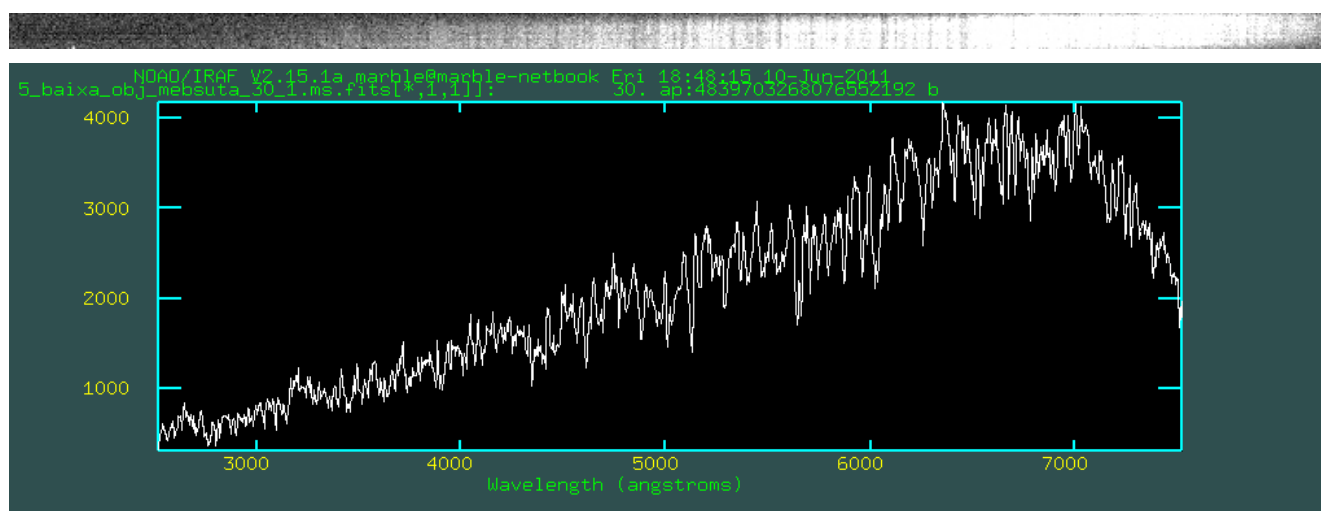
Domina part de la sèrie de Balmer però amb línies no molt intenses, i no hi ha moltes més ratlles que aquestes. Es podria pensar en una A o una B, però s'observa que pràcticament totes es troben a la franja de longituds d'ona baixes. Per validar millor l'anàlisi, com en els casos anteriors s'han identificat algunes línies:

Línies espectrals (Å)		Element	Rang de tipus
Observada	Teòrica		
4800	4779,444	Fel	{B5-B9V;B2-B9III}
4300	4290,400	NeII	{O9-B2V}
4000	3998,635	TiI	{O9-B2V}

La majoria dels tipus contenen la B. Comparant l'espectre amb el d'altres estrelles del catàleg STELIB, es pot veure com coincideix amb les de tipus B7V i B8V, encara que en l'espectre experimental les línies de longitud d'ona alta de la sèrie de Balmer no van quedar enregistrades.

MEBSUTA

Ascensió Recta **Declinació** **Magnitud V** **Tipus Espectral**
 06h 43m 55,93s +25 07 52,16 3,019 G8Ib



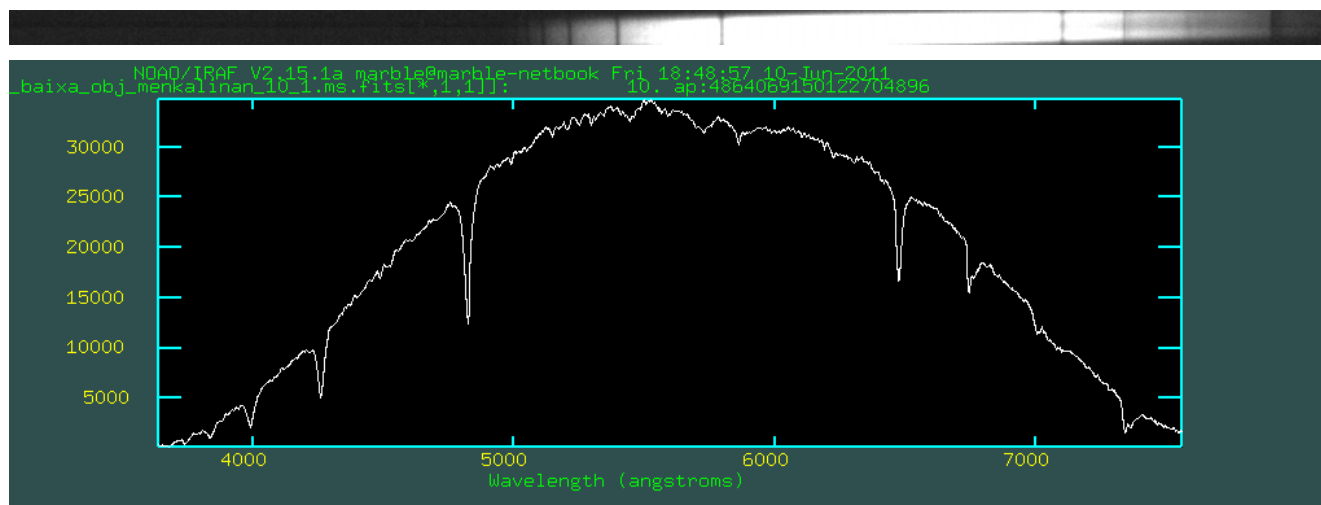
L'espectre es troba molt distorsionat i dificulta la identificació de línies per simple inspecció visual. No obstant es pot arribar a intuir l'existència de moltes línies d'intensitats diferents però relativament dèbils. Les línies de Balmer no es distingeixen de forma clara. Aquestes propietats, com ja s'ha vist en les estrelles Capella i Nekkar, són habituals d'un tipus G. Per a una millor precisió, caldria, per exemple, ampliar diferents zones i ajustar gaussianes tal com s'ha realitzat per la calibració de les làmpades i l'estudi d'alta resolució del següent apartat.

Línies espectrals (Å)		Element	Rang de tipus
Observada	Teòrica		
6800	6717,556	Fel	{F5-G5V;F2-K0II;G0-K0Ib}
6500	6499,520	N I	{G5V-K5V;F2-K0II;G0-K0Ib}
5900	5895,900	CrII	{O9V-M2Ia}
4400	4367,900	HfII	{G5-K5III;F2-K3II;G0-K0Ib}

MENKALINAN

Astronomia Observacional – Obtenció i reducció d'espectres estel·lars amb CCD

Ascensió Recta	Declinació	Magnitud V	Tipus Espectral
05h 59m 31,77s	+44° 56' 50",77	1,896	A2IV

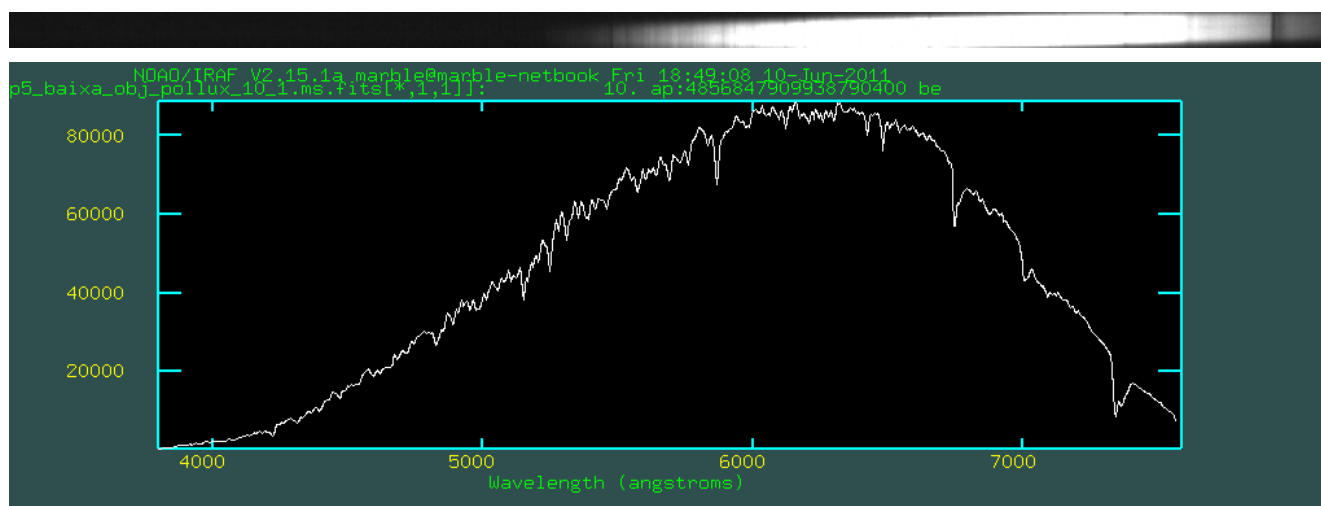


S'identifiquen les línies de Balmer amb molta claredat. I si es compara amb els espectres de Zosma i Denébola s'observa que són molt semblants. Amb l'ajut de l'atles, es comprova que, efectivament és de tipus A.

Línies espectrals (Å)		Element	Rang de tipus
Observada	Teòrica		
6700	6671,510	SmI	{B9-A3V}
4800	4861,330	N III	{O9V-M2Ia}
4200	4215,430	Fel	{A0V-M2Ia}

POLLUX

Ascensió Recta	Declinació	Magnitud V	Tipus Espectral
07h 45m 19,36s	+28° 01' 34",72	1,15	K0IIb



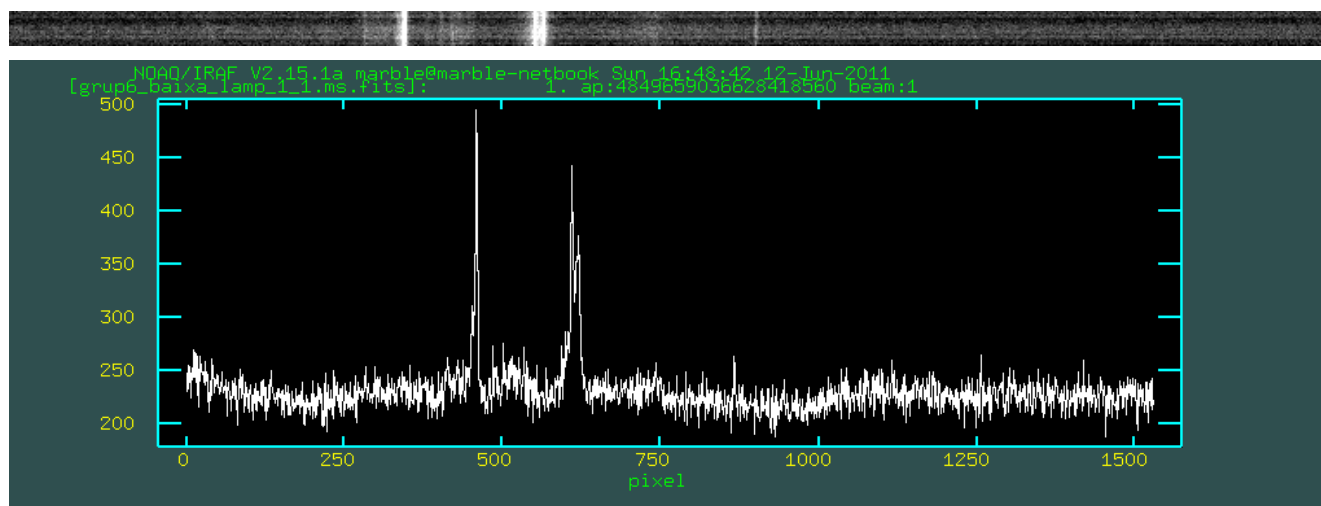
La majoria de les línies estan a la zona del vermell, a longituds d'ona per sobre de 5000Å. Té un espectre molt semblant al d'Algieba, Arcturus i Alphard, de manera que molt possiblement pugui ésser una K, ja que hi ha moltes línies però alhora no són molt amples. Distingint algunes d'aquestes línies, determinant-ne aproximadament la seva longitud d'ona, s'ha obtingut:

Línies espectrals (Å)		Element	Rang de tipus
Observada	Teòrica		
6700	6854,820	FeI	{K0-M2Iab}
6500	6499,520	N I	{G5V-K5V;F2-K0II;G0-K0Ib}
4800	4827,338	NeI	{K0-K3II;K0-M2Iab}

Molt possiblement, doncs, l'estrella sigui de tipus K, tal com es valida de la bibliografia.

5.2.1.6. Bloc 6

LÀMPADA DE CALIBRACIÓ



Línies associades:

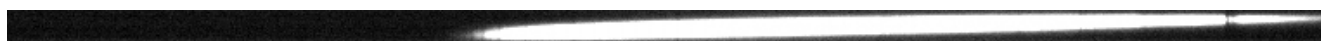
Píxel	λ teòrica associada (Å)
$433,14 \pm 0,13$	4366
$309,9 \pm 0,4$	5424
$305,29 \pm 0,06$	5465
$229,63 \pm 0,03$	6116

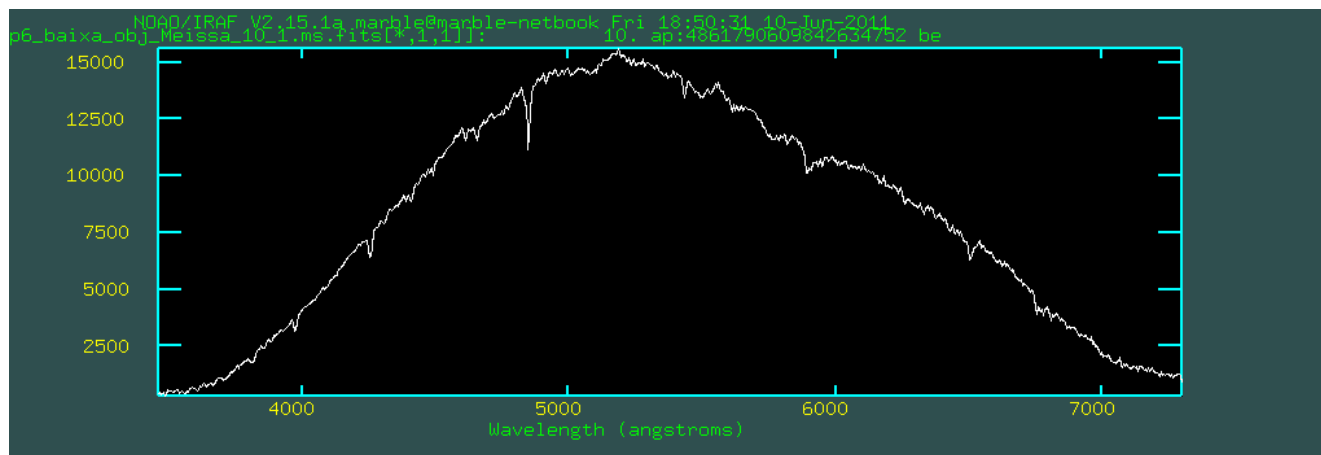
Funció de calibració ($y = ax + b$):

Paràmetres		Dispersió	
a (1/píxel)	b (Å)	σ (Å/mm)	σ (Å/píxel)
$-8,598 \pm 0,003$	8089 ± 1	477,02	4,29

BELLATRIX

Ascensió Recta	Declinació	Magnitud V	Tipus Espectral
05h 25m 07,87s	+06° 20' 59",04	1,64	B2III



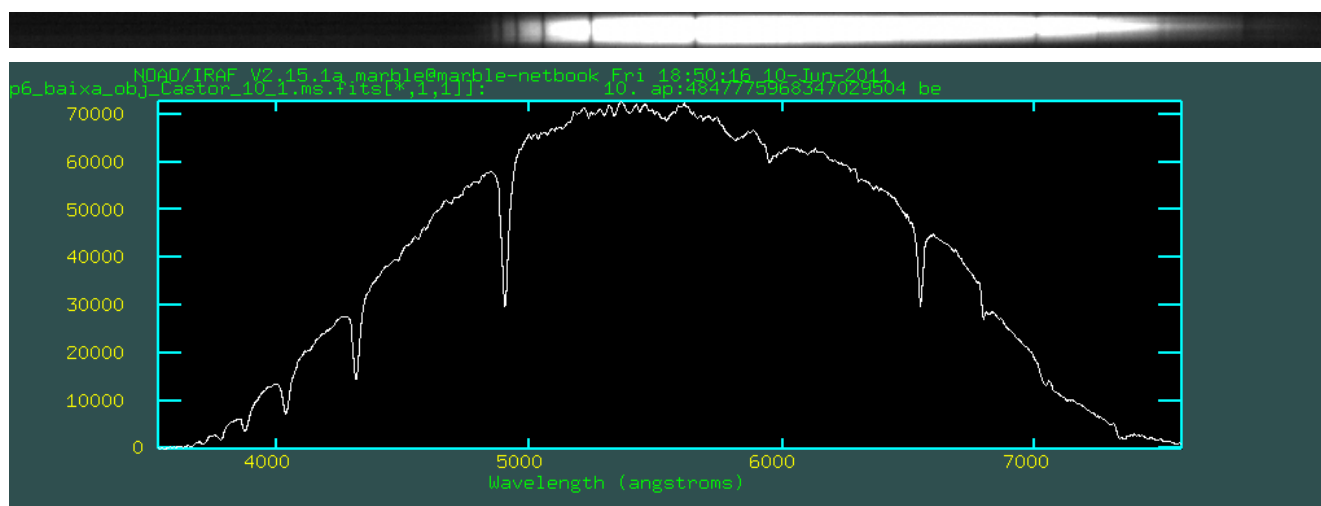


S'observen unes línies de Balmer relativament dèbils i molt poques ratlles en general. La identificació d'aquestes permet concloure que es tracta d'una B.

Línies espectrals (Å)		Element	Rang de tipus
Observada	Teòrica		
6780	6783,710	Fel	{O9-B3II}
6650	6671,510	Sml	{B9-A3V}
5950	5978,900	FeIII	{B2-B9V}
4850	4861,330	N III	{O9V-M2Ia}
4200	4212,063	Rul	{O9-B3V;O9-B3II;O9-B2Ib;O9-B3Ia}

CASTOR

Ascensió Recta **Declinació** **Magnitud V** **Tipus Espectral**
 07h 34m 36,00s +31° 53' 19",09 1,59 A2V

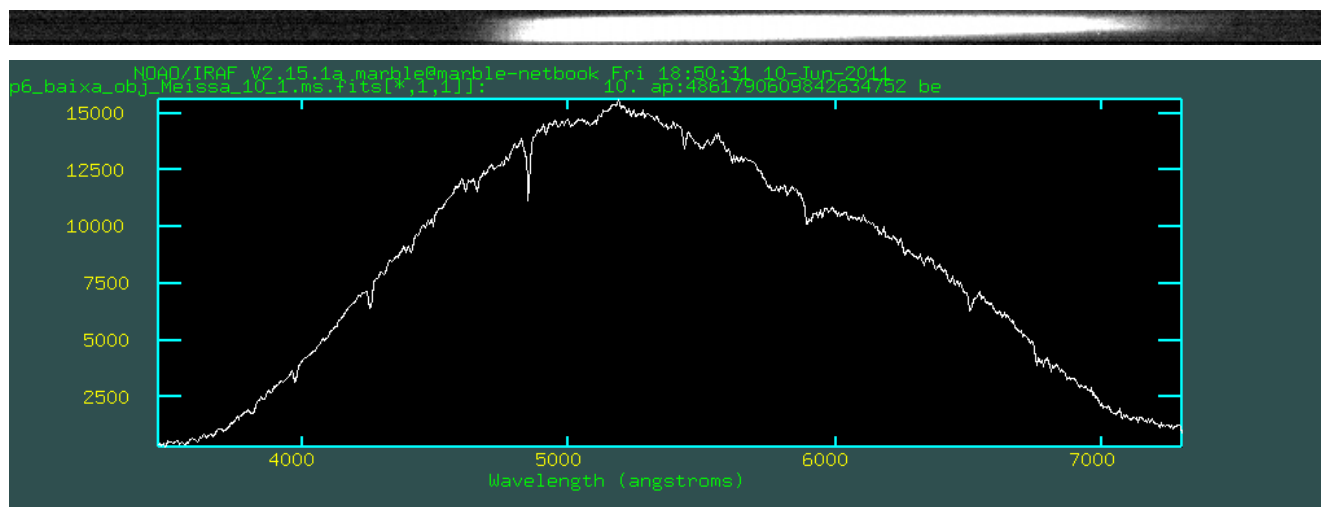


S'identifiquen les línies de Balmer corresponents a longituds d'ona superior i les línies de l'Heli. Per tant, es tracta d'una estrella de tipus espectral A a les acaballes de cremar hidrogen.

Línies espectrals (Å)		Element	Rang de tipus
Observada	Teòrica		
6700	6671,510	Sml	{B9-A3V}
4800	4861,330	N III	{O9V-M2Ia}
4300	4296,300	GdII	{A4-A7V;A0-A9III}

MEISSA

Ascensió Recta **Declinació** **Magnitud V** **Tipus Espectral**
 05h 35m 08,28s +09° 56' 02",99 3,39 O8III

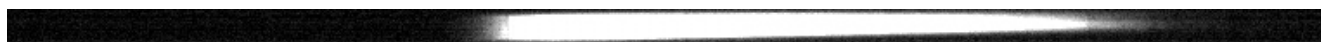


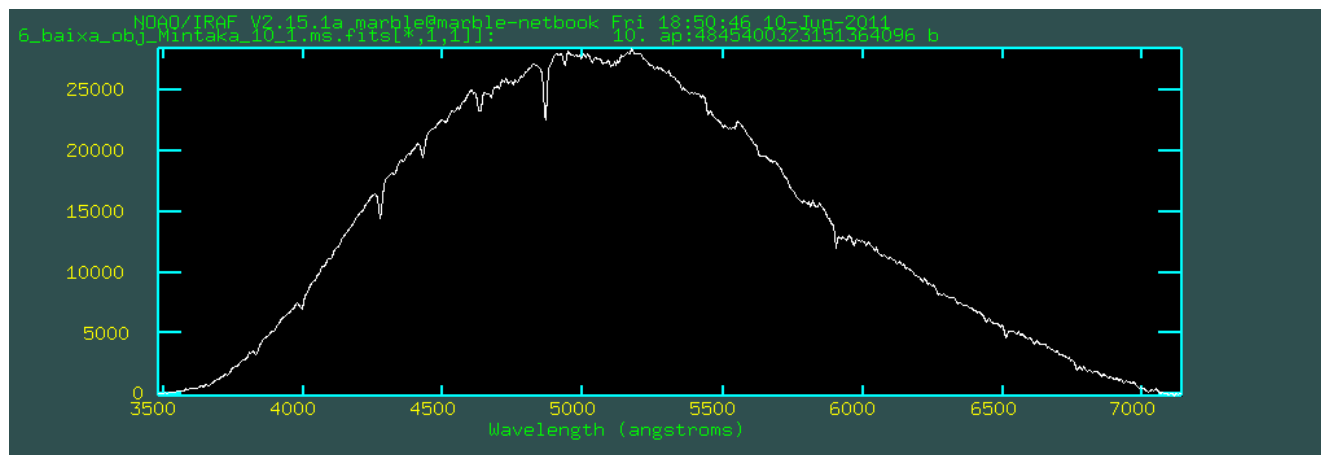
S'identifiquen amb dificultat les últimes línies de Balmer. A més, hi ha molt poques ratlles i d'intensitat molt baixa. Podria ser de tipus B com també de tipus O. En aquest cas, s'ha comparat l'espectre amb d'altres extrets del catàleg de l'STELIB per definir millor a quin dels dos tipus correspon, resultant coincidir amb més exactitud amb les de tipus O. Les línies identificades, però, són pròpies d'ambdós casos:

Línies espectrals (Å)		Element	Rang de tipus
Observada	Teòrica		
6650	6678,030	ZrII	{O9V-B9Ia}
5900	5875,600	FeII	{O9IV-B9Ia}
4900	4921,800	LaII	{O9V-B9Ia}
4300	4303,573	NdII	{O9-B9V;B2Ib-B9Iab}

MINTAKA

Ascensió Recta **Declinació** **Magnitud V** **Tipus Espectral**
 05h 32m 00,40s -00° 17' 56",74 2,23 O9.5II



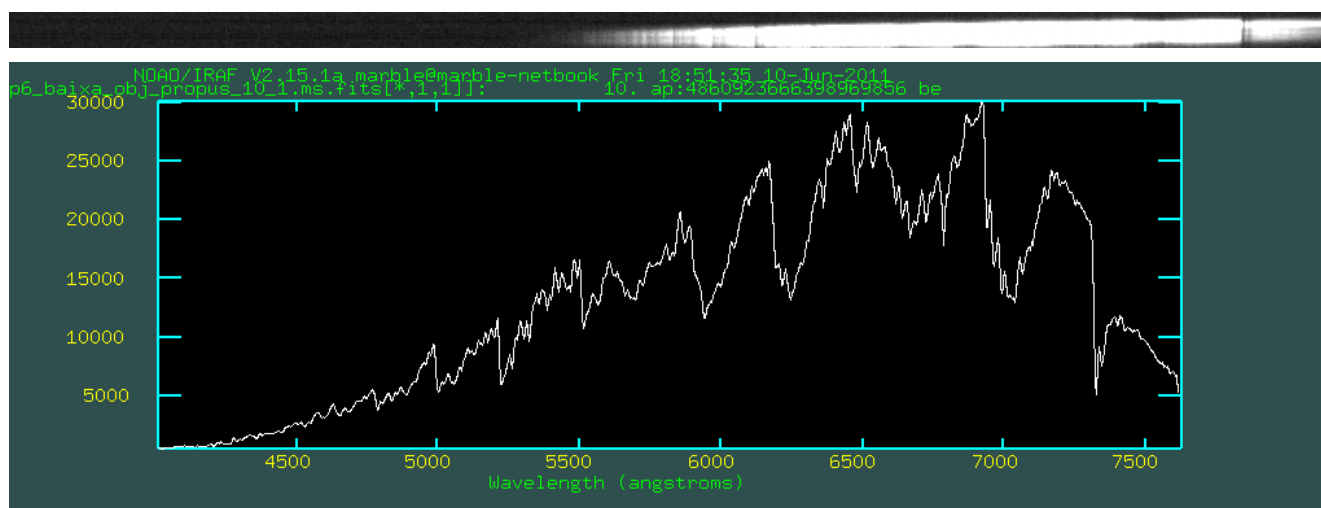


Idènticament al cas anterior de l'estrella Meissa, les línies de Balmer són molt dèbils i gairebé no n'hi ha cap més. Donat que les ratlles identificades corresponen tan al tipus B com a l'O, també s'ha comparat amb espectres del catàleg junt amb l'espectre de Meissa analitzat, concloent que també es tracta d'una O.

Línies espectrals (Å)		Element	Rang de tipus
Observada	Teòrica		
5800	5739,464	TiI	{O9-B9Iab}
4900	4921,800	LaII	{O9V-B9Ia}
4300	4303,573	NdII	{O9-B9V;B2Ib-B9Iab}

PROPUS

Ascensió Recta Declinació Magnitud V Tipus Espectral
06h 14m 52,69s +22° 30' 24",57 3,32 M3III



Com en el cas de Betelgeuse, les línies estan corregudes cap al vermell i presenten bandes amples de millor definició per la vora esquerra. Les característiques són molt pròpies d'un tipus M, però de nou s'ha procurat precisar identificant algunes d'aquestes línies amb les de l'atles, validant així el tipus associat prèviament. Si es comparen els espectres de Betelgeuse i Propus s'observa que són molt semblants i, per tant, del mateix tipus espectral:

Línies espectrals (Å)		Element	Rang de tipus
Observada	Teòrica		
7550	7592,740	HeII	{O9V-M2Ia}
7200	7167,010	Nil	{O9V-M2Ia}
6800	6838,860	Fel	{K0-M2Iab}
6200	6213,060	ZrI	{K0Ib-M2Ia}
5800	5785,670	TiI	{G0Iab-M2Ia}
5300	5302,279	NdII	{K0-M2Iab}

5.2.2. Alta Resolució

En aquest apartat es detallen els espectres de totes les estrelles realitzades en alta resolució. En aquest cas, l'objectiu no és la classificació espectral sinó la determinació de la velocitat radial d'aquestes.

Donat que per alta resolució només va prendre imatge de la làmpada de calibració un dels grups dels dos que pujaven el mateix dia d'observació, el conjunt d'estrelles d'aquesta secció es divideix en tres blocs. Cada bloc correspon a l'espectre de la làmpada fet el mateix dia. Fent referència a la taula inicial de l'apartat 5.2, les parelles de grups que comparteixen la mateixa imatge són: 1A - 6A, 2A - 3A, 4A - 5A (blocs 1, 2 i 3, respectivament).

BLOC 1	BLOC 2	BLOC 3
HD 81192_3	SAO 58636_1	HIP 28634_1
HIP 57939_3	SAO 60896_1	HIP 30247_1
SAO 77800_2	SAO 61125_1	HIP 35136_2
SAO 28142_2	SAO 61808_3	
SAO 81863_2		

Per tal de determinar la velocitat radial de cada estrella, cal identificar mínim una línia de l'espectre i compararla amb el seu valor teòric. Tot i així, la mala qualitat dels espectres obtinguts en alta resolució dificulta la identificació d'aquestes. És per això que, donat que l'objectiu primordial és determinar la velocitat radial i no el tipus espectral, s'ha extret aquest de la base de dades del *Simbad* per a cada estrella analitzada. Així, coneixent l'espectre i, per mitjà dels atlas mencionats a l'apartat 5.2 del present informe, s'han pogut identificar algunes línies i conèixer el seu valor teòric.

Coneixent aquest últim valor junt amb el determinat per un ajust gaussià en els gràfics experimentals (tal com s'ha fet en les làmpades), s'ha aplicat l'expressió de l'efecte *Doppler*:

$$v_r = \frac{\Delta \lambda}{\lambda} c \quad \text{on} \quad \Delta \lambda = \lambda - \lambda_0, \quad \text{sent} \quad \lambda_0 \quad \text{la longitud d'ona experimental}$$

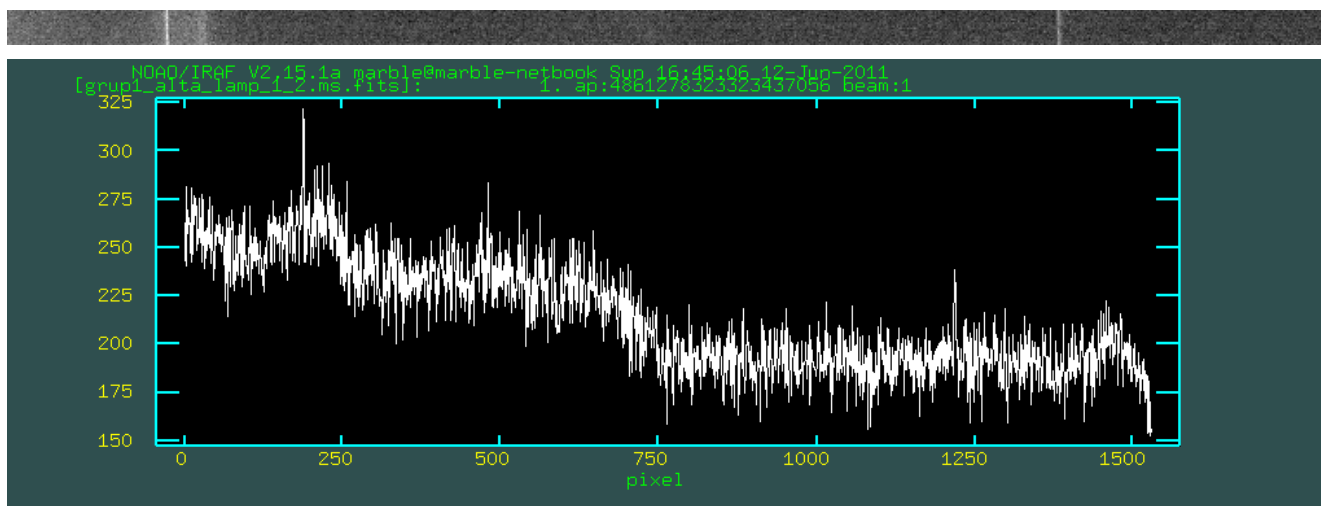
per tal de trobar la velocitat radial de cada estrella.

Els resultats de cada estrella analitzada es recullen en taules amb el següent format:

Línies (angstrom)			Element	Rang de tipus	Vel. (km/s)	
Observada	Referència	Teòrica				
Longitud d'ona de l'estrella observada (<i>centre de la gaussiana</i>)	Longitud d'ona de la imatge de referència de STELIB 3.2 amb tipus espectral similar (<i>centre de la gaussiana</i>)	Longitud d'ona teòrica, element que la produeix i conjunt de tipus espectrals que presenten aquesta línia segons el ILLSS			Velocitats calculades per efecte Doppler	
· Mitja					-	
· Desviació estàndard					-	
· Diferència absoluta respecte la teòrica					-	

5.2.2.1. Bloc 1

LÀMPADA DE CALIBRACIÓ



Línies associades:

Píxel	λ teòrica associada (Å)
$609,1 \pm 0,2$	4366
$93,8 \pm 0,2$	5465

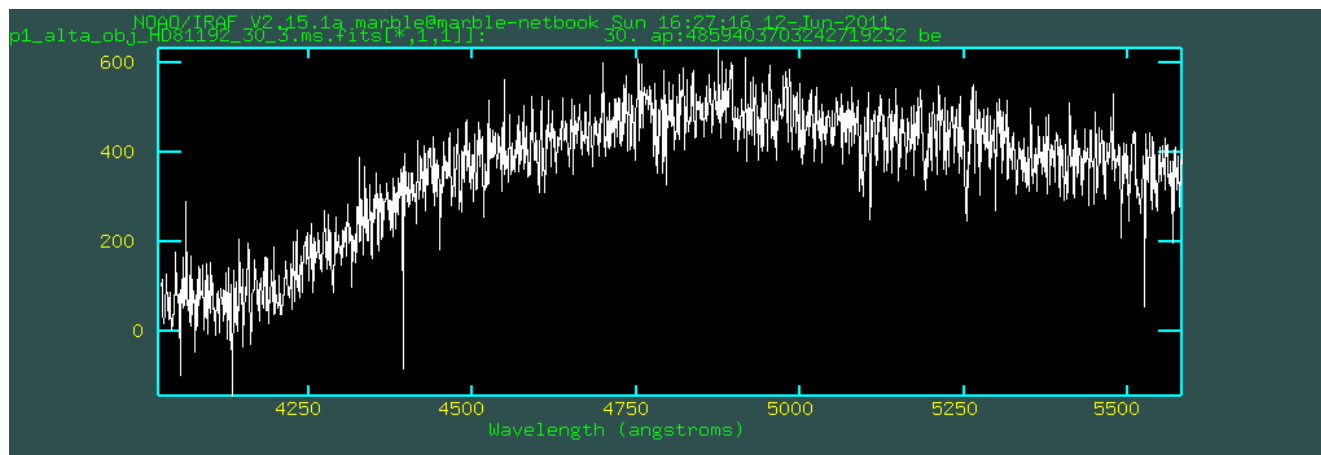
Funció de calibració ($y = ax + b$):

Paràmetres		Dispersió	
a (1/píxel)	b (Å)	σ (Å/mm)	σ (Å/píxel)
$-2,133 \pm 0,000$	$5664,9 \pm 0,0$	118,33	1,06

*Els errors dels paràmetres són nuls degut a que només s'han pogut identificar dues línies de l'espectre.

HD 81192

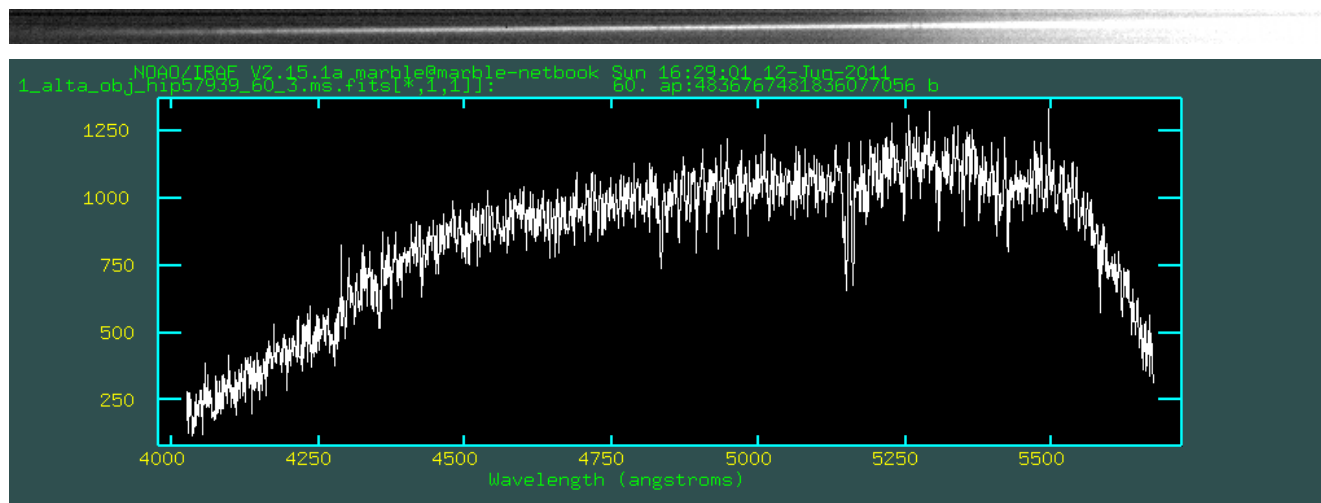
Ascensió Recta	Declinació	Magnitud V	Tipus Espectral	Velocitat radial (km/s)
09h 24m 45,39s	+19° 47' 12",84	6,539	G7III	135,30



Línies (angstrom)			Element	Rang de tipus	Vel. (km/s)
Observada	Referència	Teòrica			
4239,30	4236,56	4235,94	Y I	{F0-K5V; G0IV-M2Ia}	-238
4247,18	4248,31	4250,69	MolI	{A0V-M2Iab}	248
5160,88	5167,58	5167,28	LaII	{A0V-M2Ia}	372
5167,39	5173,06	5172,60	AlIII	{A0V-M2Ia}	302
5173,15	5183,99	5183,42	LaII	{A0V-M2Ia}	594
· Mitja					256
· Desviació estàndard					201
· Diferència absoluta respecte la teòrica					121

HIP 57939

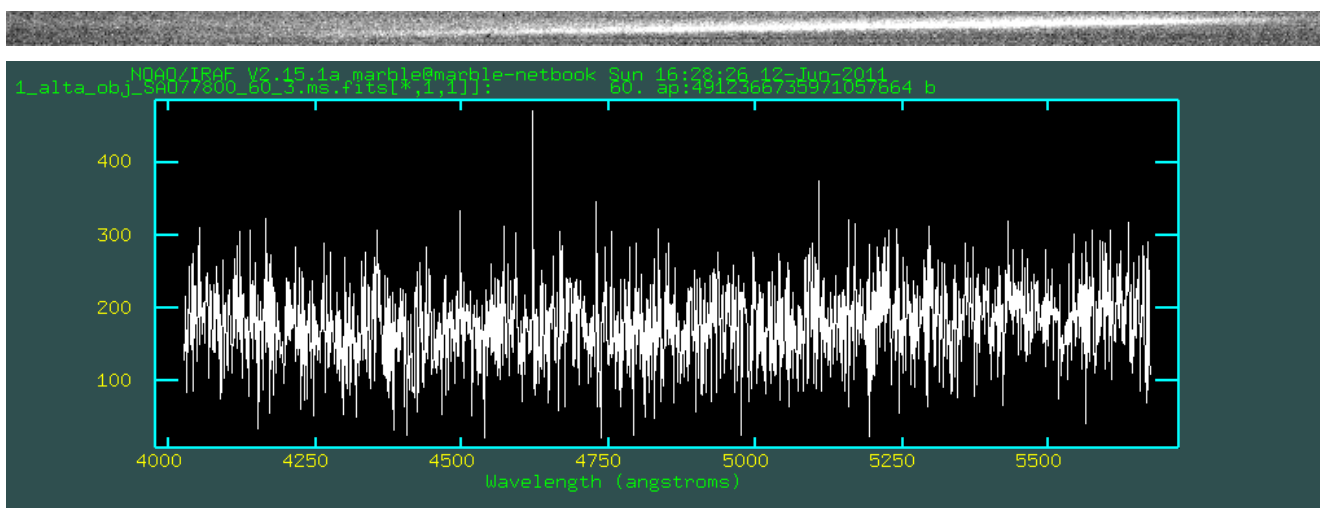
Ascensió Recta	Declinació	Magnitud V	Tipus Espectral	Velocitat radial (km/s)
11h 52m 55,82s	+37° 43m 58,11	6,45	G8V	-98,00



Línies (angstrom)			Element	Rang de tipus	Vel. (km/s)
Observada	Referència	Teòrica			
4233,84	4236,37	4235,94	Y I	{F0-K5V;G0IV-M2Ia}	149
4237,48	4248,68	4250,69	MolI	{A0V-M2Iab}	932
5143,79	5167,65	5167,28	Lall	{A0V-M2Ia}	1364
5149,06	5173,70	5172,60	AlIII	{A0V-M2Ia}	1365
5159,79	5184,00	5183,42	Lall	{A0V-M2Ia}	1368
· Mitja					1036
· Desviació estàndard					330
· Diferència absoluta respecte la teòrica					1134

SAO 77800

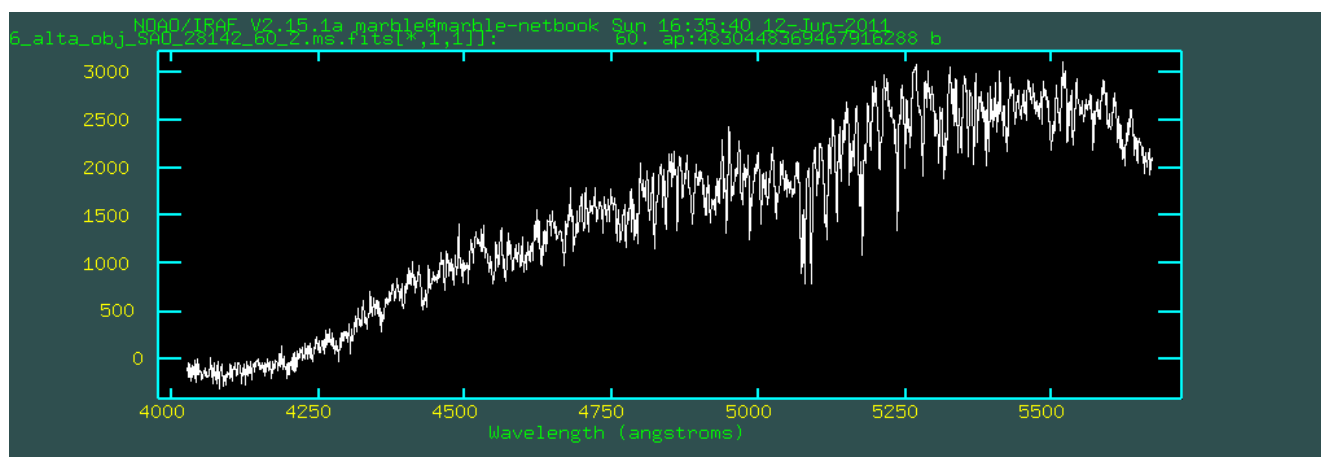
Ascensió Recta 05h 58m 52,92s
Declinació +25° 46' 37",42
Magnitud V 6,648
Tipus Espectral K0III
Velocitat radial (km/s) 0,30



Línies (angstrom)			Element	Rang de tipus	Vel. (km/s)
Observada	Referència	Teòrica			
4050,80	4045,66	4047,64	Y I	{K0Ib-M2Ia}	-234
4111,40	4111,60	4111,67	CrI	{G0V-K1IV;K0Ib-M2Ia}	20
4134,75	4131,98	4130,86	ClII	{B2V-G0Ia}	-283
4598,41	4594,55	4600,59	Lall	{K0Ib-M2Ia}	142
5043,82	5041,03	5041,06	SiII	{G0II-M2Ia}	-164
· Mitja					-104
· Desviació estàndard					148
· Diferència absoluta respecte la teòrica					104

SAO 28142

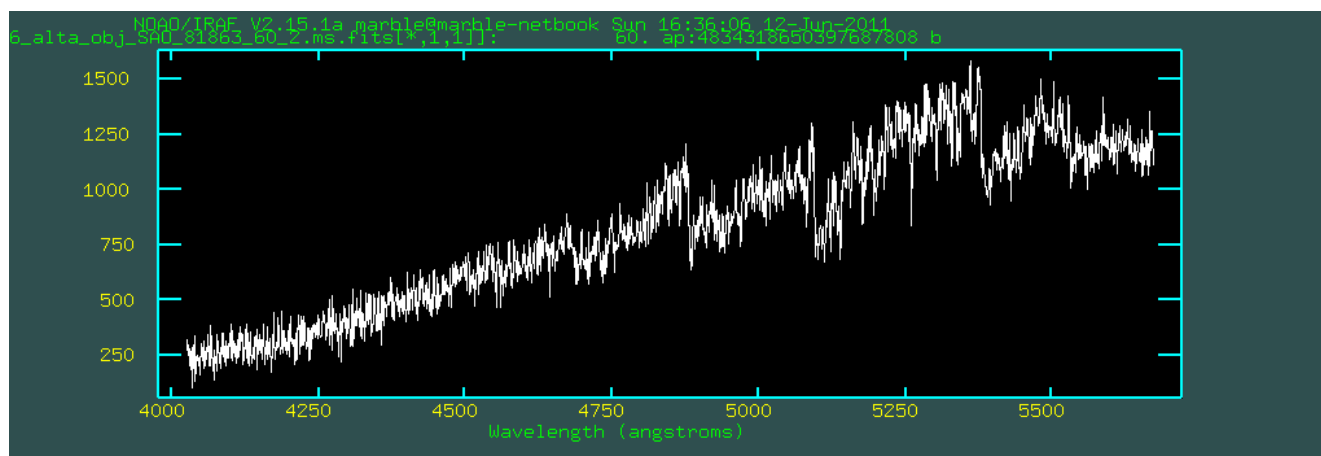
Ascensió Recta 11h 46m 55,61s
Declinació +55° 37' 41",76
Magnitud V 5,26
Tipus Espectral K3III
Velocitat radial (km/s) 0,55



Línies (angstrom)			Element	Rang de tipus	Vel. (km/s)
Observada	Referència	Teòrica			
4040,60	4045,66	4047,64	Y I	{K0Ib-M2Ia}	522
4108,90	4111,60	4111,67	CrI	{G0V-K1IV;K0Ib-M2Ia}	202
4130,08	4131,98	4130,86	CIII	{B2V-G0Ia}	57
4600,39	4594,55	4600,59	LaII	{K0Ib-M2Ia}	13
5043,79	5041,03	5041,06	SiII	{G0II-M2Ia}	-162
· Mitja					126
· Desviació estàndard					189
· Diferència absoluta respecte la teòrica					126

SAO 81863

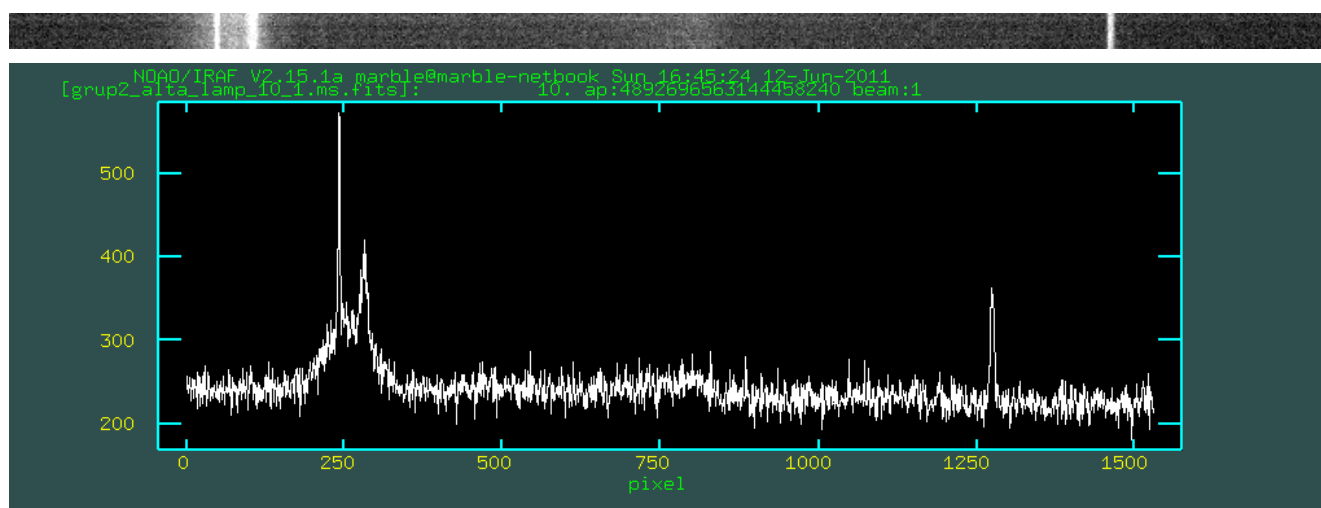
Ascensió Recta	Declinació	Magnitud V	Tipus Espectral	Velocitat radial (km/s)
11h 30m 54,94s	+28° 27' 05",64	6,777	MII	82,72



Línies (angstrom)			Element	Rang de tipus	Vel. (km/s)
Observada	Referència	Teòrica			
4883,96	4881,96	4881,44	Y II	{K0-M2III;K0Ib-M2Ia}	-155
5337,00	5340,65	5340,92	FeIII	{K5-M2III;G0II-K0Ib}	220
5341,85	5345,15	5345,67	S II	{K0-M2III;K0Ib-M2Ia}	214
4100,34	4102,06	4101,68	Fel	{O9V-M2Ia}	98
4114,32	4112,11	4113,45	FeIII	{K0Iab-M2Ia}	-63
· Mitja					63
· Desviació estàndard					138
· Diferència absoluta respecte la teòrica					20

5.2.2.2. Bloc 2

LÀMPADA DE CALIBRACIÓ



Línies associades:

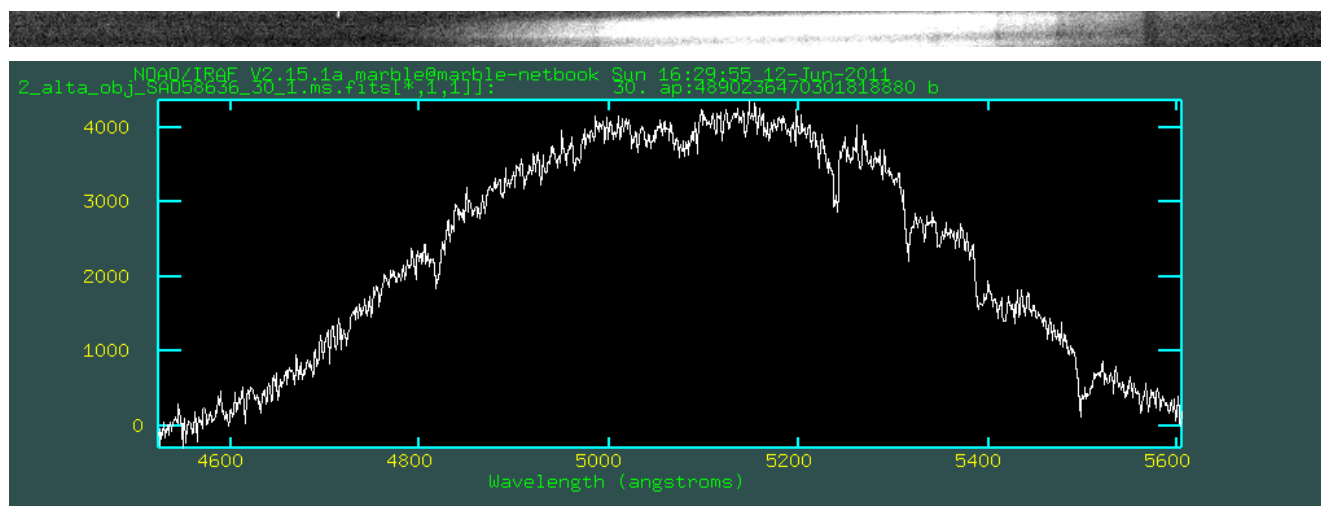
Píxel	λ teòrica associada (Å)
$636,72 \pm 0,07$	4366
$140,93 \pm 0,02$	5424
$120,69 \pm 0,14$	5465

Funció de calibració ($y = ax + b$):

Paràmetres		Dispersió	
a (1/píxel)	b (Å)	σ (Å/mm)	σ (Å/píxel)
$-2,13 \pm 0,01$	$5723,3 \pm 0,6$	118,27	1,06

SAO 58636

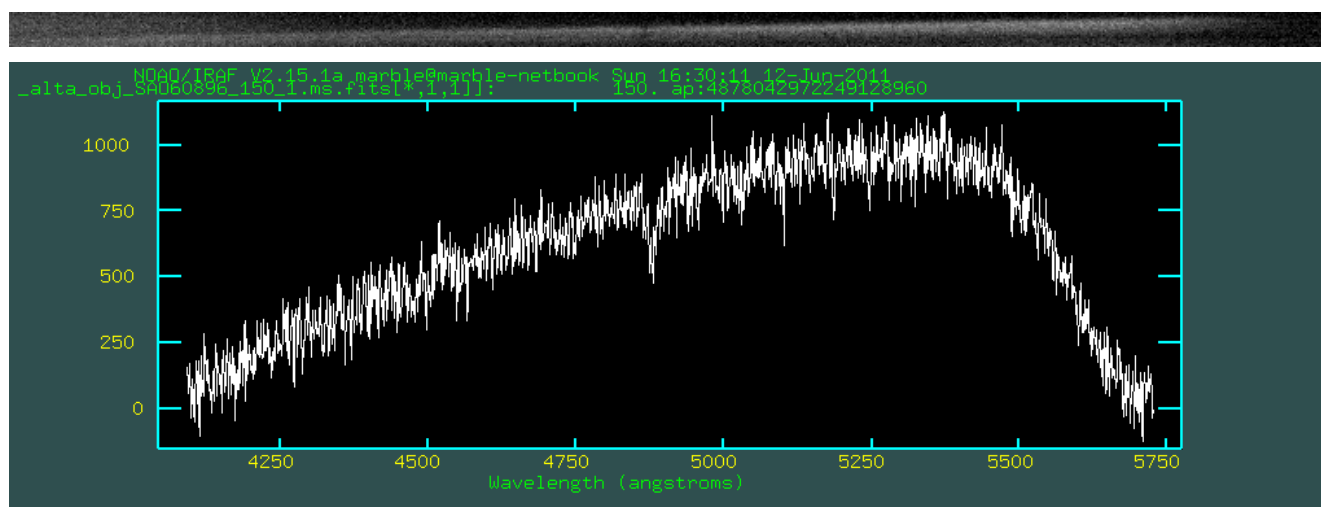
Ascensió Recta	Declinació	Magnitud V	Tipus Espectral	Velocitat radial (km/s)
05h 59m 43,24s	+37° 12' 45",95	2,62	A0sp	29,50



Línies (angstrom)			Element	Rang de tipus	Vel. (km/s)
Observada	Referència	Teòrica			
4130,23	4128,87	4128,65	A II	{A0Ib-G0Ia}	-115
4732,38	4730,91	4731,36	HfII	{A0-G0Ia}	-65
4780,92	4778,88	4779,98	CoI	{A0-G0IV}	-59
4918,55	4924,00	4923,58	GdII	{A0V-G8Ia}	306
5428,28	5422,07	5423,82	LaII	{A0-G0Ia}	-247
· Mitja					-36
· Desviació estàndard					137
· Diferència absoluta respecte la teòrica					65

SAO 60896

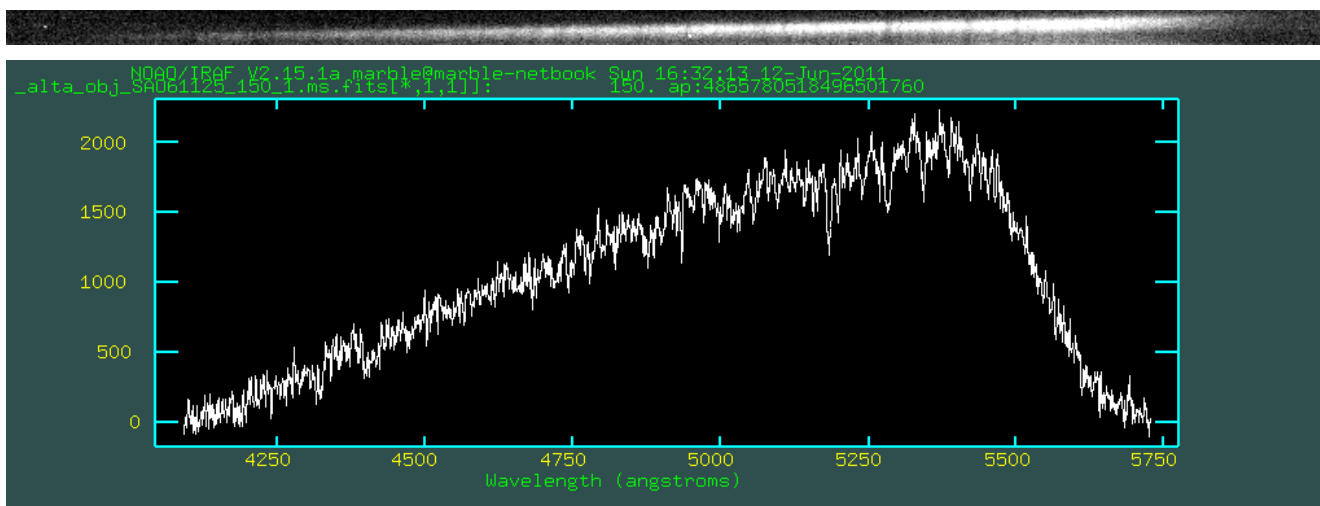
Ascensió Recta	Declinació	Magnitud V	Tipus Espectral	Velocitat radial (km/s)
08h 33m 21,84s	+36° 26' 11",12	6,201	F5Vbwv	0,00



Línies (angstrom)			Element	Rang de tipus	Vel. (km/s)
Observada	Referència	Teòrica			
4706,39	4708,14	4708,04	CrI	{A0-A9III;A0Ib-G0Ia}	105
4760,55	4764,01	4765,78	HfII	{F2-K0II;G0-K0Ib}	329
4982,20	4983,57	4982,13	Y II	{F2-K0II;G0-K0Ib}	-4
5316,51	5316,73	5316,07	P II	{F0-F5V;B3-F2II;A0-G0Ia}	-25
5581,06	5581,37	5581,87	Y I	{F6-K1IV;G0-M2Iab}	44
· Mitja					90
· Desviació estàndard					102
· Diferència absoluta respecte la teòrica					90

SAO 61125

Ascensió Recta 08h 54m 14,70s **Declinació** +30° 34' 45",04 **Magnitud V** 5,42 **Tipus Espectral** G7III **Velocitat radial (km/s)** -60,10

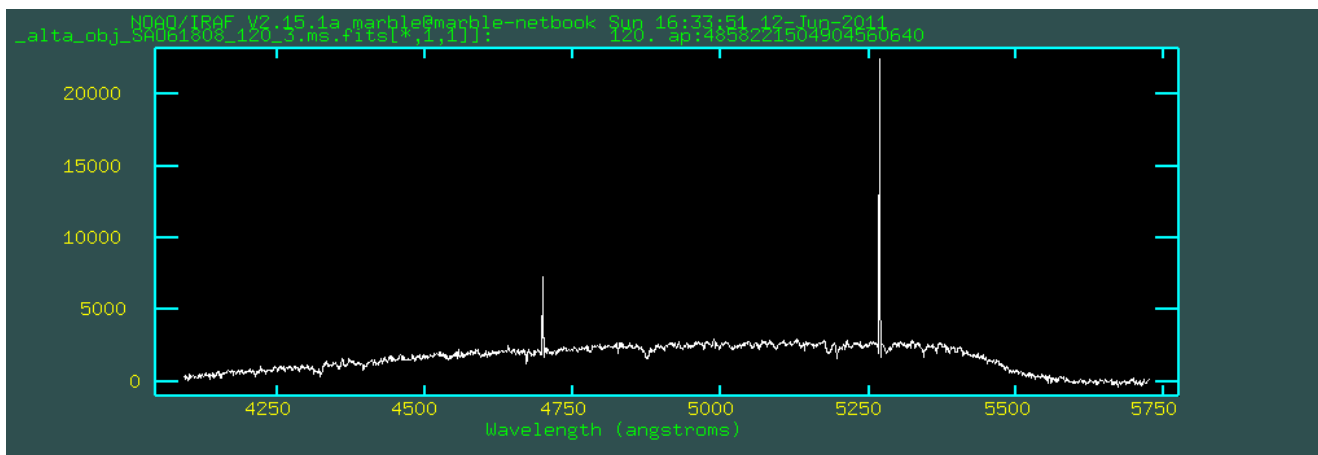


Línies (angstrom)			Element	Rang de tipus	Vel. (km/s)
Observada	Referència	Teòrica			
4133,74	4132,67	4134,49	V I	{A0V-K1IV;G0III-M2Ia}	54
4382,15	4383,25	4383,44	Lall	{A0V-M2Ia}	88
5169,07	5167,58	5167,28	Lall	{A0V-M2Ia}	-104
5175,70	5173,18	5172,60	AlIII	{A0V-M2Ia}	-180
5182,98	5183,99	5183,42	Lall	{A0V-M2Ia}	25
· Mitja					-23
· Desviació estàndard					95
· Diferència absoluta respecte la teòrica					37

SAO 61808

Ascensió Recta 10h 01m 01,02s **Declinació** +31° 55' 28",97 **Magnitud V** 5,4 **Tipus Espectral** G3V **Velocitat radial (km/s)** 56,00

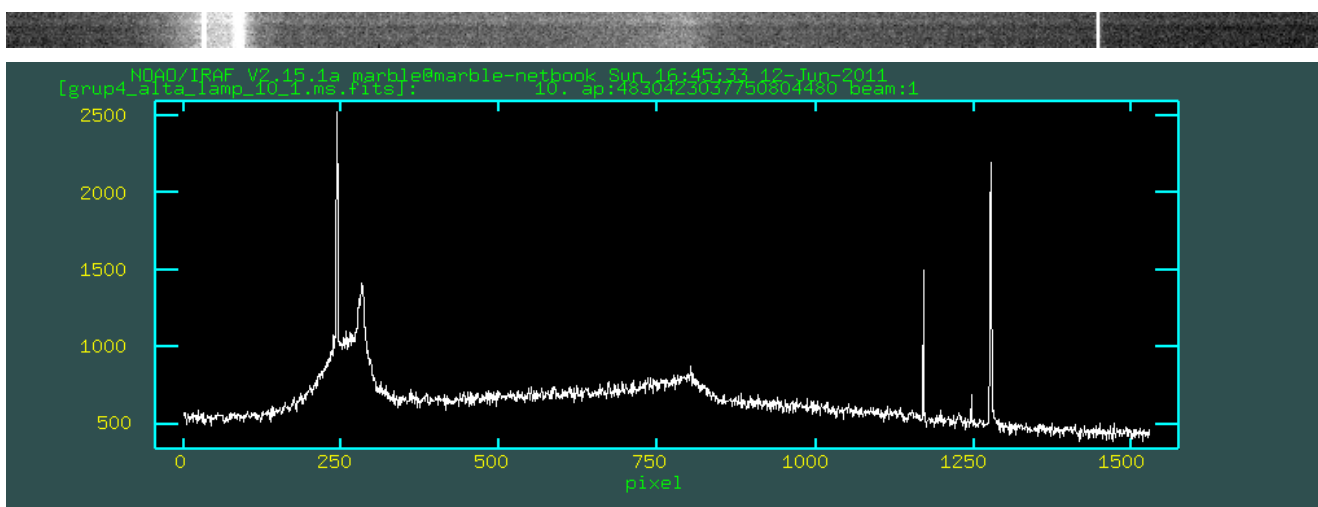




Línies (angstrom)			Element	Rang de tipus	Vel. (km/s)
Observada	Referència	Teòrica			
4130,55	4132,74	4134,49	V I	{A0V-K1IV;G0III-M2Ia}	286
4154,87	4155,12	4154,11	Fel	{F0-G5V;A0-A9III;F2-K0II;G0-K2Ib}	-55
5165,50	5167,38	5167,28	LaII	{A0V-M2Ia}	103
5168,33	5173,22	5172,60	AlIII	{A0V-M2Ia}	248
5182,63	5183,78	5183,42	LaII	{A0V-M2Ia}	46
· Mitja					126
· Desviació estàndard					113
· Diferència absoluta respecte la teòrica					70

5.2.2.3. Bloc 3

LÀMPADA DE CALIBRACIÓ



Línies associades:

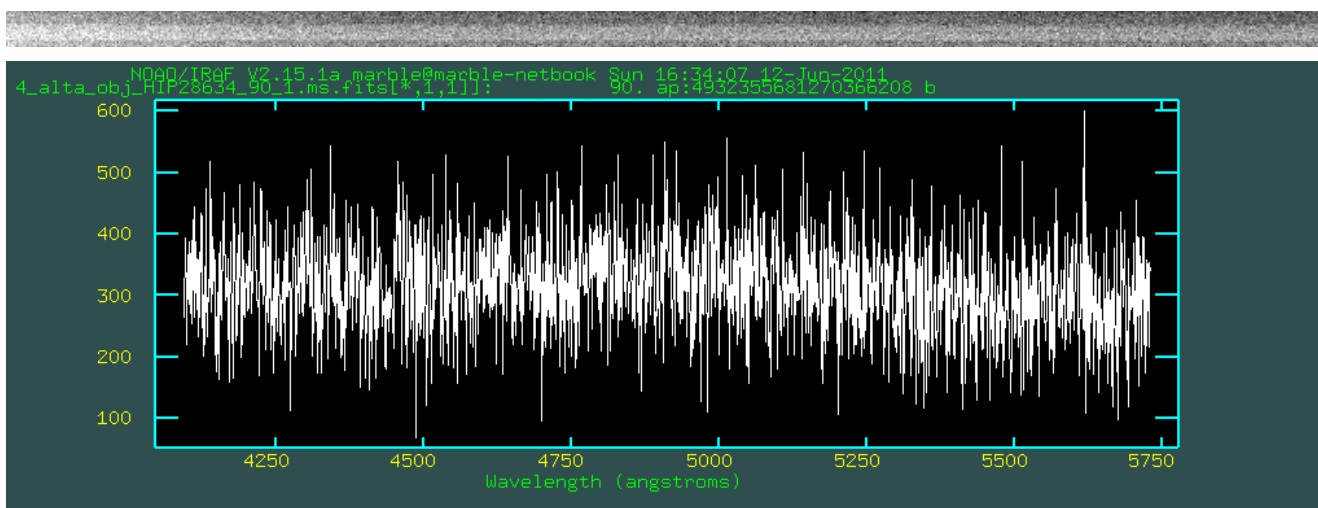
Píxel	λ teòrica associada (Å)
637,92 \pm 0,02	4366
141,12 \pm 0,14	5424
121,35 \pm 0,02	5465

Funció de calibració ($y = ax + b$):

Paràmetres		Dispersió	
a (1/píxel)	b (Å)	σ (Å/mm)	σ (Å/píxel)
-2,128 \pm 0,001	5723,8 \pm 0,3	118,09	1,06

HIP 28634

Ascensió Recta	Declinació	Magnitud V	Tipus Espectral	Velocitat radial (km/s)
06h 02m 45,11s	+47° 48' 33",49	6,504	F5	-77,10

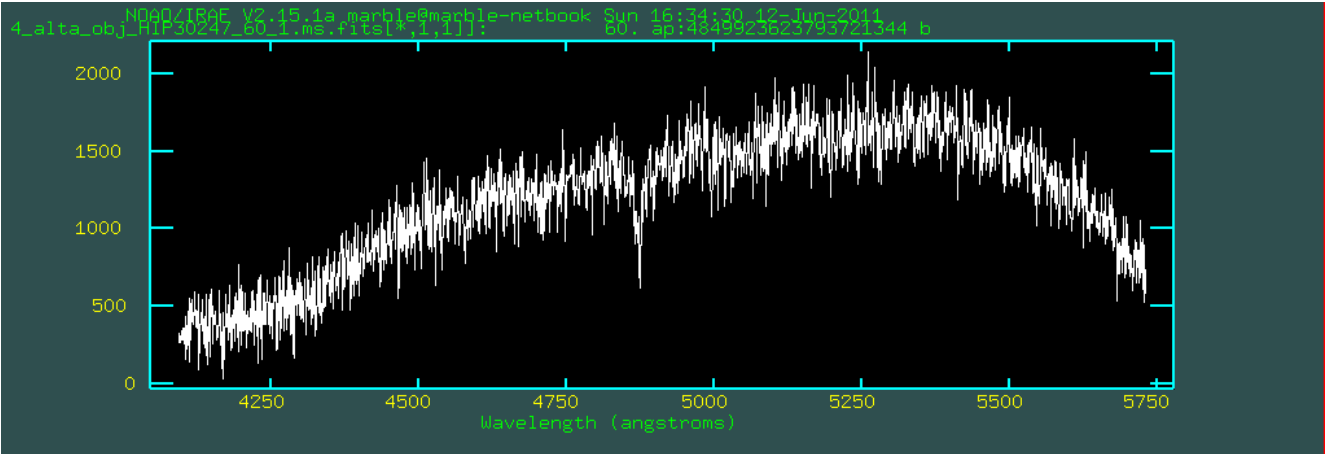


Línies (angstrom)			Element	Rang de tipus	Vel. (km/s)
Observada	Referència	Teòrica			
4707,13	4708,14	4708,04	CrI	{A0-A9III;A0Ib-G0Ia}	58
4757,57	4764,01	4765,78	HfII	{F2-K0II;G0-K0Ib}	517
4979,51	4983,57	4982,13	Y II	{F2-K0II;G0-K0Ib}	158
5320,74	5316,73	5316,07	P II	{F0-F5V;B3-F2II;A0-G0Ia}	-264
5581,44	5581,37	5581,87	Y I	{F6-K1IV;G0-M2Iab}	23
· Mitja					98
· Desviació estàndard					191
· Diferència absoluta respecte la teòrica					176

HIP 30247

Ascensió Recta	Declinació	Magnitud V	Tipus Espectral	Velocitat radial (km/s)
06h 21m 46,11s	+53° 27' 08",62	5,347	F5V	-0,50

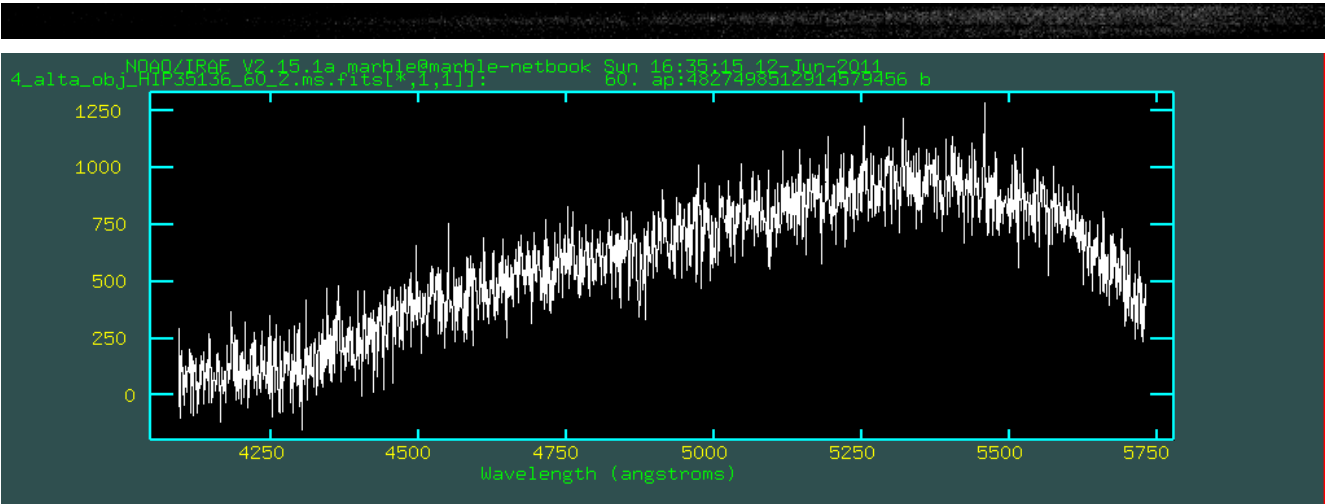




Línies (angstrom)			Element	Rang de tipus	Vel. (km/s)
Observada	Referència	Teòrica			
4709,01	4708,23	4708,04	CrI	{A0-A9III;A0Ib-G0Ia}	-62
4763,63	4764,03	4765,78	HfII	{F2-K0II;G0-K0Ib}	135
4985,76	4983,56	4982,13	Y II	{F2-K0II;G0-K0Ib}	-219
5313,82	5316,45	5316,07	P II	{F0-F5V;B3-F2II;A0-G0Ia}	127
5580,42	5581,39	5581,87	Y I	{F6-K1IV;G0-M2Iab}	78
· Mitja					12
· Desviació estàndard					122
· Diferència absoluta respecte la teòrica					12

HIP 35136

Ascensió Recta	Declinació	Magnitud V	Tipus Espectral	Velocitat radial (km/s)
07h 15m 50,11s	+47° 14' 25",50	5,554	G0V	85,30



Línies (angstrom)			Element	Rang de tipus	Vel. (km/s)
Observada	Referència	Teòrica			
4132,75	4132,12	4134,49	V I	{A0V-K1IV;G0III-M2Ia}	126
4156,14	4155,12	4154,11	FeI	{F0-G5V;A0-A9III;F2-K0II;G0-K2Ib}	-147
5169,05	5167,88	5167,28	LaII	{A0V-M2Ia}	-103
5174,67	5173,42	5172,60	AlIII	{A0V-M2Ia}	-120
5181,14	5184,00	5183,42	LaII	{A0V-M2Ia}	132
· Mitja					-22
· Desviació estàndard					121
· Diferència absoluta respecte la teòrica					108

6. Conclusions

Respecte a la classificació d'estrelles amb espectres de baixa resolució, els resultats experimentals obtinguts han estat força bons ja que la identificació dels tipus ha esdevingut bastant clara en la majoria dels casos. Val a dir que, prèviament, tal com s'ha especificat en l'apartat 5.1, ja es van escollir els millors espectres de tots els grups, fet que ha facilitat l'anàlisi. El motiu pel qual es va fer aquesta selecció va ser, per una banda, per tal d'analitzar el major nombre d'espectres possible i, per l'altra, perquè degut al mal estat de la CCD emprada, hi havia imatges que presentaven molt de soroll i dificultaven l'estudi.

Cal fer notar de nou que el procés d'identificació de les línies per espectres de baixa resolució ha estat realitzat per inspecció visual directa de manera que els valors obtinguts són només orientatius però d'utilitat per determinar el tipus espectral de l'estrella en qüestió.

Per altra banda, en quant a l'anàlisi de velocitats d'espectres d'alta resolució, l'estrella més ràpida disponible té una velocitat radial de 135 km/s, això implica que per efecte *Doppler* les seves línies d'absorció característiques es trobaran desplaçades 2.25\AA (per longituds d'ones de l'ordre de 5.000\AA). En canvi, la resolució de l'espectrògraf és de 2.4\AA i només seria factible apreciar diferències si es comparaessin línies entre estrelles de gran velocitat oposada. Si s'utilitza l'estrella de velocitat negativa més elevada (-98 km/s), una mateixa línia (al voltant dels 5.000\AA) a les dues estrelles estaria separada per 3.8 píxels i podria ser observada amb la resolució de l'espectrògraf si els errors són baixos. No obstant, com s'ha dit, la CCD amb la que s'han pres les imatges no es trobava en bon estat i els resultats s'han vist fortament distorsionats, limitant aquest tipus d'anàlisi. A continuació es presenta un quadre resum amb els resultats:

Objecte	Velocitat (km/s)		
	Teòrica	Calculada	Desviació
HD81192	135	256	201
HIP57939	-98	1,036	330
SAO77800	0.3	-104	148
SAO58636	29.5	-36	137
SAO60896	0	90	102
SAO61125	-60.1	-23	95
SAO61808	56	126	113
HIP28634	-77.1	98	191
HIP30247	-0.5	12	122
HIP35136	85.3	-22	121
SAO28142	0.55	126	189
SAO81863	82.72	63	138

Comparativament, els espectres d'alta resolució disposen d'una pitjor relació senyal/soroll donat que s'està dispersant la llum d'una franja més limitada. Aquest efecte es pot compensar augmentant el temps d'exposició. No obstant el mal estat de la CCD ha impedit mantenir aquesta relació prou baixa com per poder dur a terme un anàlisi precís.

Per a la localització de les línies ha estat de gran utilitat combinar l'ús d'IRAF amb les imatges FITS del catàleg d'espectres de referència de STELIB, les quals ja tenen aplicades correccions per extinció atmosfèrica i velocitat radials. Ampliant les zones d'interès, ha estat possible comparar l'espectre tipus amb l'observat i

determinar la ubicació de les línies ajustant una gaussiana. Posteriorment, s'ha identificat l'element que la produeix i tipus d'estrelles que la poden tenir segons la informació del catàleg ILLSS. No obstant, cal destacar que la baixa qualitat de les imatges pot haver induït a error en la localització de les línies afectant conseqüentment als resultats presentats.

En termes generals, cal destacar que el procés plantejat inicialment per l'enunciat de la pràctica presenta diverses limitacions que han estat evitades gràcies a l'ús de l'entorn IRAF, com per exemple:

- La calibració i la mesura de posicions de la línia s'ha realitzat mitjançant l'ajustament de gaussianes.
- El fons de cel ha estat extret de la franja amb l'espectre.
- S'ha ajustat una funció polinòmica per identificar la correcta forma de la traça donat que aquesta no té per què ser perfectament perpendicular a la imatge.

Amb l'objectiu d'obtenir els millors resultats possibles, és de gran importància reduir el nombre d'errors que es poden produir mitjançant el tractament de les dades. Només d'aquesta manera es poden arribar a obtenir resultats científics rigorosos i fiables. Per aquesta raó, s'ha decidit invertir el temps necessari per realitzar un anàlisi el més acurat possible.

7. Bibliografia

- Guió de Pràctiques d'Astronomia Observacional: Obtenció i reducció d'espectres estel·lars amb CCD. Classificació i càlcul de velocitats radials. J. Torra, S.J. Ribas, M. Romero.
- Isaac Newton Group of Telescopes – Object Visibility
<http://catserver.ing.iac.es/staralt/>
- Base de dades Simbad
<http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/sim-fidtp>
- Isaac Newton Group of Telescopes – Object Visibility
<http://catserver.ing.iac.es/staralt/>
- Spectral atlas Frames (Fast Stellar Spectral Atlas)
<https://www.cfa.harvard.edu/~pberlind/atlas/atframes.html>
- Stellar Library for stellar population synthesis models (STELIB)
<http://www.ast.obs-mip.fr/article181.html>
- Identification List of Lines in Stellar Spectra (ILLSS)
<http://cdsarc.u-strasbg.fr/viz-bin/>
- Optical (nebular) spectral lines. European Southern Observatory. Mark Westmoquette

<http://www.eso.org/~mwestmoq/lines.html>

- A Digital Spectral Classification Atlas

http://ned.ipac.caltech.edu/level5/Gray/Gray_contents.html