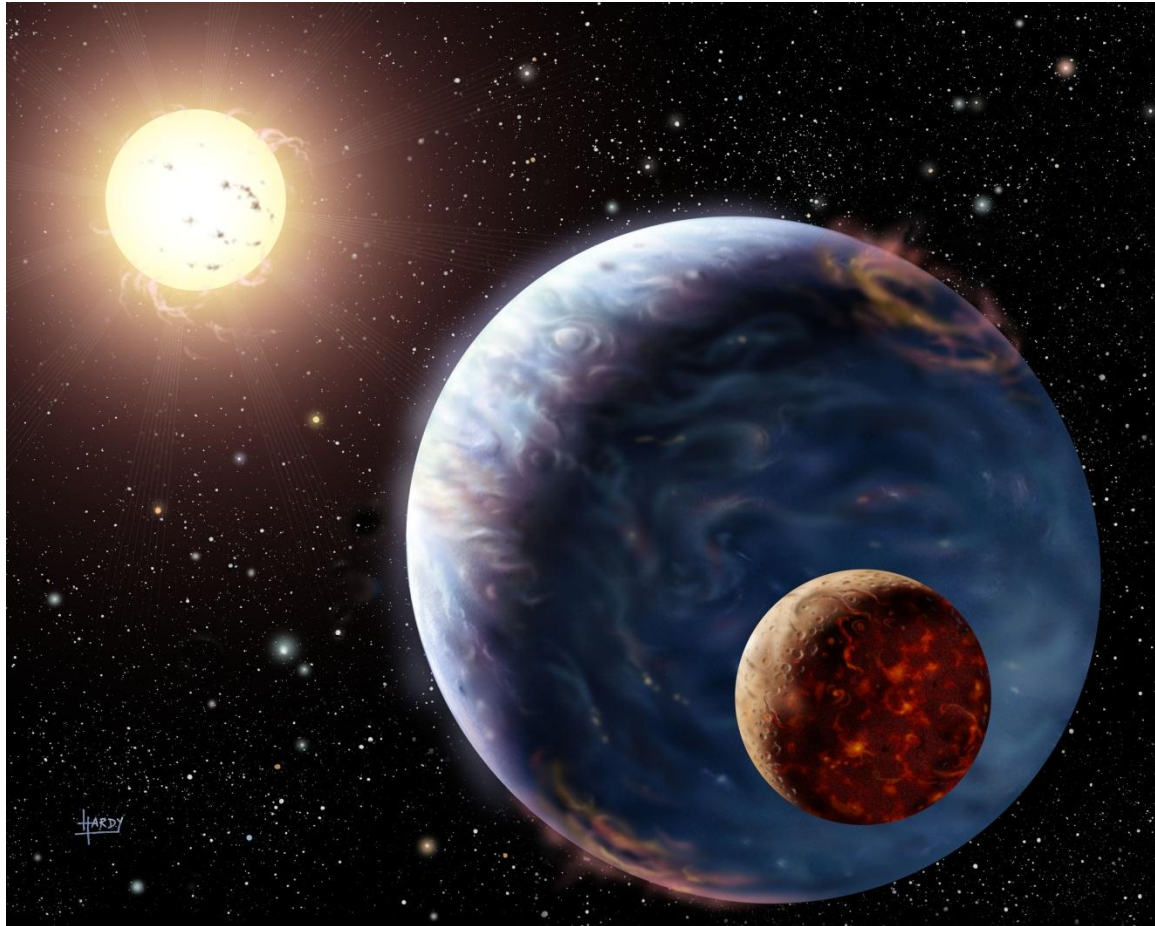


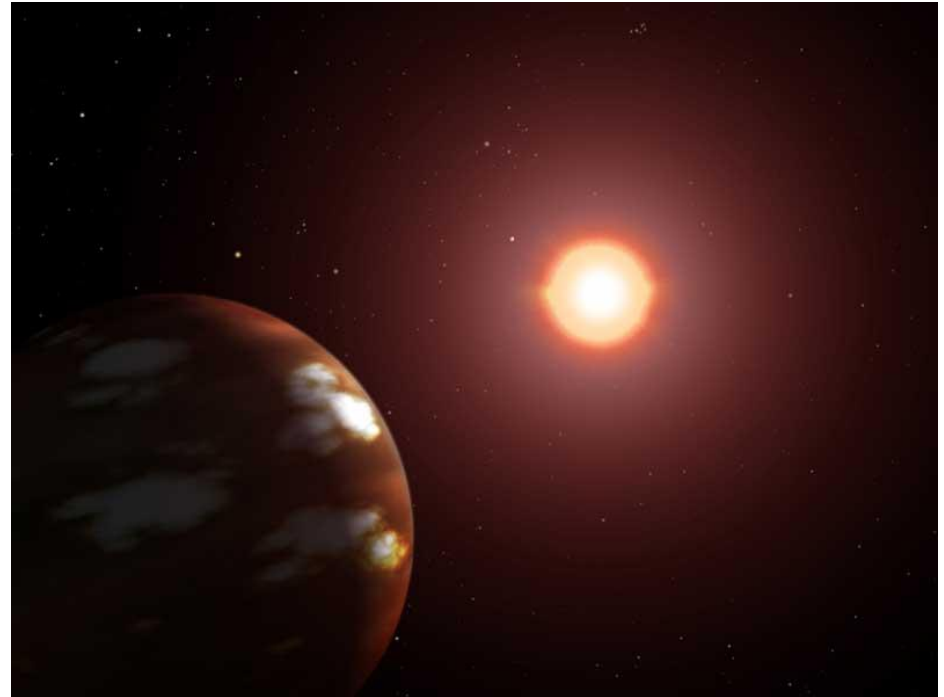
Détection des exoplanètes avec des télescopes de petites tailles



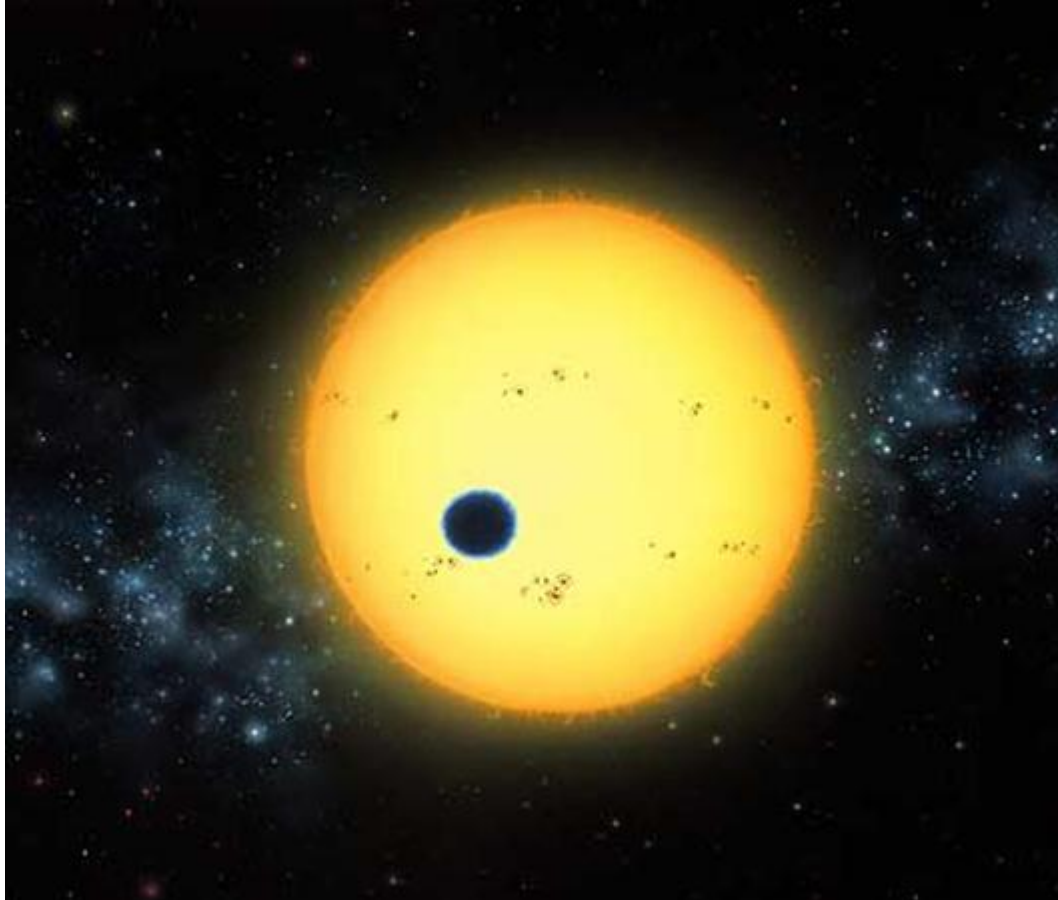
Christian Buil – OISA 2011

Deux méthodes de détection accessibles

- Méthode par occultation
(détection photométrique)
- Méthode par vélocimétrie
(perturbations dynamiques)

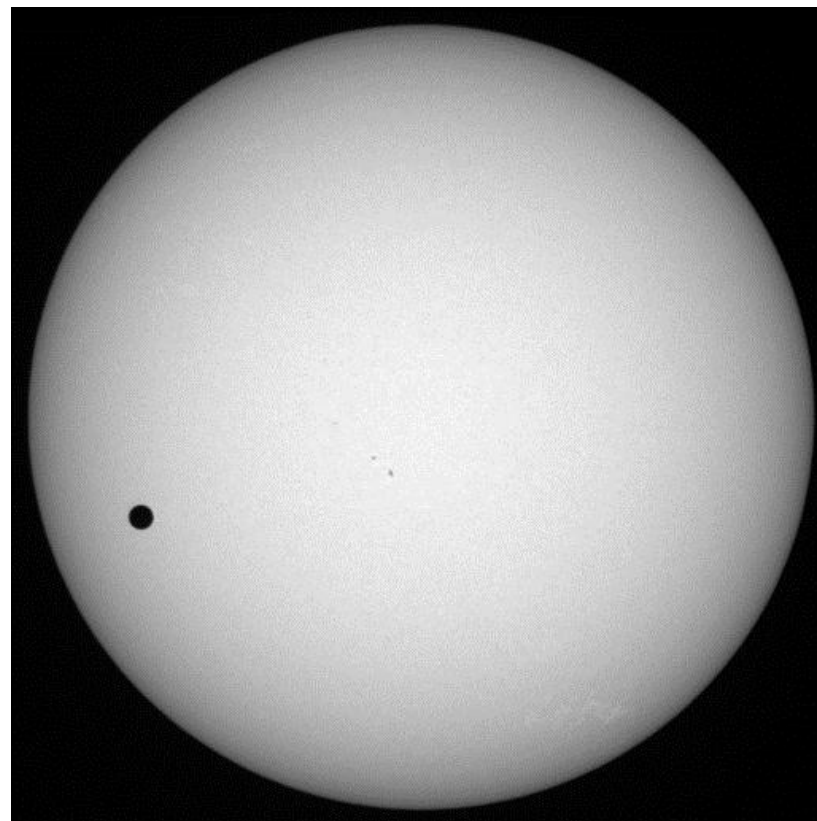
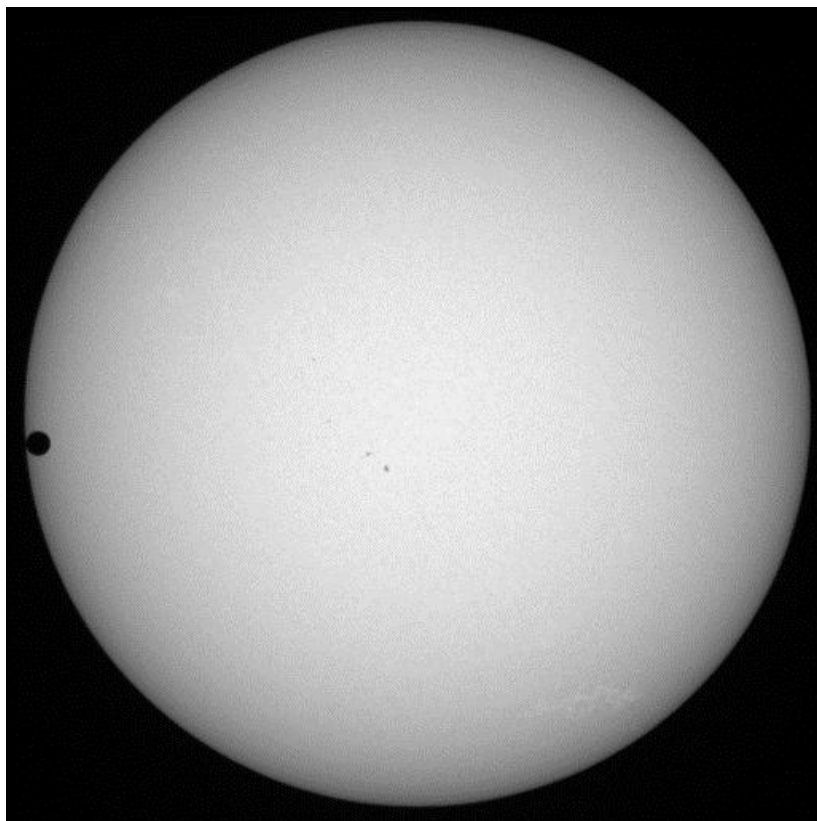


La détection photométrique



Transit de la planète sur le disque de l'étoile

Transit de la planète Vénus sur le disque solaire
8 juin 2004 – Tabriz (Iran)



Canon 10D + téléobjectif Canon 400 mm f/5.6

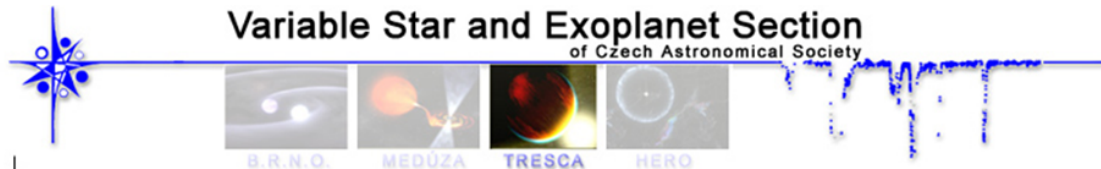
La détection n'est possible que si le plan de l'orbite est pratiquement confondu avec la direction de visée



Méthode assez sélective : favorise la découverte de planètes à courte période orbitale
Elle demande une grande précision photométrique :

- Le passage de Jupiter devant le Soleil provoque une baisse d'éclat de 1%
- Le passage de la Terre devant le Soleil provoque une baisse d'éclat de 0,01%

Catalogues et éphémérides



ETD Exoplanet Transit Database

... complete ... worldwide ... continuously growing ...
<http://var.astro.cz/ETD>

Known transitters:

CoRoT-1 b
CoRoT-10 b
CoRoT-11 b
CoRoT-12 b
CoRoT-13 b
CoRoT-2 b
CoRoT-3 b
CoRoT-4 b
CoRoT-5 b
CoRoT-6 b
CoRoT-7 b
CoRoT-8 b
CoRoT-9 b
GJ1214 b
GJ436 b
HAT-P-1 b
HAT-P-10/WASP-11 b
HAT-P-11 b
HAT-P-12 b
HAT-P-13 b
HAT-P-14 b
HAT-P-15 b
HAT-P-16 b
HAT-P-17 b
HAT-P-18 b
HAT-P-19 b
HAT-P-2 b
HAT-P-20 b
HAT-P-21 b
HAT-P-22 b
HAT-P-23 b
HAT-P-24 b

ETD - Exoplanet Transit Database

[Announce us paper with transits](#) | [How to contribute to ETD](#) | [Model-fit your data](#) | [Transit predictions](#) | [KEPLER transit predictions](#) | [KEPLER Candidates](#)

ETD is here to supply quickly and easily the **list of all ever observed transits of transiting exoplanets** to observers and researchers.

Our database administrators are periodically checking for new transits - both in literature and in on-line internet sources. Each transit is stored with complete citations, link to the paper / on-line source URL.

For each exoplanet, there is available graphical output of relations:

- transit **TIMINGS vs. EPOCH**
- transit **DURATION vs. EPOCH**
- transit **DEPTH vs. EPOCH** and
- **list of available transits**.

Data quality is rated for each observation and the DQ index is taken into account while plotting graphs.

Tools for observers :

- Observers can plot their own observations in diagrams.
- Model-fitting of transit observation and finding out parameters HJDmid, Depth, Duration.
- Global transit predictions.

	OBJECT	CONST	# OF DATA	TIME SPAN FROM - TILL		LAST CHANGES (DAYS) <small>red if less then week ago</small>
1	CoRoT-1 b	Mon	49	2007-02	2010-02	07. May 2010 (186)
2	CoRoT-10 b	Aql	1	2007-06	2007-06	16. Jun 2010 (146)

What's new:

2010-10-14 : New transiting exoplanet **WASP-32 b (Psc)** was added to ETD.
See a discovery paper by P. F. L Maxted et al. 2010: **WASP-32b: A transiting hot Jupiter planet orbiting a lithium-poor, solar-type star**

Current statistics:

(10. 11. 2010)

of objects: **99**

of transits: **1802**

DQ	# of transits
1	514
2	190
3	495
4	263
5	335

<http://var2.astro.cz/ETD/>

Outil de prédiction des transits

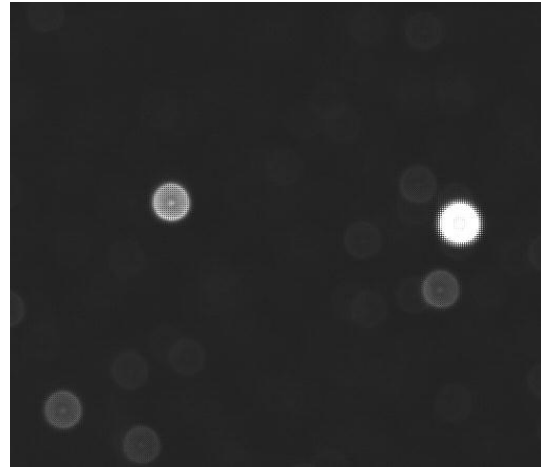
Transits predictions for NEXT 365 days.
ELONGITUDE: 2° and LATITUDE: 43°

Transit occurs below 20° in the sky. | **During the daylight.** | **Observable.**

Tmid (HJD)	BEGIN (UT/h,A)	CENTER (DD.MM. UT/h,A)	END (UT/h,A)
2455510.169	09.11 14:10 (15°,NE)	09.11. 16:03 (34°,E)	09.11 17:56 (54°,E)
2455512.689	12.11 2:38 (23°,NW)	12.11. 4:32 (6°,NW)	12.11 6:25 (-8°,NW)
2455515.209	14.11 15:07 (27°,E)	14.11. 17:00 (47°,E)	14.11 18:53 (68°,E)
2455517.729	17.11 3:36 (11°,NW)	17.11. 5:29 (-4°,NW)	17.11 7:22 (-13°,N)
2455520.249	19.11 16:05 (41°,E)	19.11. 17:58 (62°,E)	19.11 19:51 (79°,SE)
2455522.769	22.11 4:33 (0°,NW)	22.11. 6:26 (-11°,N)	22.11 8:20 (-14°,N)
2455525.289	24.11 17:02 (55°,E)	24.11. 18:55 (74°,SE)	24.11 20:48 (75°,SW)
2455527.809	27.11 5:31 (-8°,NW)	27.11. 7:24 (-14°,N)	27.11 9:17 (-12°,N)
2455530.329	29.11 18:00 (69°,SE)	29.11. 19:53 (79°,S)	29.11 21:46 (62°,W)
2455532.849	02.12 6:28 (-13°,N)	02.12. 8:21 (-14°,N)	02.12 10:15 (-5°,NE)
2455535.369	04.12 18:57 (79°,S)	04.12. 20:50 (69°,W)	04.12 22:43 (48°,W)
2455537.889	07.12 7:26 (-14°,N)	07.12. 9:19 (-9°,NE)	07.12 11:12 (4°,NE)
2455540.408	09.12 19:54 (74°,SW)	09.12. 21:48 (55°,W)	09.12 23:41 (34°,W)
2455542.928	12.12 8:23 (-11°,N)	12.12. 10:16 (-1°,NE)	12.12 12:10 (16°,NE)
2455545.448	14.12 20:52 (61°,W)	14.12. 22:45 (41°,W)	15.12 0:38 (22°,NW)
2455547.968	17.12 9:21 (-5°,NE)	17.12. 11:14 (10°,NE)	17.12 13:07 (29°,E)
2455550.488	19.12 21:49 (47°,W)	19.12. 23:43 (27°,W)	20.12 1:36 (9°,NW)
2455553.008	22.12 10:18 (5°,NE)	22.12. 12:11 (23°,NE)	22.12 14:05 (43°,E)
2455555.528	24.12 22:47 (33°,W)	25.12. 0:40 (15°,NW)	25.12 2:33 (-1°,NW)
2455558.048	27.12 11:16 (16°,NE)	27.12. 13:09 (36°,E)	27.12 15:02 (57°,E)
2455560.568	29.12 23:44 (20°,NW)	30.12. 1:38 (4°,NW)	30.12 3:31 (-9°,NW)
2455563.088	01.01 12:13 (30°,E)	01.01. 14:06 (50°,E)	01.01 16:00 (70°,SE)
2455565.608	04.01 0:42 (9°,NW)	04.01. 2:35 (-6°,NW)	04.01 4:28 (-14°,N)

<http://var2.astro.cz/ETD/>

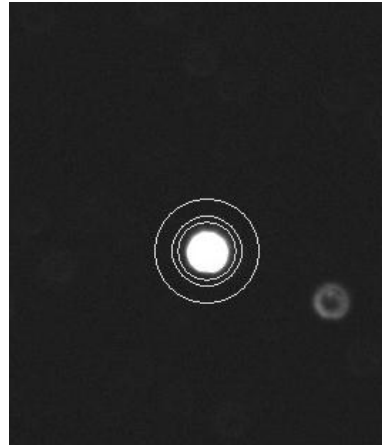
Pas obligatoirement besoin de gros moyens...
Exemple avec un boîtier numérique et un téléobjectif photo !



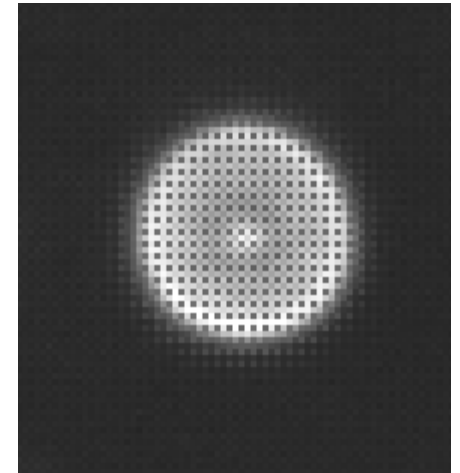
**Image
volontairement
défocalisée**



But : augmentation de la dynamique,
réduction de la scintillation (1 minutes de
pose typique) et des effets
d'échantillonnage



Photométrie d'ouverture sur
composante R ou V ou B
(séparation des couches préalable)



Agrandissement de l'image
d'une étoile. Noter la structure
CFA (entrelacement des pixels
rouge, vert et bleu)

Intérêts de défocaliser l'image

- Accroissement de la dynamique de l'image en éclairant plusieurs pixels que l'on somme à posteriori, plutôt que saturer un seul pixel dans une image focalisée.
- Accroissement du temps de pose sans saturer = réduction de l'erreur photométrique associée à la scintillation atmosphérique (crucial avec de petits télescopes)
- Réduction des biais de mesures induits par les défauts cosmétiques du télescope (matrice CFA dans un détecteur couleur, poussières et défauts de gain ou flat-field mal corrigées, ...)
- Moindre sensibilité aux erreurs de suivi (conséquences d'une non-uniformité de réponse intra-pixel négligeable)

Exemple de l'observation du transit de HD189733 b

19 juillet 2009 – Pic du Midi

Canon EOS 40D + téléobjectif 400 mm f/5.6



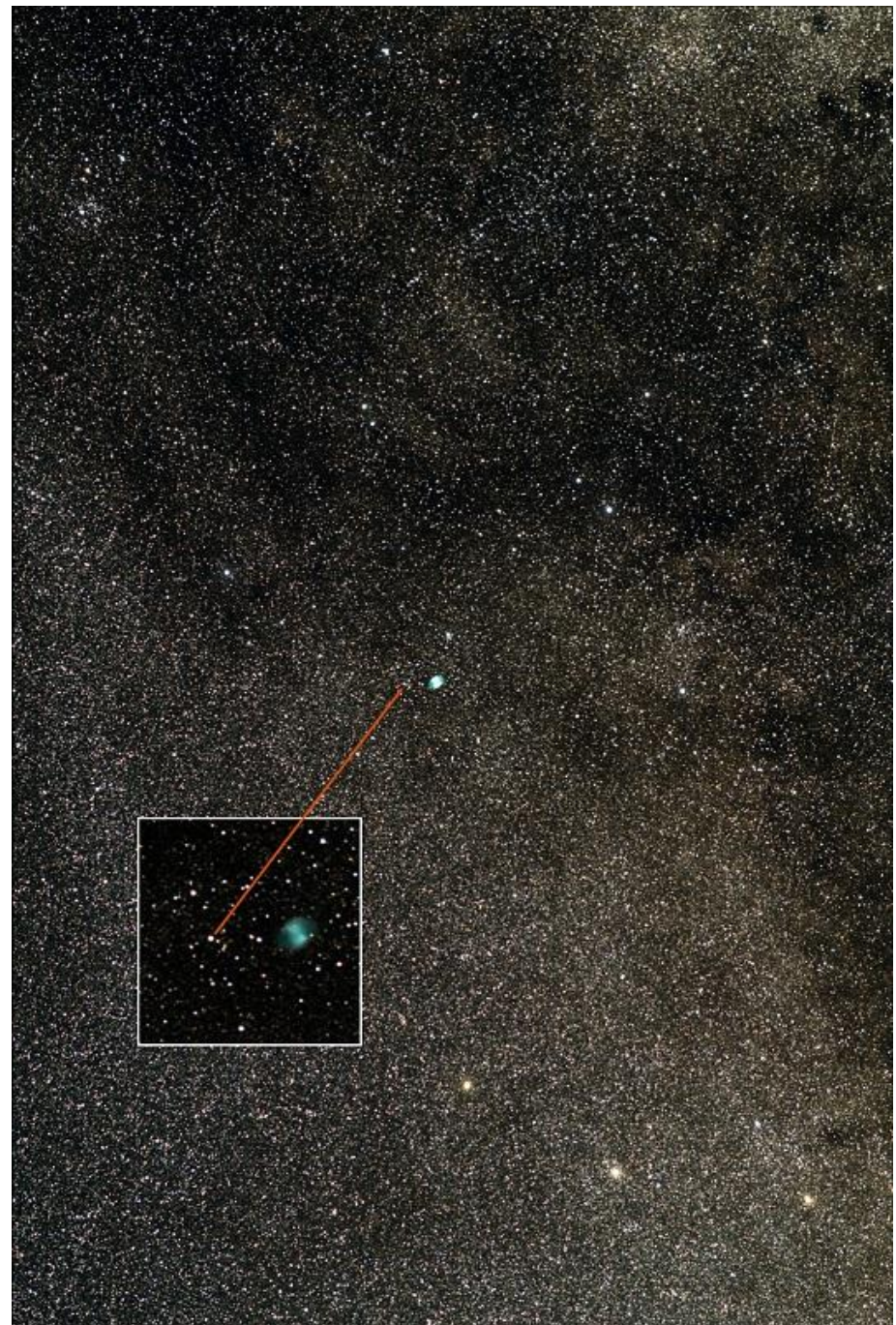
Localisation de HD189733

A proximité de la nébuleuse Dumbell (M27)

Magnitude : 7,7

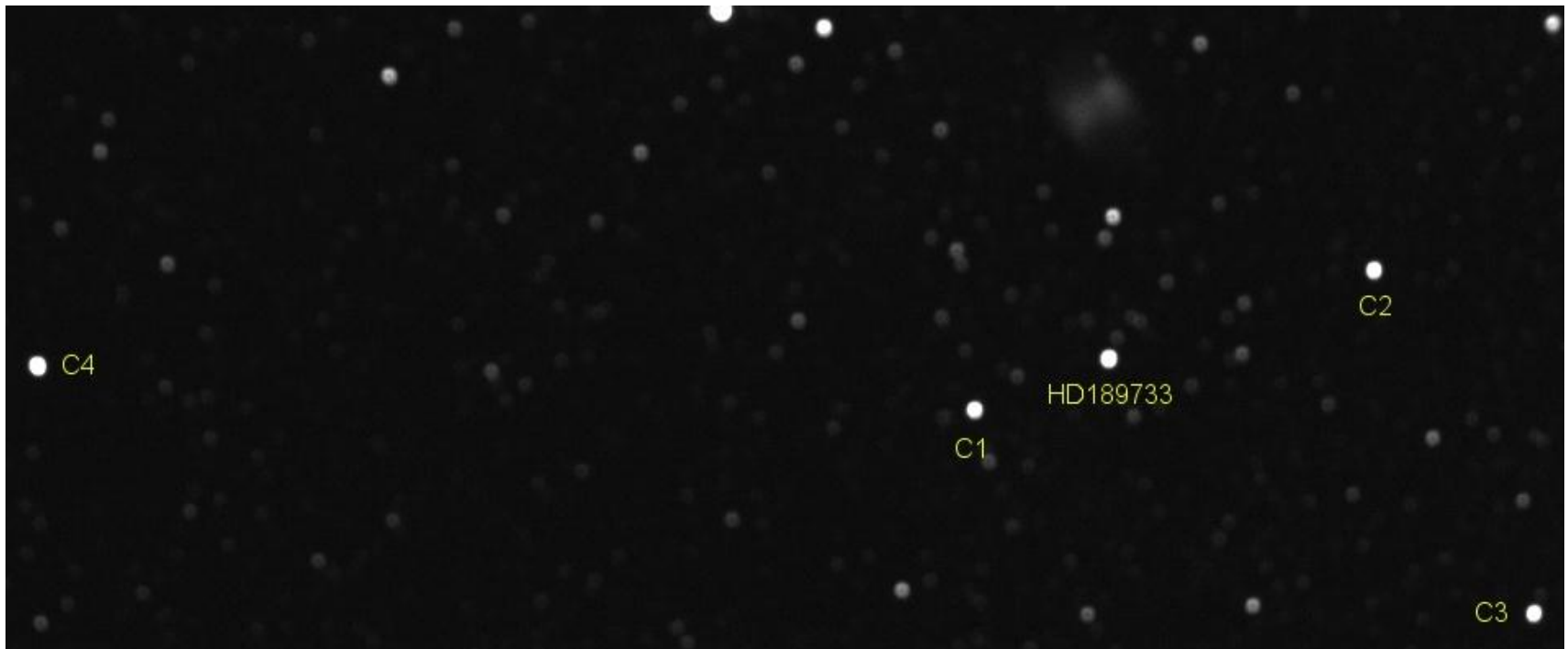
Période orbitale de la planète : 2,218 jours

Variation d'éclat prédite : 0,028 magnitude

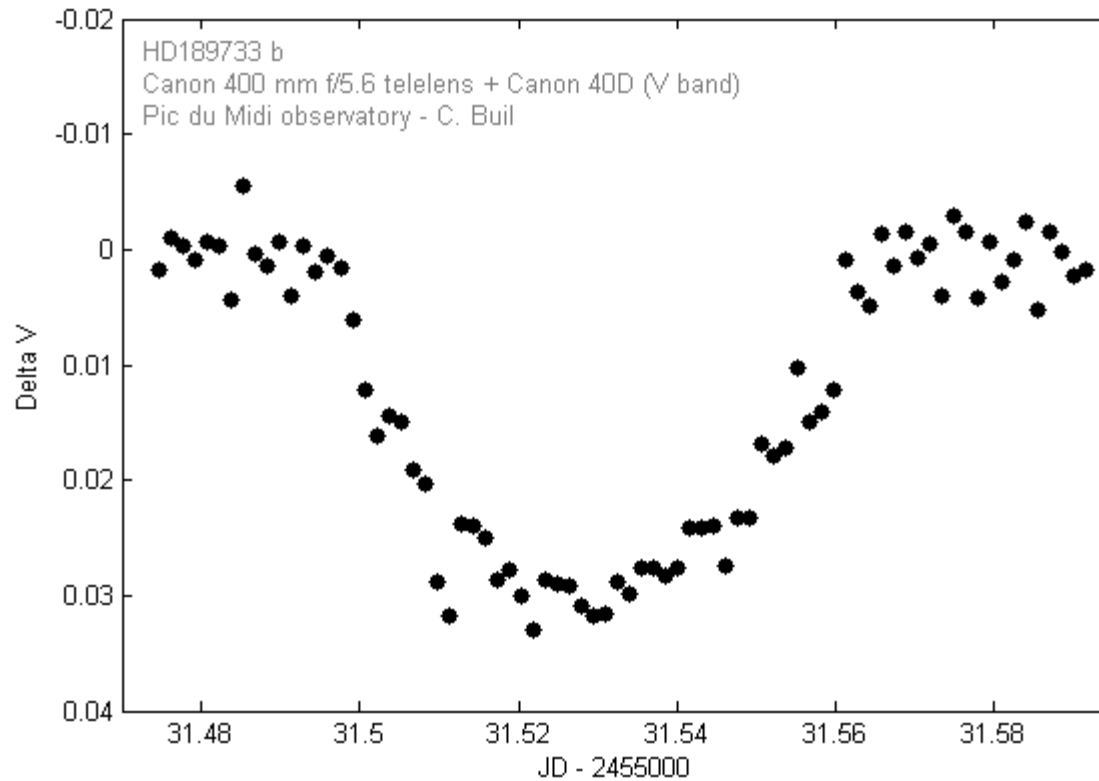


Observation

- Temps de pose : 2 minutes (réduction du bruit de scintillation à 0,001 magnitude)
- Défocalisation sur 15 pixels (accroissement de la dynamique et du temps de pose)
- Acquisition en mode RAW obligatoire
- Sélection de plusieurs étoiles de comparaison (avantage du grand champ !)
- Possibilité d'exploiter les canaux RVB (photométrie 3 couleurs automatique)
- Réduction avec le logiciel Iris



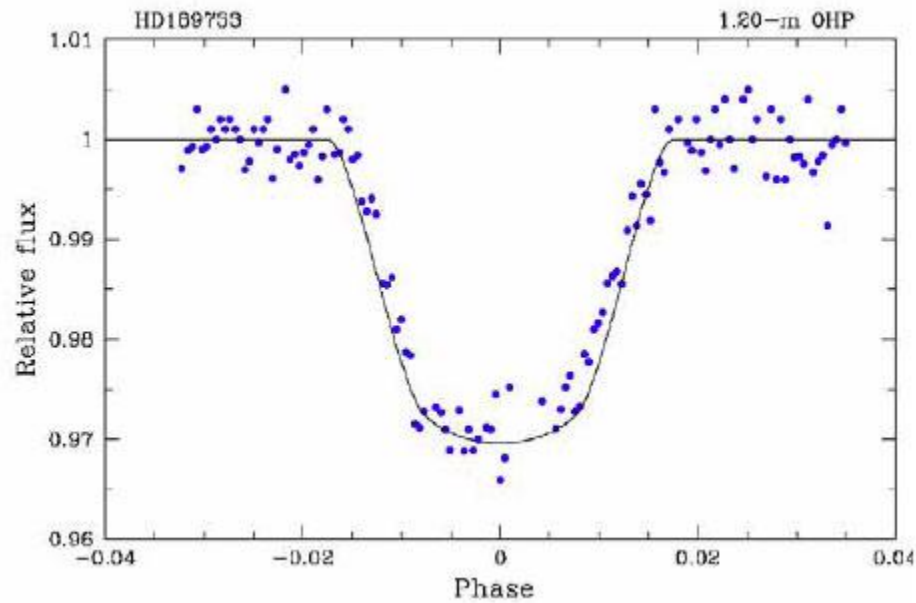
Résultat



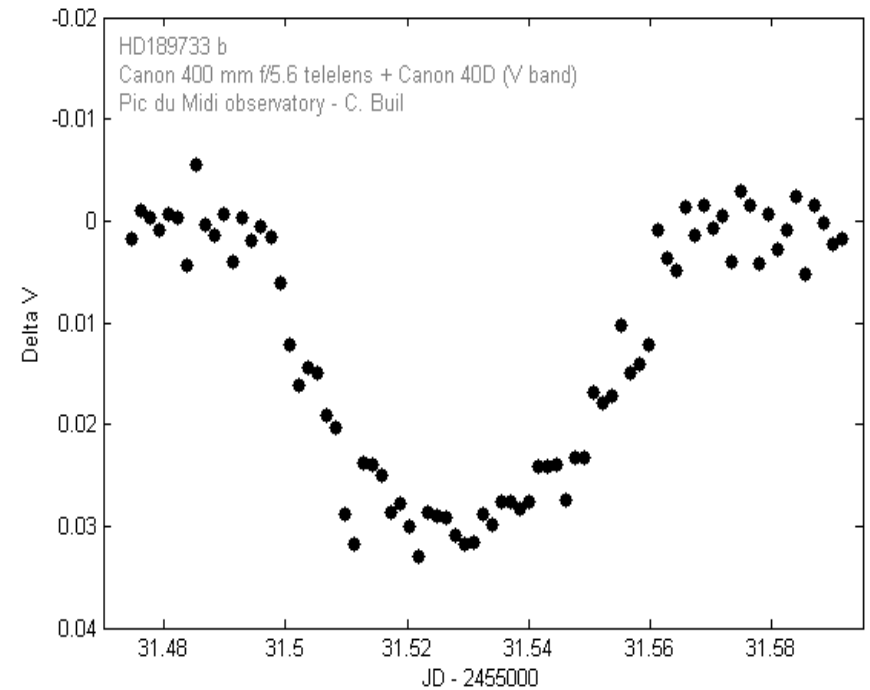
Erreur RMS caractéristique de 0,0015 magnitude

Date du milieu du transit : 19 juillet 2009 à 0h44m38s UT
(la prédiction était 0h47m)

Résultat



Observatoire de Haute-Provence
Octobre 2005
Télescope de 1,2 m



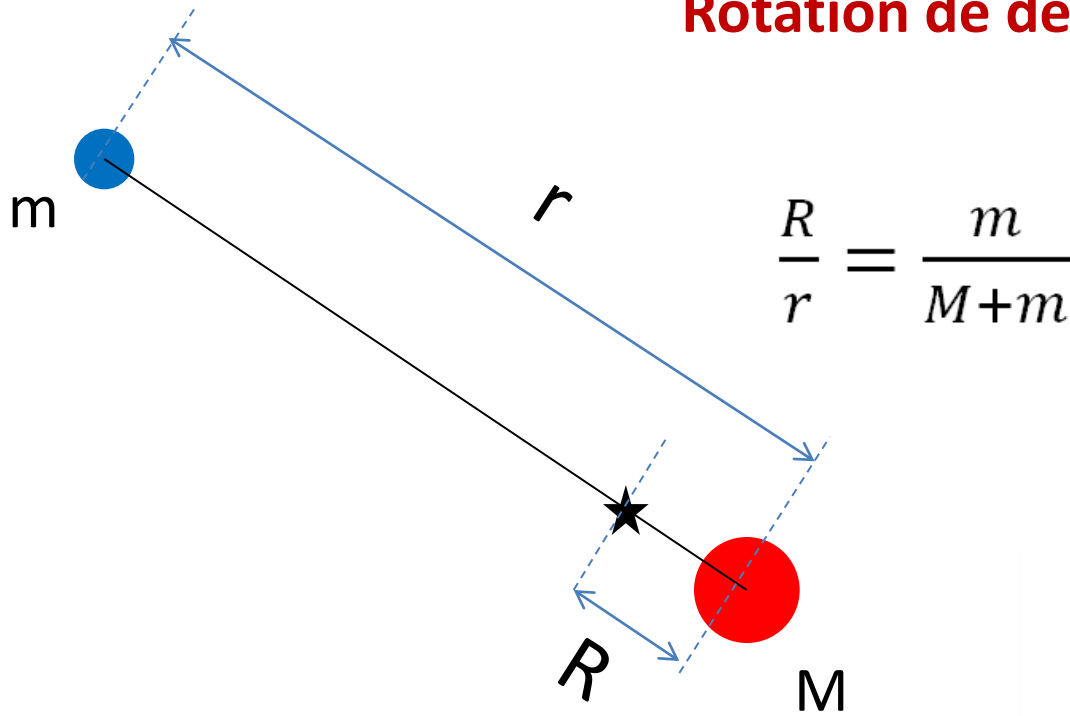
Observatoire du Pic du Midi
Juillet 2009
Télescope de 0,07 m

La méthode vélocimétrique

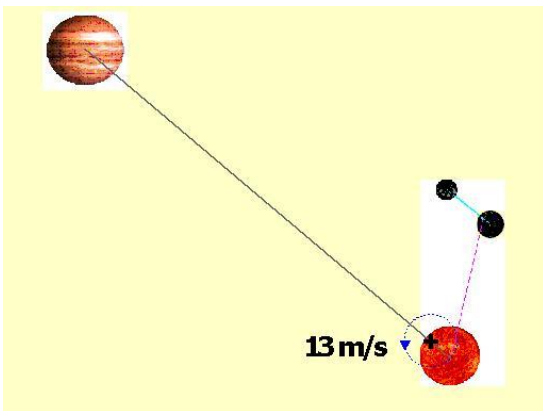
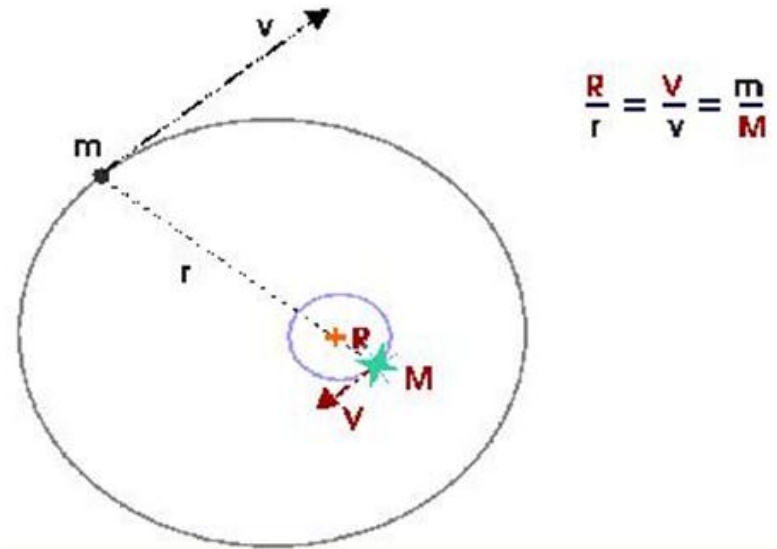
(mesure de vitesse radiales)



Rotation de deux corps liés par la gravité



Rotation autour du centre de gravité commun



Vitesse de rotation du Soleil autour de son centre de gravité commun avec Jupiter

Catalogue des exoplanètes (extrait !)

(liste complète sur exoplanet.org)

Name	Msin(i) mjupiter ±	Semi-Major Axis au	Orbital Period days ±	Orbital Eccentricity ±	ω deg ±	Time of Periastron jd ±	Velocity Semi-amplitude m/s ± ▼	Orbit Reference
HD 41004 B b	18	0.0177	1.3283	0.08	179	2452434.88	6110	Zucker 2004
CoRoT-3 b	21.8	0.0574	4.2568	0	90	2454283.138	2190	Deleuil 2008
WASP-18 b	10.2	0.0202	0.9414530	0.009	260	2454221.00	1818	Hellier 2009
HD 162020 b	15	0.0757	8.42820	0.277	28.4	2451990.677	1813	Udry 2002
XO-3 b	13.1	0.0477	3.1915	0.288	346	2454024.73	1490	Johns-Krull 2008 ; Winn 2009
WASP-14 b	7.3	0.0358	2.24375	0.091	253.4	2454462.33	993	Joshi 2009
HAT-P-2 b	8.9	0.0679	5.633473	0.517	185.2	2454388.077	980	Pal 2009
HD 114762 b	11.7	0.363	83.888	0.336	202	2449805.4	615	Butler 2006
HD 202206 b	17	0.812	255.87	0.435	161.2	2452175.3	565	Correia 2005
CoRoT-2 b	3.27	0.0281	1.742996	0	90	2454237.536	560	Alonso 2008
HD 43848 b	20	3.38	2400	0.7	229	2453230	500	Minniti 2009
HAT-P-16 b	4.2	0.0413	2.77596	0.036	214	2455025.75	531	Buchhave 2010
WASP-10 b	3.0	0.0370	3.09276	0.06	170	2454664.635	520	Johnson 2009
OGLE2-TR-L9 b	4.50	0.0413	2.4855335	0	90	2454492.798	500	Snellen 2009
HAT-P-13 c	15	1.19	429	0.69	176.7	2454890.0	500	Bakos 2009
HD 168443 b	7.8	0.295	58.1121	0.529	172.9	2454347.73	475.5	Wright 2009
HD 80606 b	3.9	0.447	111.428	0.934	300.6	2454424.86	472	Moutou 2009
HD 156846 b	11.0	1.12	359.51	0.847	52.2	2441998.09	464	Tamuz 2007
tau Boo b	4.1	0.0480	3.31246	0.02	188	2446957.8	461	Butler 2006
HIP 14810 b	3.9	0.0602	6.67386	0.1425	159.5	2453988	421.3	Wright 2009
HD 137510 b	22	1.87	805	0.36	31	2451760	420	Butler 2006
HD 16760 b	14	1.13	465	0.07	230	2454720	408	Sato 2009

Classement par vitesses radiales décroissantes

Catalogue des exoplanètes (extrait !)

(liste complète sur exoplanet.org)

Name	Msin(i) mjupiter ±	Semi-Major Axis au	Orbital Period days ±	Orbital Eccentricity ±	ω deg ±	Time of Periastron jd ±	Velocity Semi-amplitude m/s ± ▼	Orbit Reference
HD 69830 c	0.037	0.185	31.56	0.13	220	2453470	2.7	Lovis 2006
GJ 581 d	0.022	0.218	66.8	0.38	330	2454603	2.6	Mayor 2009
HD 40307 d	0.0286	0.132	20.46	0	0	2454532.4	2.6	Mayor 2009
HD 40307 c	0.0211	0.0801	9.62	0	0	2454551.5	2.5	Mayor 2009
HD 69830 d	0.056	0.627	197	0.07	220	2453360	2.2	Lovis 2006
61 Vir c	0.033	0.217	38.02	0.14	340	2453350	2.1	Vogt 2009
61 Vir b	0.016	0.0501	4.215	0.1	110	2453367.2	2.1	Vogt 2009
HD 40307 b	0.0129	0.0469	4.3115	0	0	2454562.77	2.0	Mayor 2009
HD 156668 b	0.0131	0.0500	4.646	0	90	2454718.6	1.9	Howard 2010
GJ 581 e	0.00611	0.0285	3.1494	0	0	2454716.8	1.9	Mayor 2009

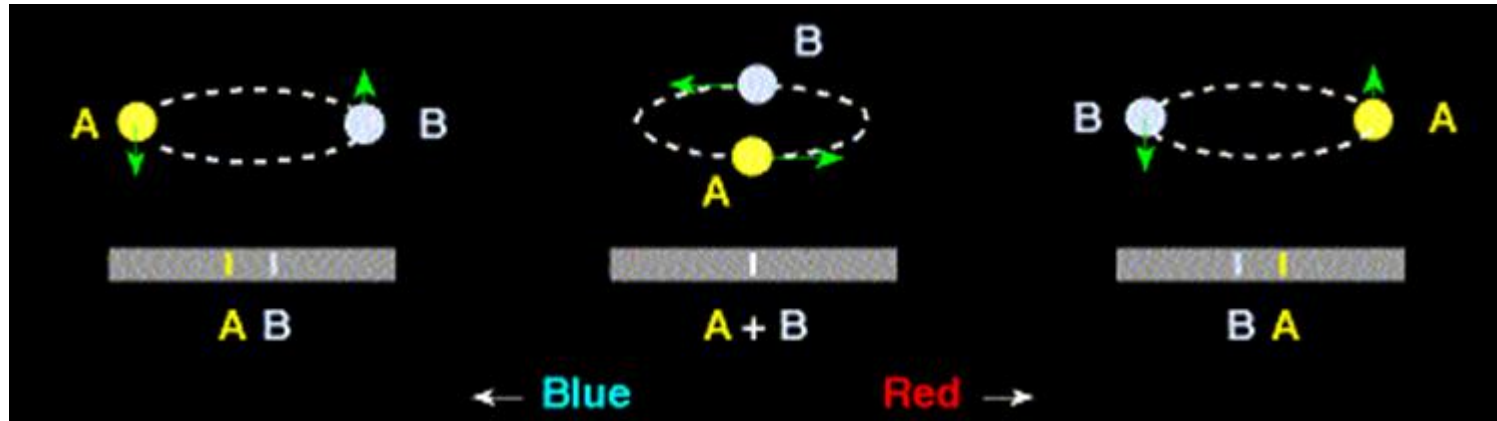
Les vitesses radiales les plus lentes (quelques mètres par secondes)

Name	Msin(i) mjupiter ±	Semi-Major Axis au	Orbital Period days ± ▲	Orbital Eccentricity ±	ω deg ±	Time of Periastron jd ±	Velocity Semi-amplitude m/s ±	Orbit Reference
WASP-19 b	1.13	0.0165	0.7888399	0	90	2454775.337	256	Hebb 2010
CoRoT-7 b	0.0156	0.0172	0.85359	0	90	2454446.731	3.5	Queloz 2009
WASP-18 b	10.2	0.0202	0.9414530	0.009	260	2454221.00	1818	Hellier 2009
WASP-12 b	1.4	0.0229	1.091423	0.05	286	2454508.484	226	Hebb 2009
OGLE-TR-56 b	1.35	0.0238	1.21	0	90	2452072.683	230	Torres 2008
TrES-3 b	1.92	0.0227	1.30619	0	90	2454185.91	378	O'Donovan 2007
HD 41004 B b	18	0.0177	1.3283	0.08	179	2452434.88	6110	Zucker 2004
WASP-4 b	1.25	0.0233	1.338228	0	90	2454365.915	240	Wilson 2008 ; Southworth 2009
OGLE-TR-113 b	1.26	0.0229	1.43	0	90	2452325.798	270	Torres 2008
CoRoT-1 b	1.03	0.0253	1.508956	0	90	2454159.453	190	Barge 2008

Les périodes orbitales les plus courtes

Détection des exoplanètes grâce à l'effet Doppler

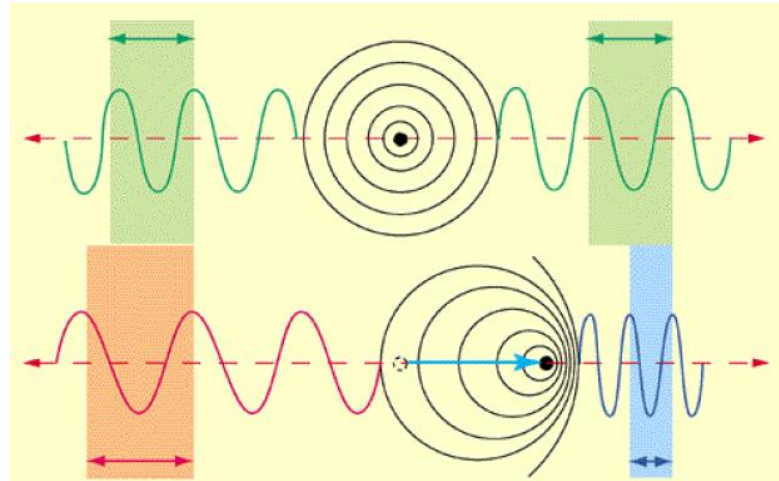
Deux astres tournant autour de leur centre de gravité commun :



*Si l'astre s'approche de l'observateur les raies spectrales sont déplacées vers le bleu
Si l'astre s'éloigne de l'observateur les raies spectrales sont déplacés vers le rouge*

La position apparente des raies dans le spectre d'un astre en mouvement par rapport à leurs positions pour un objet au repos donne la vitesse radiale de l'astre (technique de la vélocimétrie)

Variation de la longueur d'onde apparente le long de l'axe de visée



La formule Doppler :

Déplacement des raies en longueur d'onde

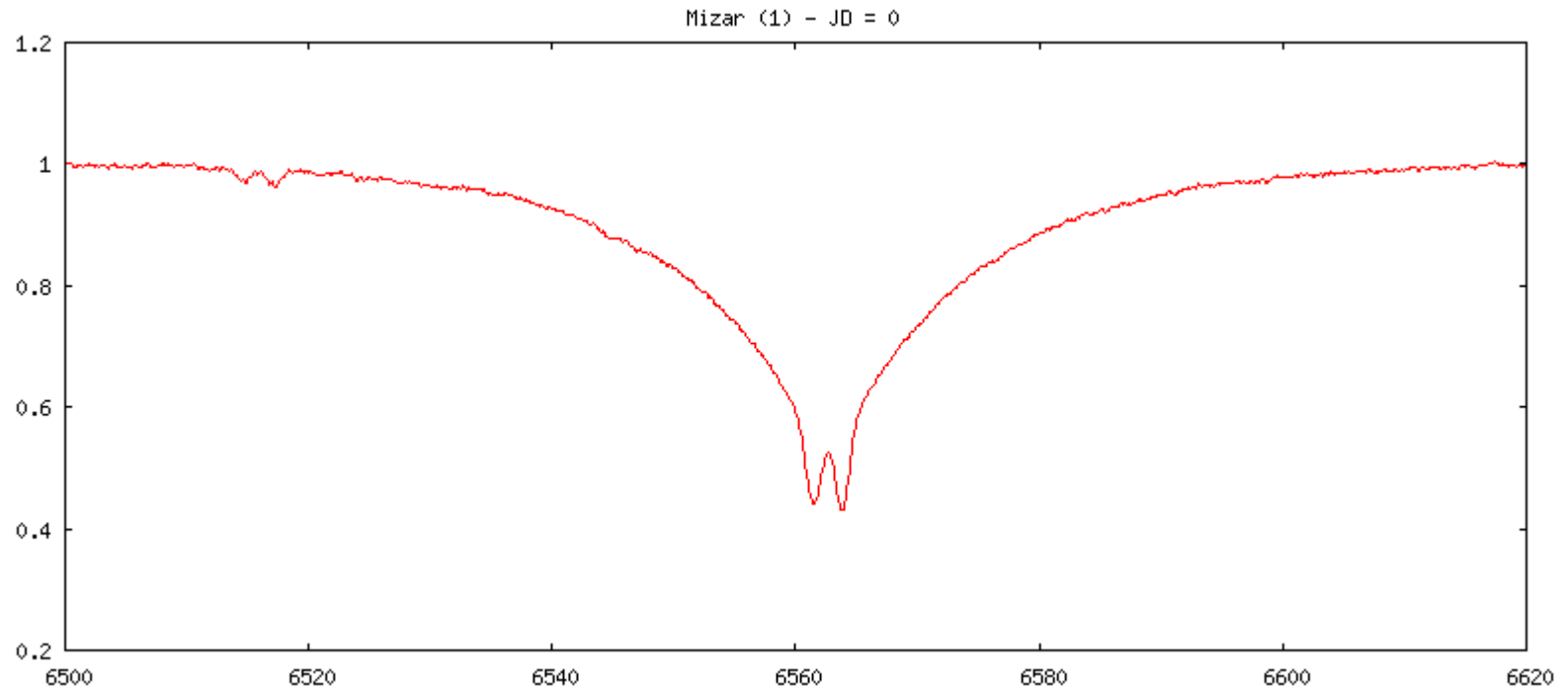
Vitesse radiale

$$\frac{(\Delta \lambda)}{\lambda} = \frac{v}{c}$$

Longueur d'onde théorique

Vitesse de la lumière

Exemple de l'étoile double spectroscopique MIZAR

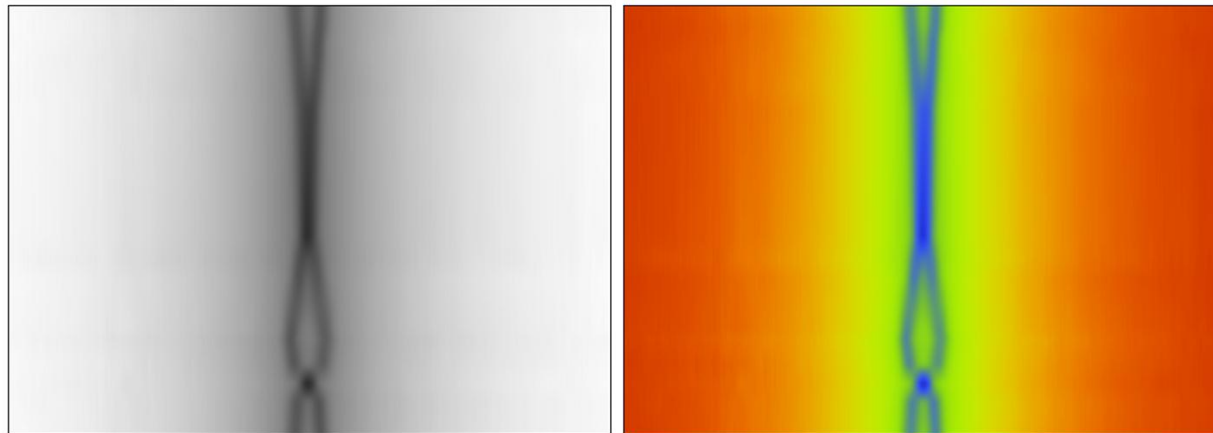
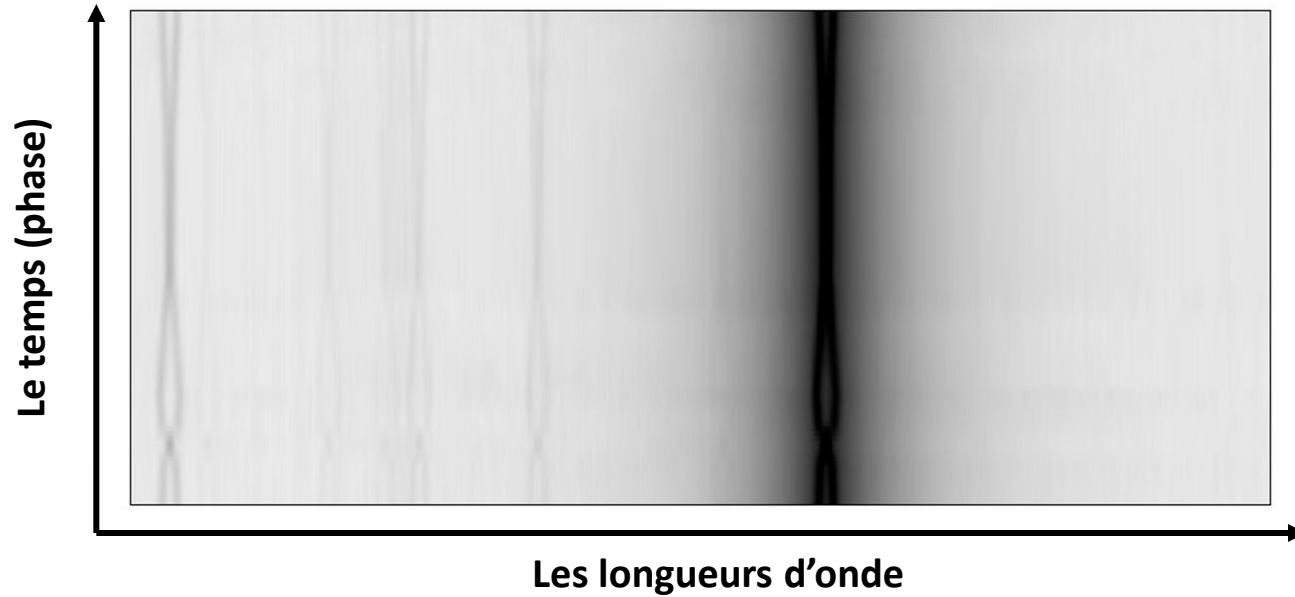


**Mouvement du système de raies de chaque membre du système double :
traduction du déplacement orbital en fonction du temps**

Spectrographe eShel + télescope C11 + caméra CCD QSI-532

Exemple de l'étoile double spectroscopique MIZAR

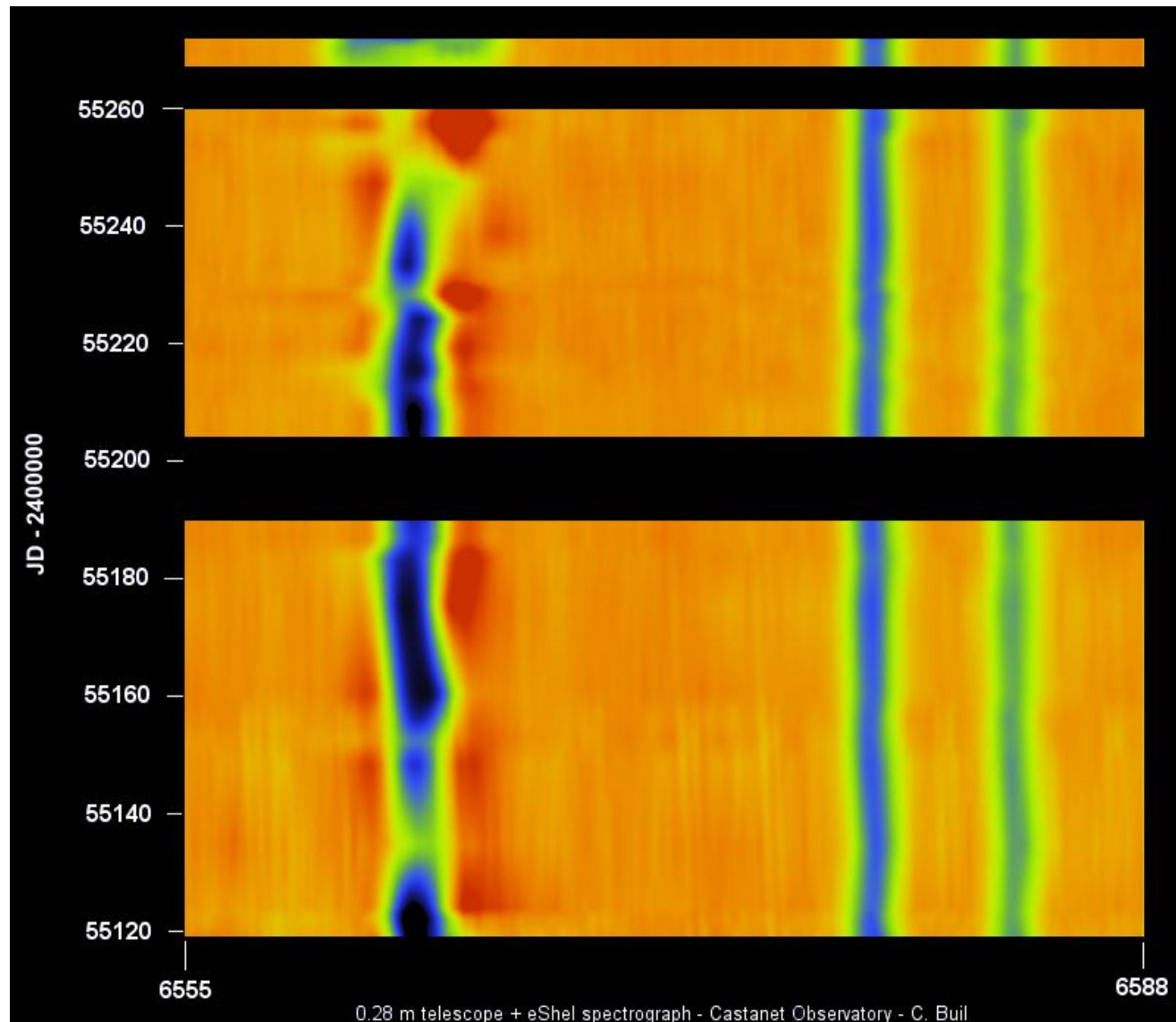
Représentation 2D des variation périodiques du spectre



Détail de la raie Ha

Observation réalisée avec un Celestron 11 et un spectrographe eShel (Castanet-Tolosan)

L'effet Doppler révèle un ciel en mouvement...



Spectre dynamique de l'étoile Rigel (β Ori) en fausses couleurs. Région de la raie $H\alpha$.

La vitesse apparente observée, V_a , est la vitesse réelle V projetée dans le plan du ciel

$$V_a = V \sin i$$

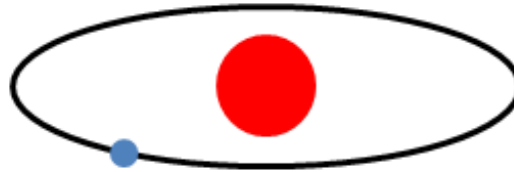
i = inclinaison de l'axe de l'orbite par rapport à la direction de visée



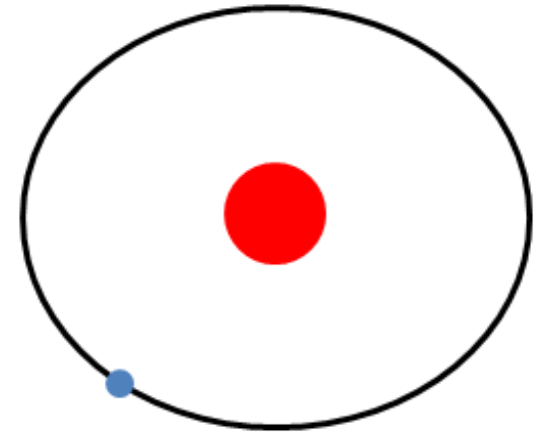
$i = 85^\circ$



Vitesse radiale maximale



$i = 60^\circ$



$i = 0^\circ$



Vitesse radiale nulle

Exemple numérique

Soit une vitesse radiale observée ($v \sin i$) de 0,461 km / secondes (= 461 mètres /seconde)

On analyse la raie $H\alpha$ à 6563 angströms.

Quel est le décalage spectral attendu de cette raie ?

La formule Doppler : $\Delta\lambda = \lambda \frac{v}{c}$

c = vitesse de la lumière (célérité) = 300 000 km/s

$$\text{Réponse : } \Delta\lambda = 6563 \times \frac{0,461}{300000} = 0,01 \text{ \AA}$$

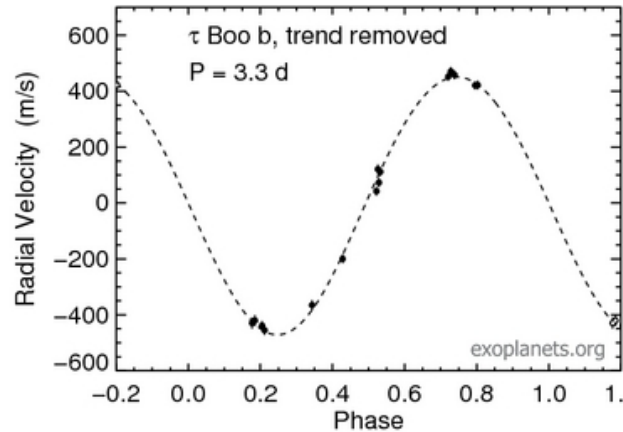
Soit 1/100 d'Angström

L'exemple du système tau Bootis (1/2)

Name	Msin(i) mjupiter ±	Semi-Major Axis au	Orbital Period days ±	Orbital Eccentricity ±	ω deg ±	Time of Periastron jd ±	Velocity Semi-amplitude m/s ±	Orbit Reference
HD 41004 B b	18	0.0177	1.3283	0.08	179	2452434.88	6110	Zucker 2004
CoRoT-3 b	21.8	0.0574	4.2568	0	90	2454283.138	2190	Deleuil 2008
WASP-18 b	10.2	0.0202	0.9414530	0.009	260	2454221.00	1818	Hellier 2009
HD 162020 b	15	0.0757	8.42820	0.277	28.4	2451990.677	1813	Udry 2002
XO-3 b	13.1	0.0477	3.1915	0.288	346	2454024.73	1490	Johns-Krull 2008 ; Winn 2009
WASP-14 b	7.3	0.0358	2.24375	0.091	253.4	2454462.33	993	Joshi 2009
HAT-P-2 b	8.9	0.0679	5.633473	0.517	185.2	2454388.077	980	Pal 2009
HD 114762 b	11.7	0.363	83.888	0.336	202	2449805.4	615	Butler 2006
HD 202206 b	17	0.812	255.87	0.435	161.2	2452175.3	565	Correia 2005
CoRoT-2 b	3.27	0.0281	1.742996	0	90	2454237.536	560	Alonso 2008
HD 43848 b	20	3.38	2400	0.7	229	2453230	500	Minniti 2009
HAT-P-16 b	4.2	0.0413	2.77596	0.036	214	2455025.75	531	Buchhave 2010
WASP-10 b	3.0	0.0370	3.09276	0.06	170	2454664.635	520	Johnson 2009
OGLE2-TR-L9 b	4.50	0.0413	2.4855335	0	90	2454492.798	500	Snellen 2009
HAT-P-13 c	15	1.19	429	0.69	176.7	2454890.0	500	Bakos 2009
HD 168443 b	7.8	0.295	58.1121	0.529	172.9	2454347.73	475.5	Wright 2009
HD 80606 b	3.9	0.447	111.428	0.934	300.6	2454424.86	472	Moutou 2009
HD 156846 b	11.0	1.12	359.51	0.847	52.2	2441998.09	464	Tamuz 2007
tau Boo b	4.1	0.0480	3.31246	0.02	188	2446957.8	461	Butler 2006
HIP 14810 b	3.9	0.0692	6.67386	0.1425	159.5	2453988	424.3	Wright 2009
HD 137510 b	22	1.87	805	0.36	31	2451760	420	Butler 2006
HD 16760 b	14	1.13	465	0.07	230	2454720	408	Sato 2009

L'exemple du système tau Bootis (2/2)

tau Boo b



[NSTED Velocities and Light Curves](#)

Discovery and References

First Publication Date	1996
Method of Discovery	RV
Orbit Reference	Butler 2006
First Reference	Butler 1997
Star Type Reference	Valenti 2005
Star Mass Reference	Takeda 2007
Parallax Reference	van Leeuwen 2009
EPE Link	tau Boo
NSTED Link	67275
SIMBAD Link	tau Boo

Orbital Parameters

Msin(i)	[mjupiter]	4.1 ± 0.305
Semi-Major Axis	[au]	0.0480
Orbital Period	[days]	3.31246 ± 0.000014
Velocity Semi-amplitude	[m/s]	461 ± 7.6
Orbital Eccentricity		0.02 ± 0.015
Argument of Periastron	[deg]	188
Time of Periastron	[jd]	2446957.8 ± 0.577
Velocity Slope	[m/s/days]	-0.051 ± 0.00301

Orbital Fit Properties

Reduced Chi Squared	2.89
# of Observations	98
RMS of Velocities	62
Flag for linear Trend	1

Stellar Properties

Star Name	tau Boo
Spectral Type	F7V
Binary Flag	1
Mass of Star	[msun] $1.34 \pm 0.054 / -0.039$
[Fe/H]	0.23 ± 0.03
T_{eff}	[K] 6390 ± 44
$\log_{10}(g)$	4.26 ± 0.06
Vsin(i)	[km/s] 15.0 ± 0.5
Components	1

Stellar Magnitudes

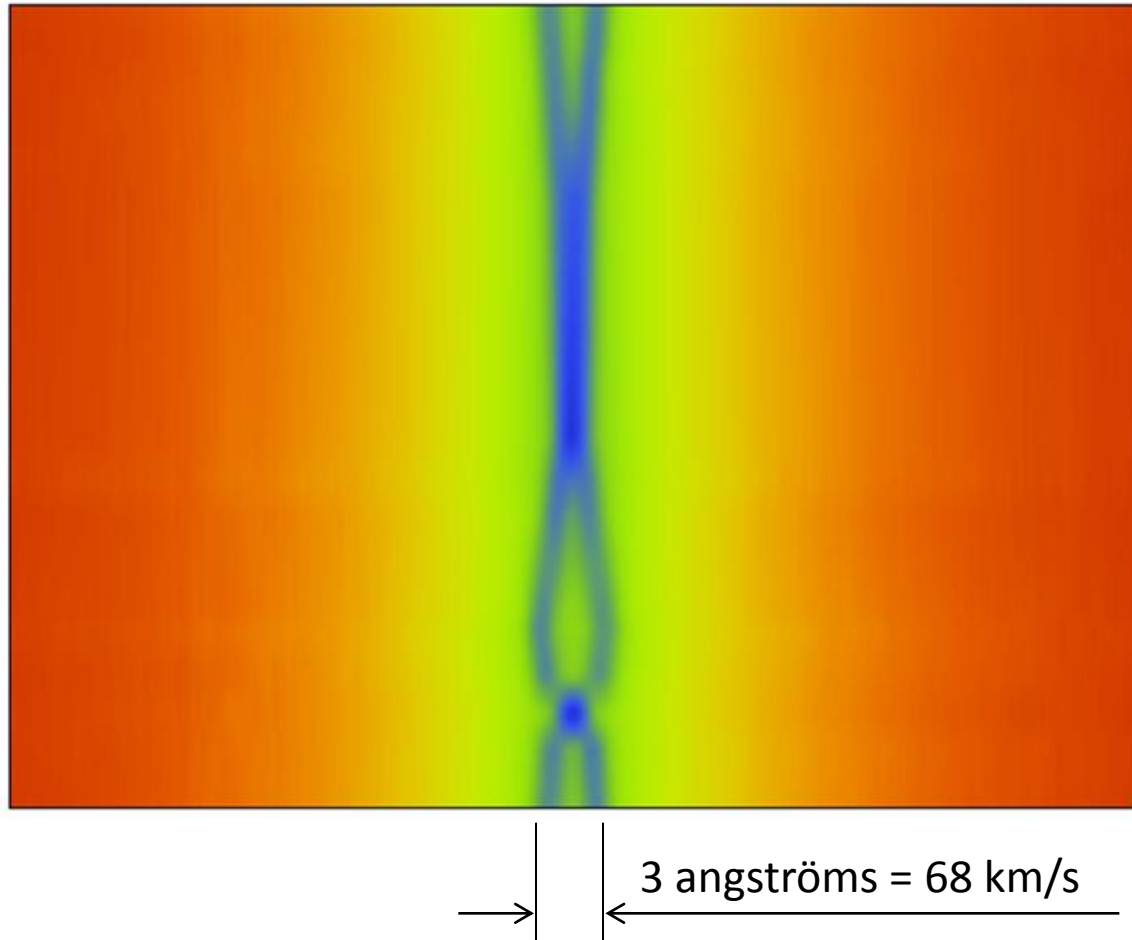
V mag	4.5
B-V	0.508
2MASS J	3.616
2MASS H	3.545
2MASS K _S	3.507
S _{HK}	0.202
$\log R_{\text{HK}}$	-4.73

Coordinates and Catalogs

RA (h:m:s)	13:47:16.037
DEC (d:m:s)	+17:27:24.39
Parallax	[marsec] 64.0 ± 0.19

La détection de la planète tau Boo b demande de mesurer la position des raies à mieux que 0,01 Å près. Mais pour confirmer la détection il faut faire 5 fois mieux, soit $0,01 / 5 = 0,002$ angström !

Retour sur le spectre de MIZAR...



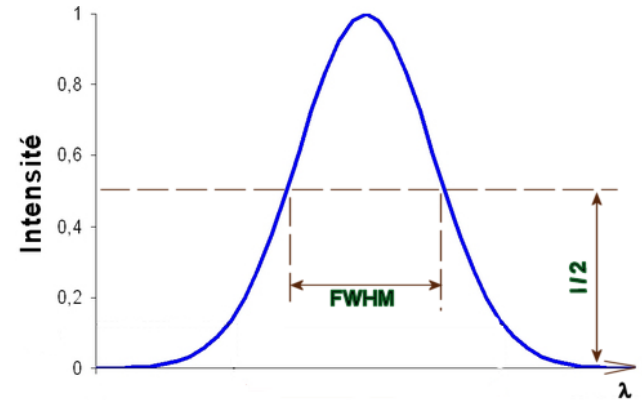
La « signature » spectrale de tau Boo b est 150 fois plus faible !

Un spectrographe type LHIRES III est-il utilisable ?



Pouvoir de résolution caractéristique
 $R = 15000$

$$R = \frac{\lambda}{\delta\lambda} = \frac{\lambda}{FWHM}$$



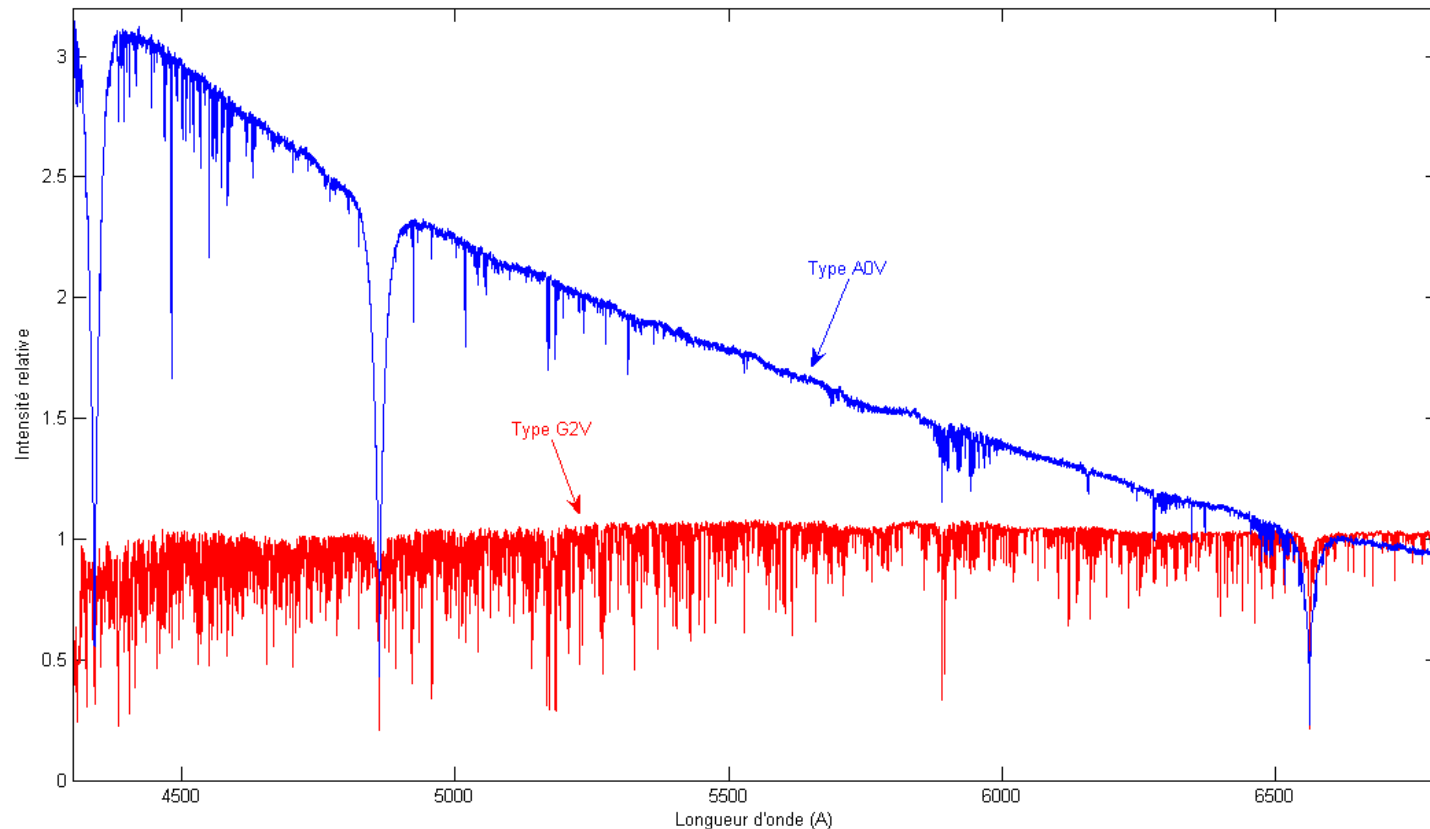
A la longueur d'onde $\lambda = 6563 \text{ \AA}$, $FWHM = 0,44 \text{ angström}$

Précision de mesure absolue du centroïde d'une raie bien contrastée : $FWHM / 20 = 0,02 \text{ \AA}$

Il manque un ordre de grandeur pour réaliser la mesure (un facteur 10 à gagner en précision) !

Solution :

- (1) Observer un grand nombre de raies stellaires simultanément
- (2) Calculer le décalage Doppler de l'ensemble des raies (« moyenne »)

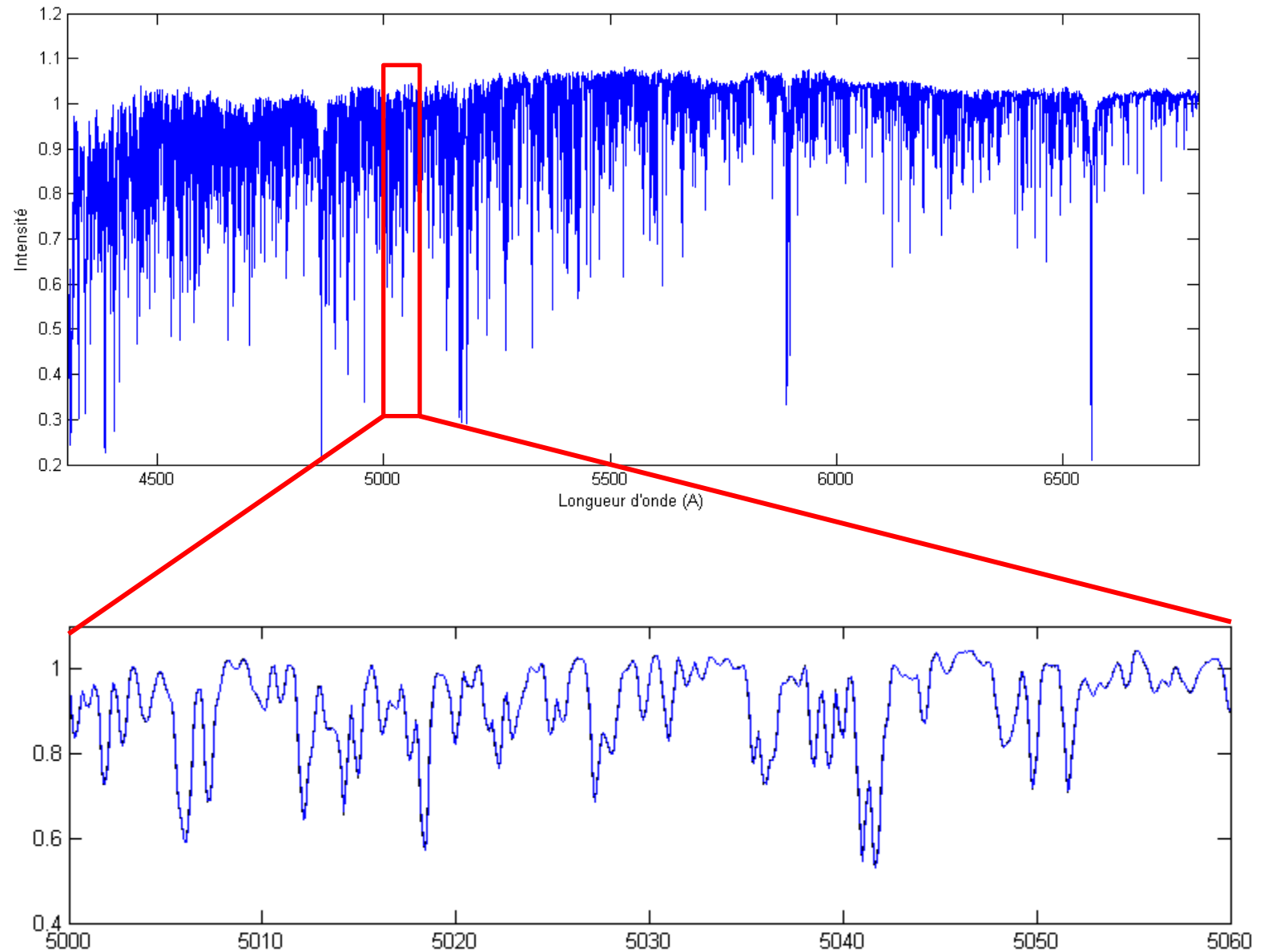


Ceci implique :

- (1) De sélectionner des étoiles dont le spectre est riche en raies (types F, G, K)
- (2) D'observer un large domaine spectral (notamment dans le bleu car raies plus nombreuses)
- (3) De réaliser un étalonnage spectral de haute qualité sur l'ensemble du spectre

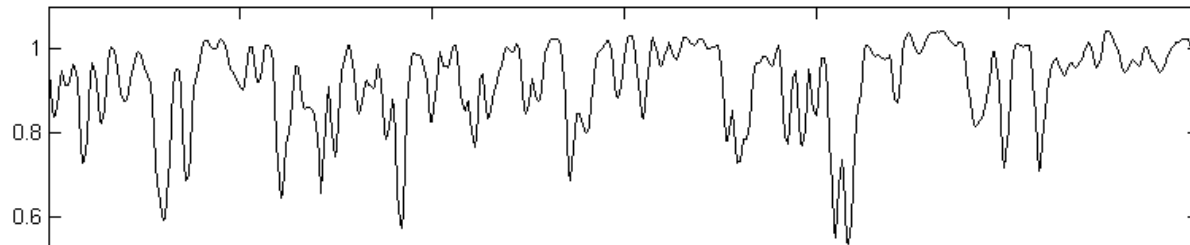
Des centaines de raies disponibles sur une étoile de type solaire

(exemple de spectre observé avec le spectrographe eShel à $R = 10000$)

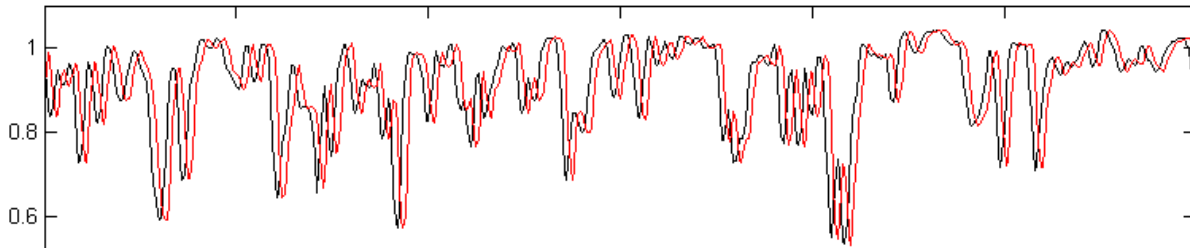


LA CLEF DE LA PRECISION : LA CROSS-CORRELATION

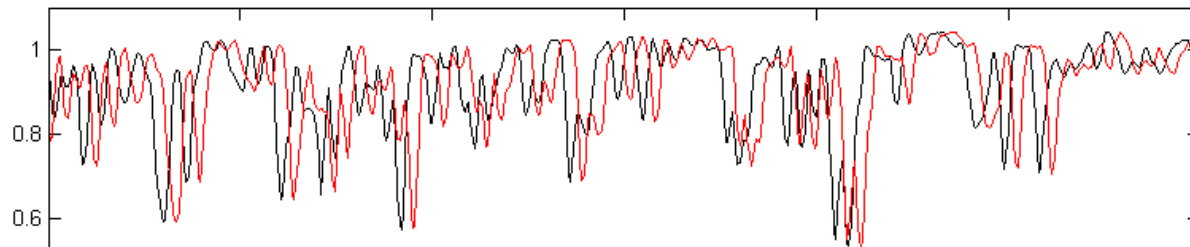
Corrélation croisée (cross-correlation) entre le spectre observé (en noir) et un spectre de référence (en rouge)



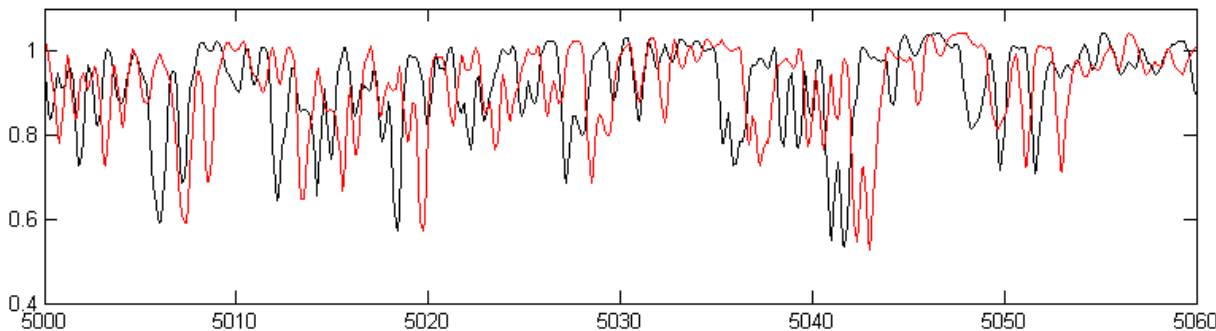
Corrélation : 100%



Corrélation : 90%

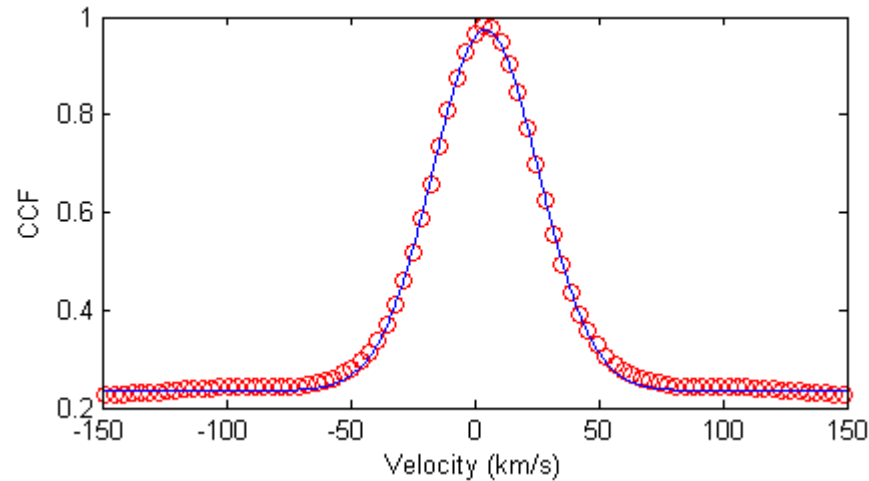


Corrélation : 60%



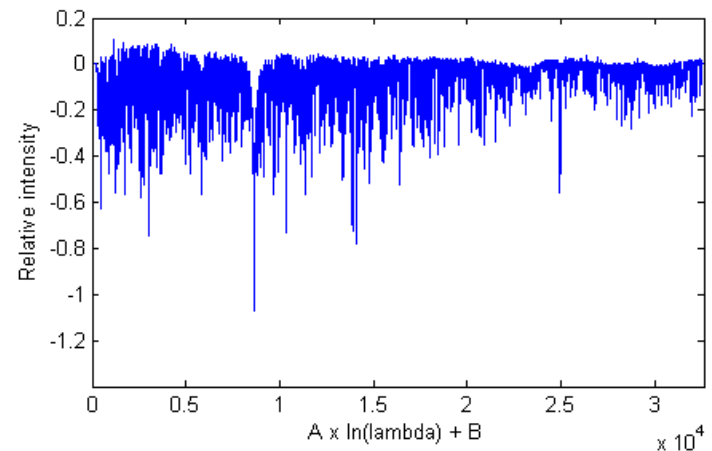
Corrélation : 30%

Tracé de la fonction de corrélation croisée Cross Correlated Function = CCF

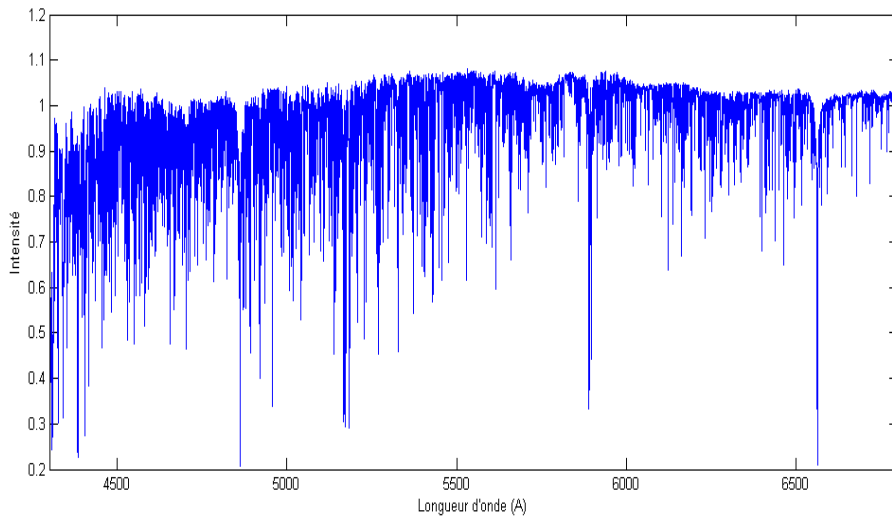


Attention, le calcul doit être effectué sur une base en vitesse, pas en longueur d'onde.

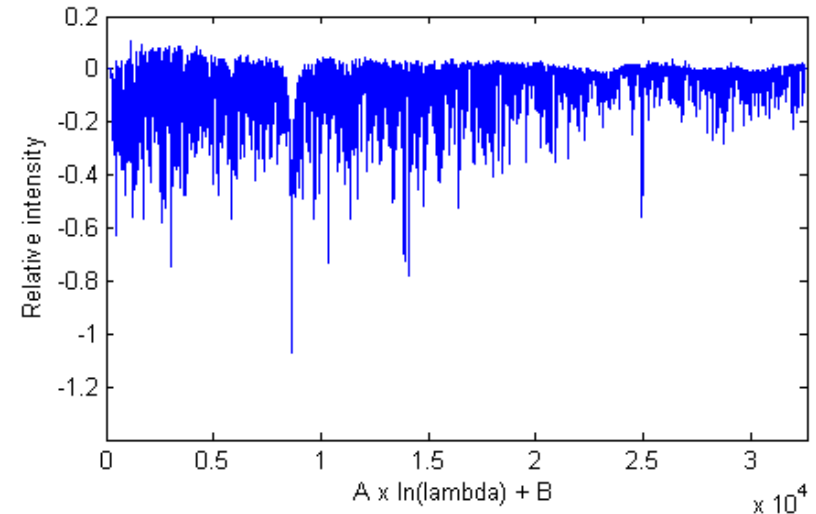
En effet, le décalage Doppler en longueur d'onde n'est pas constant (étirement) – il l'est sur une échelle de vitesse.



La linéarisation en vitesse d'un spectre



Echelle en longueur d'onde
Décalage en vitesse non linéaire



Echelle en vitesse (log naturel)
Décalage en vitesse linéaire

$$n = A \times \ln(\lambda) + B = \text{rang du bin dans le spectre linéarisé}$$

Si N est le nombre de bin total choisi et si $[\lambda_1, \lambda_2]$ est l'intervalle spectral analysé, alors

$$A = N / \ln(\lambda_2/\lambda_1) \text{ et } B = -N \ln(\lambda_1) / \ln(\lambda_2/\lambda_1)$$

Intervalle en vitesse correspondant à un intervalle de 1 bin = $\Delta V = c \ln(\lambda_2/\lambda_1) / N$

avec c = célérité de la lumière = 299792.458 km/s

Exemple : $\lambda_1 = 4400 \text{ Å}$, $\lambda_2 = 6445 \text{ Å}$, $N = 32767 \rightarrow A = 85845$, $B = -720194$ et $\Delta V = 3,49 \text{ km/s}$

Méthode pratique utilisée pour la présente étude

Corrélation croisée du spectre de référence et du spectre observé :
le calcul de la CCF (Cross-Correlation Function) est fait dans le domaine spatial
(autre possibilité : domaine de Fourier)
et dans l'espace des vitesses

Le spectre de référence est ici un vrai spectre stellaire observé à haut rapport signal sur bruit et de type spectral voisin de celui de l'étoile étudiée (masque de corrélation « naturel »)

La (ou les) étoile(s) de références sont choisie(s) pour être stable(s) en vitesse radiale.

On exclue du produit de corrélation les zones d'absorption de l'atmosphère (bandes telluriques H₂O, O₂) et les raies de l'hydrogène (trop larges spectralement).

Protocole d'observation :

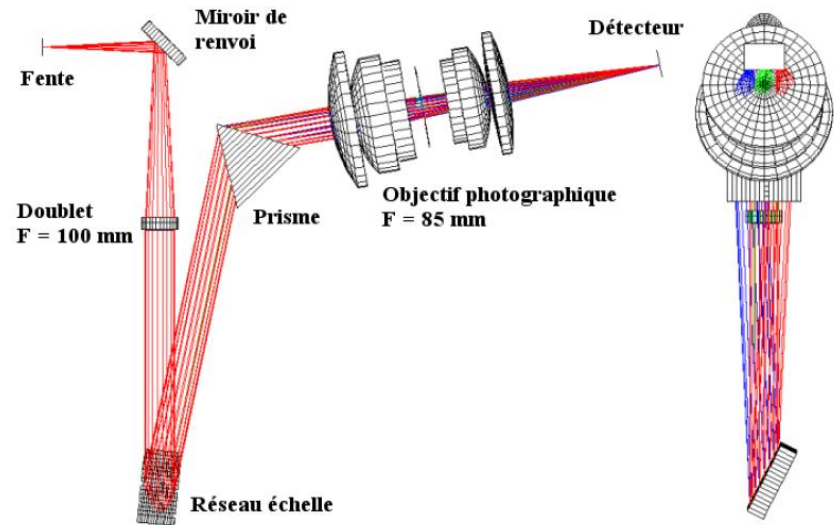
Un cycle de mesure : Thorium – Etoile référence - Thorium – étoile cible - Thorium – Etoile référence – Thorium
1 point de mesure vitesse radiale = moyenne de 3 cycles indépendants

Codage de la méthode Lomb-Scargle (périodogramme) pour
trouver la période l'exoplanète

(voir A. Cumming, G. Marcy, P. Butler, AJ, 526, 890, 1999
et M. Zechmeister, M. Kürster, A&A, 496, 577, 2009)

Comment acquérir un spectre bien résolu sur un large domaine spectral ?

En exploitant un spectrographe échelle !

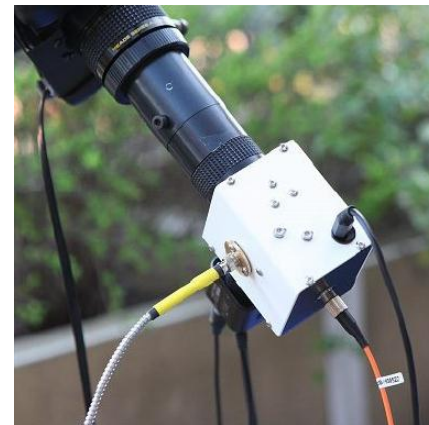


Comment bien étalonner spectralement ?

En exploitant la technologie des fibres optiques !

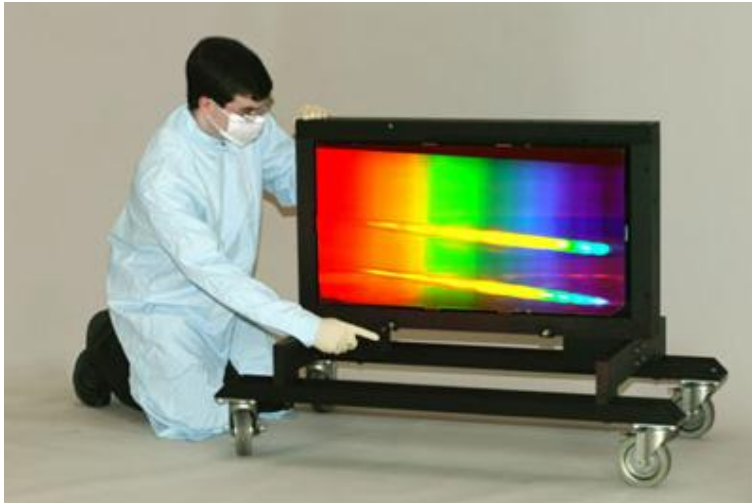


(on évite les biais induits par les flexions d'un spectrographes monté sur le télescope et le spectrographe peu être lourd et isolé thermiquement)

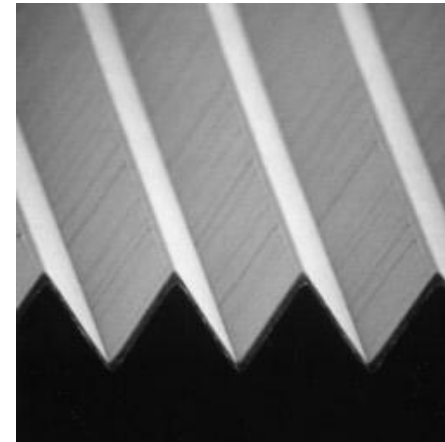


Interface
télescope du
spectrographe
eShel

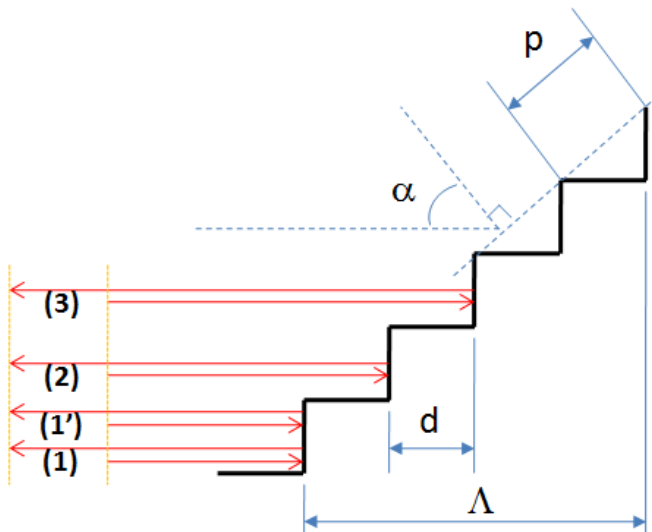
Réseau échelle = profil de gravure rectangulaire utilisé sous une forte incidence
(configuration « anti-blaze »)



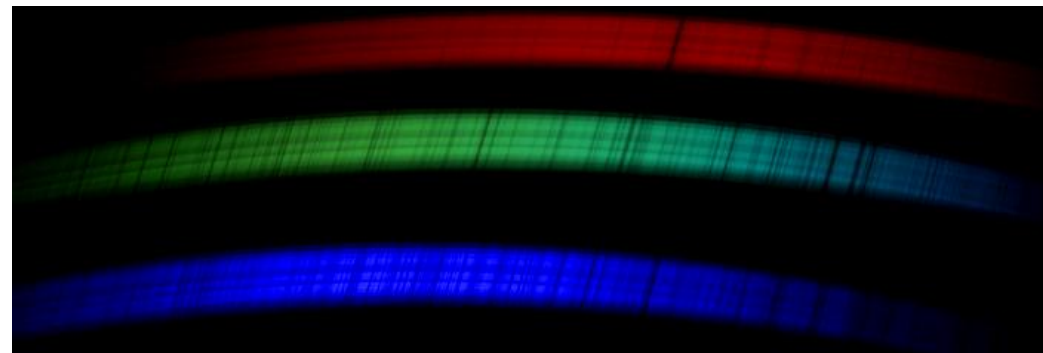
Structure diffractive



Profil de gravure



Interférences en onde multiples



Multiplexage spectral

Exemple de spectrographe échelle : eShel - R = 11000

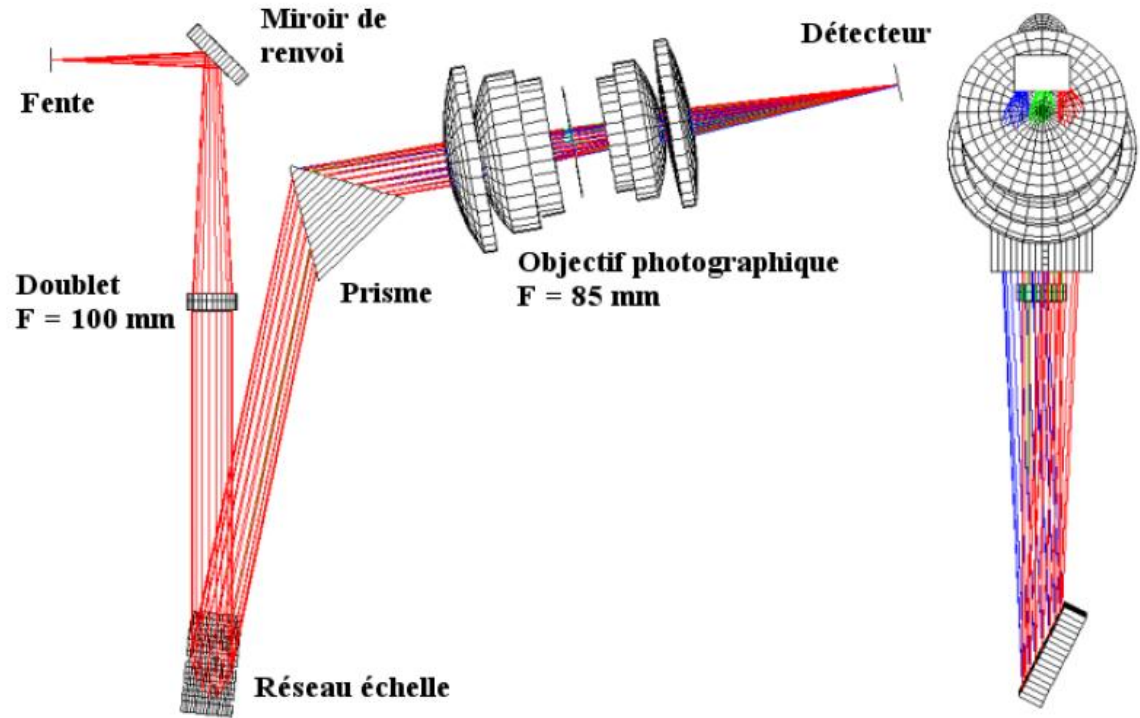
(modèle commercial – Shelyak Instrument)

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

R = pouvoir de résolution

λ = longueur d'onde de travail

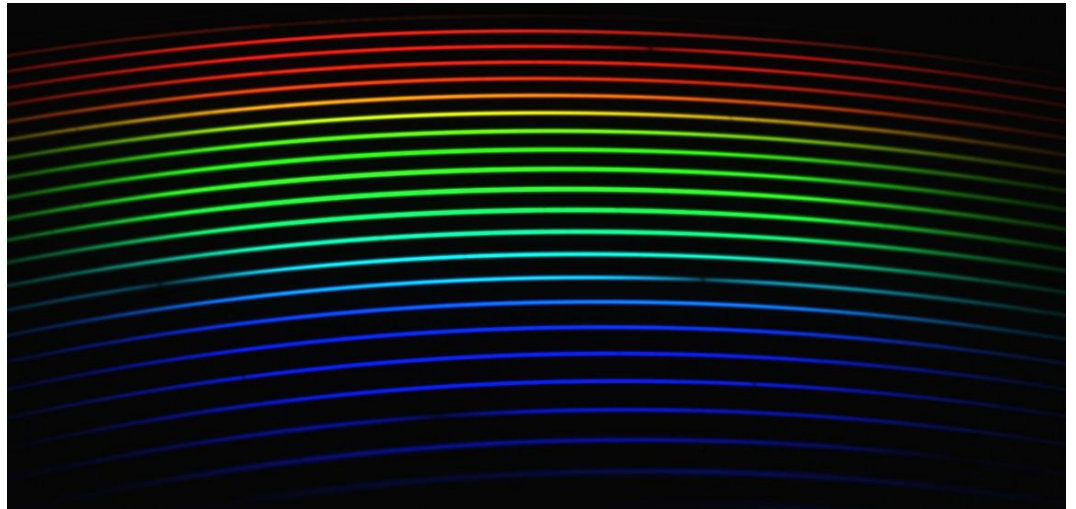
$\delta\lambda$ = finesse spectrale



Exemple de spectre échelle

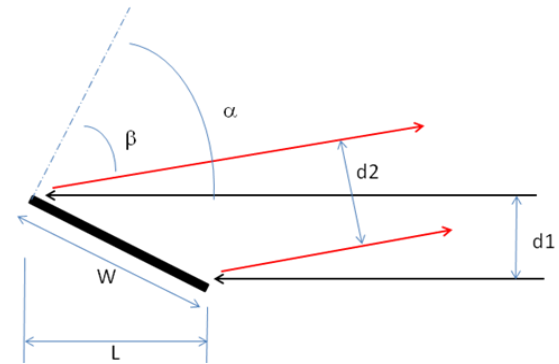
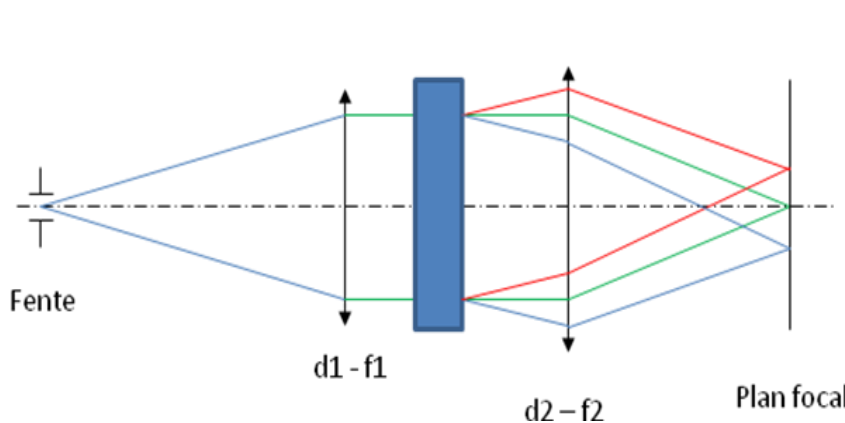
Une succession d'ordres d'interférence

Ce spectre 2D se lit comme les lignes de texte dans un livre !



Le pouvoir de résolution spectrale (R)

proportionnel au produit de la densité de gravure et de l'ordre de diffraction



$$\frac{\lambda}{d\lambda} = R = \frac{d1}{\phi D} \left(\tan \alpha + \frac{\sin \beta}{\cos \alpha} \right)$$

Avec ϕ = largeur angulaire de la fente dans l'espace objet (en radians)
D = le diamètre du télescope d'entrée

Si k est l'ordre de diffraction et d1 le diamètre de la pupille interne:

Mode Littrow :

$$R = \frac{2 d1 \tan \alpha}{\phi D}$$

Autre forme générale :

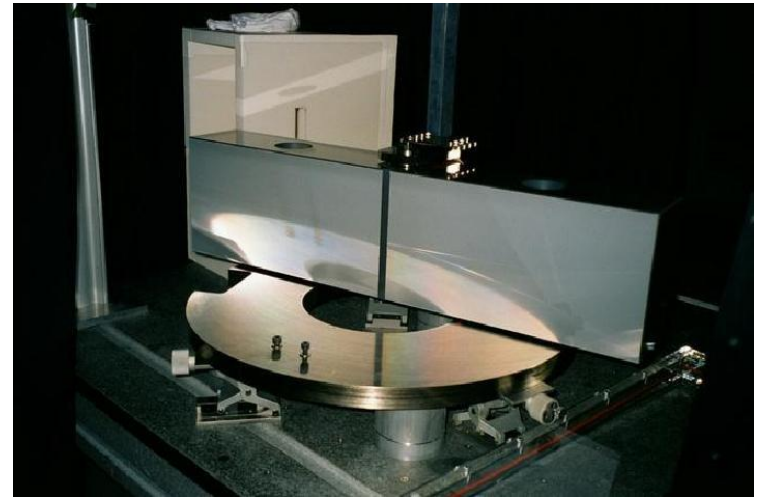
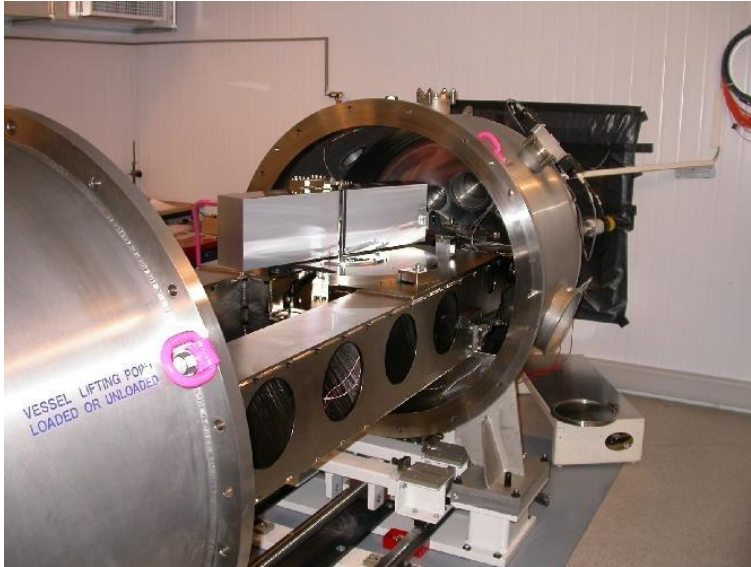
$$R = \frac{k m d1}{\phi D \cos \alpha}$$

Réseau échelle type :
 $\alpha = 63^\circ$ à 72° et k compris entre 20 et 80)

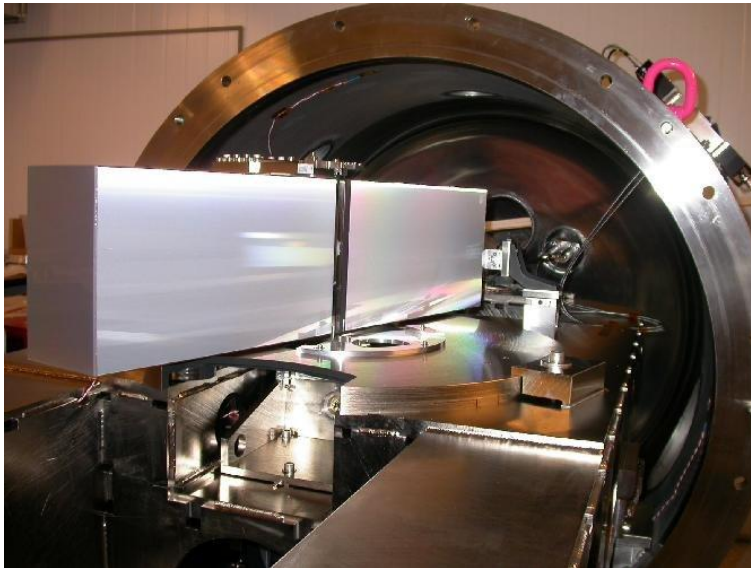
Note : le pouvoir de résolution est aussi inversement proportionnel au diamètre de la pupille d'entrée (D)

Le spectromètre HARPS

(télescope de 3,6 m La Silla – ESO)



Le plus grand réseau échelle jamais
fabriqué :
2 X 420 mm x 214 mm
(Richardson USA)



Pouvoir de résolution $R = 110\,000$

SNR = 45 pour une étoile de magnitude 8 par pixel en une
minute de pose ($\Delta\lambda = 0.0147 \text{ \AA}$ à $\lambda = 5000 \text{ \AA}$)

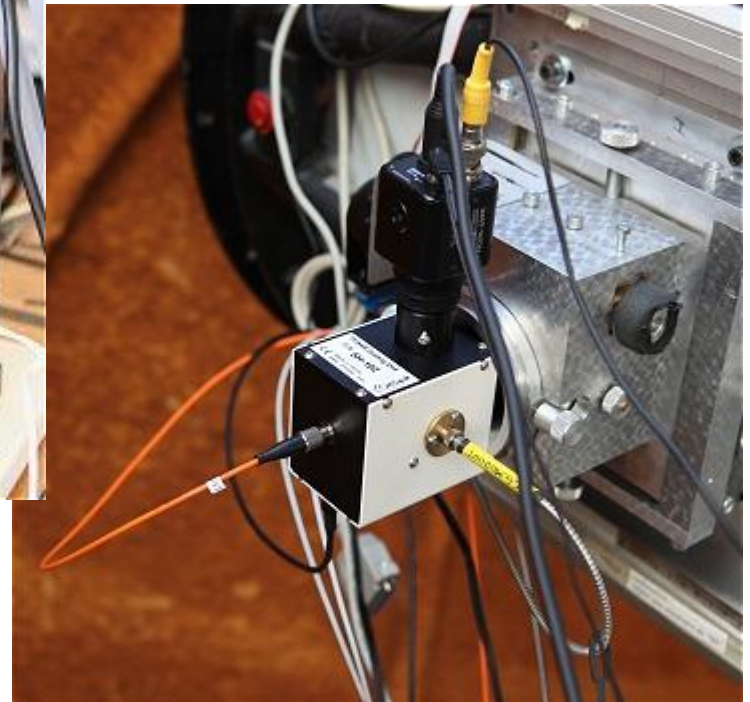
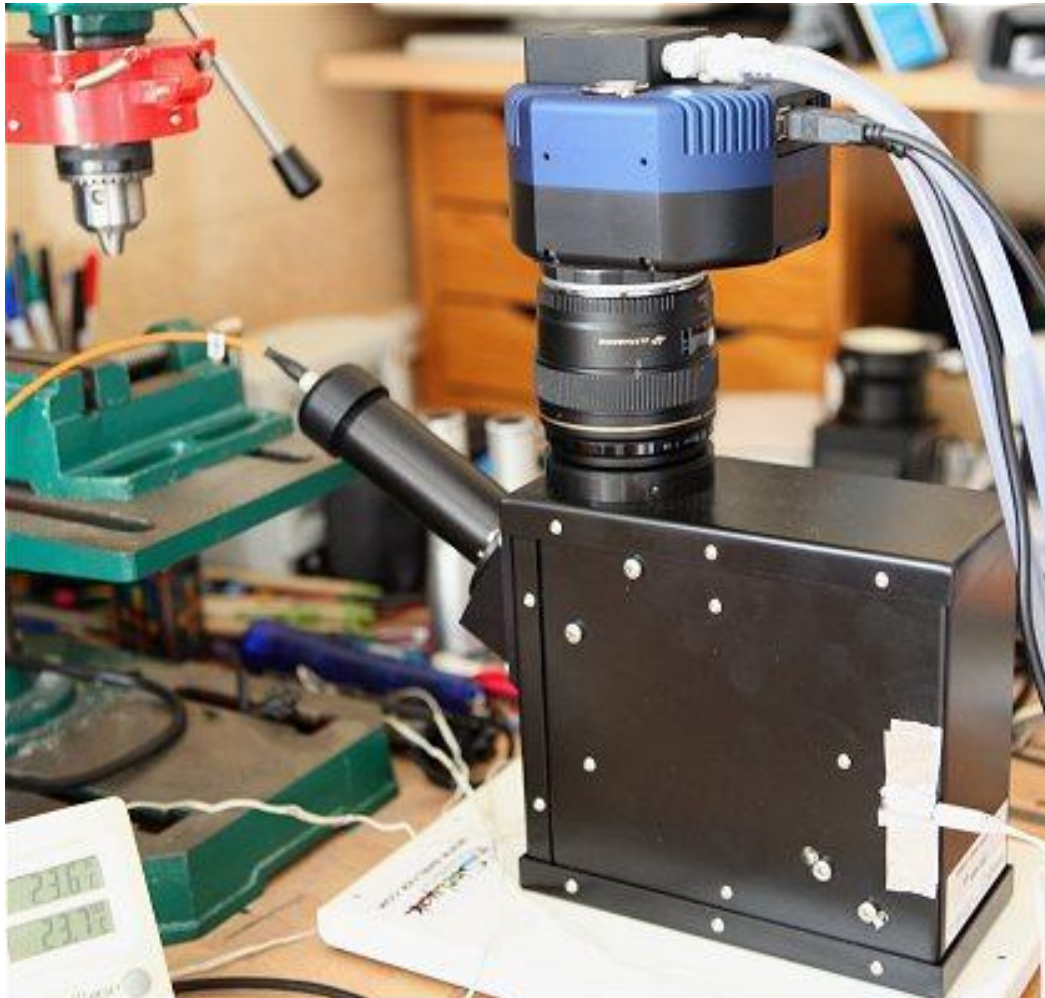
Précision en routine de l'ordre de 1 m/s

Précision court terme de qq centimètres /s

Noter le fort angle d'incidence sur la surface du réseau

Le spectrographe eShel

(société Shelyak Instrument)



Utilisation du spectrographe eShel (1/3)



Pas de flexions mécaniques
Environnement thermique relativement stable

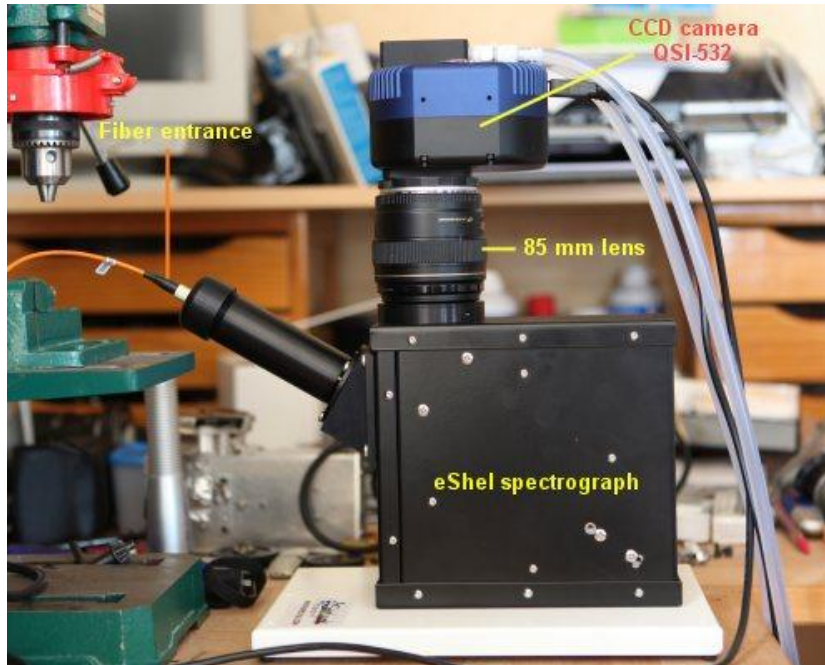
Caméra CCD QSI-532
(CCD Kodak KAF3200)
Refroidissement aidé par circulation liquide

Repères :

- Une variation de 1 degré Celsius = décalage spectral de 300 m/s
- Une variation de 1 mBar = décalage spectral de 90 m/s

Rappel : la demi amplitude induite par de tau Boo b est de +/- 460 m/s seulement !

Utilisation du spectrographe eShel (2/3)



*Spectrographe détaché du télescope
(environnement thermique contrôlé, pas
de flexions mécaniques)*

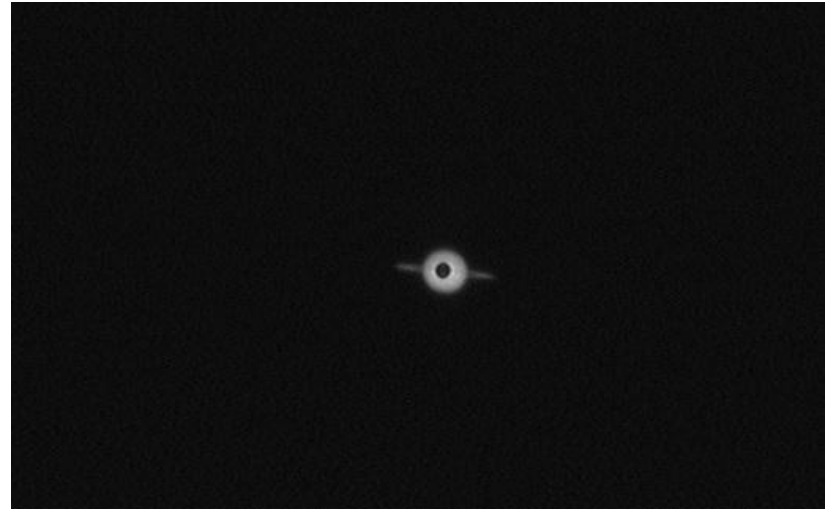


*Fibre optique
Très faible masse sur le télescope (et mise en route rapide)*

Utilisation du spectrographe eShel (3/3)



Bonnette : trou d'entrée du spectrographe de 50 microns



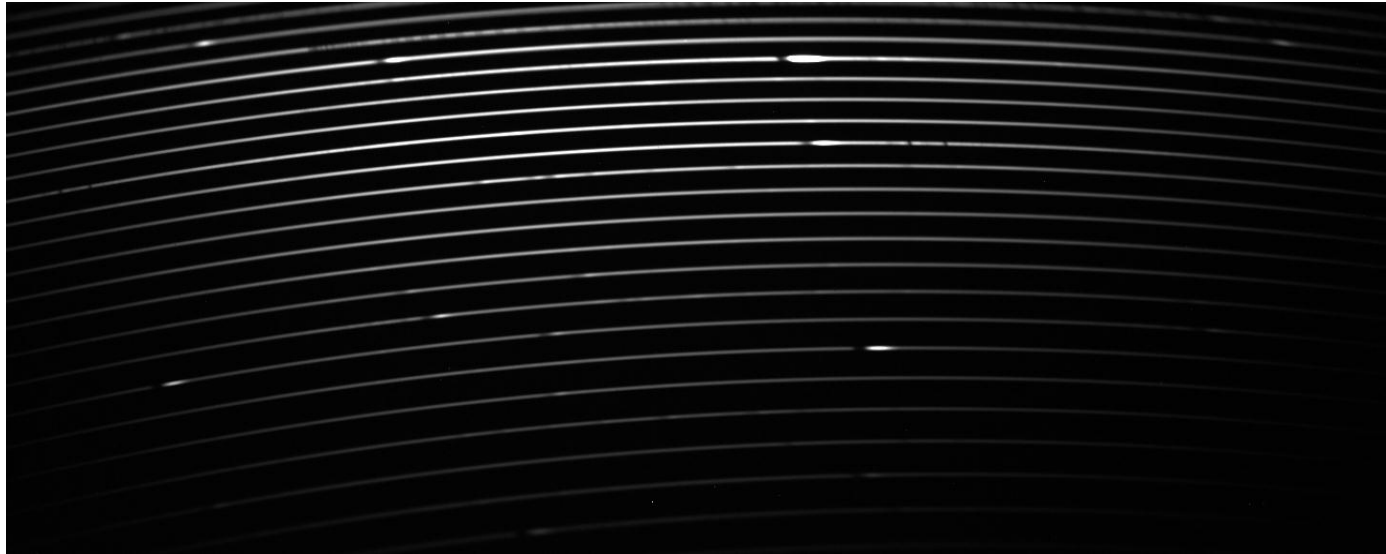
Centrage très précis des objets observés



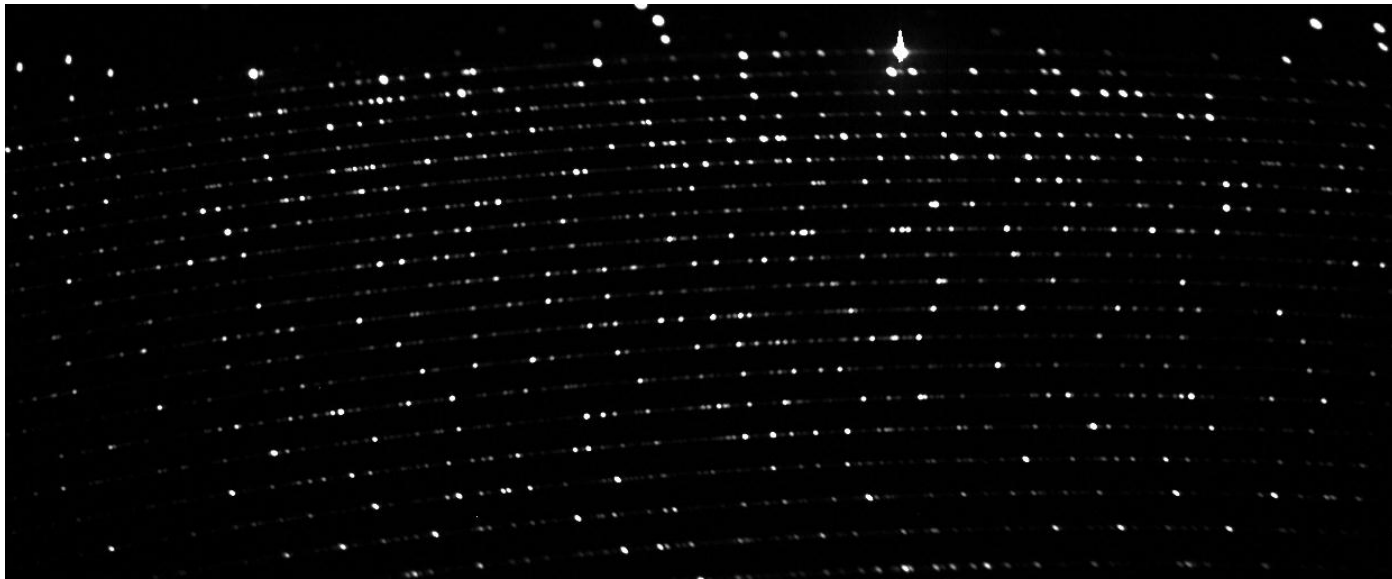
Refroidissement efficace (circuit d'eau sur caméra QSI)

Forte automatisation (étalonnage spectral, lampe ThAr)

Criticité de l'étalonnage spectral (usage d'une lampe ThAr)



Spectre de l'étoile P Cyg (télescope C11)



Spectre d'une lampe d'étalonnage Thorium-Argon

Le télescope

(C11 - D = 0.28 m)



$$\delta V = A \frac{\sqrt{FWHM}}{S/B}$$

A = constante fonction de l'instrument



La précision de mesure en vitesse est inversement proportionnelle au rapport signal sur bruit (S/B)
Privilégier les gros télescopes (comme souvent ;-) !

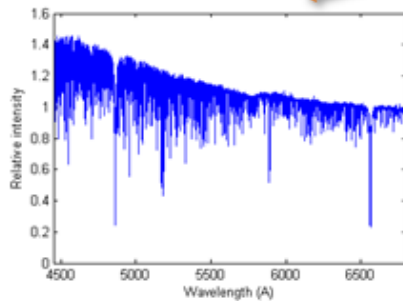
Acquisition et traitement



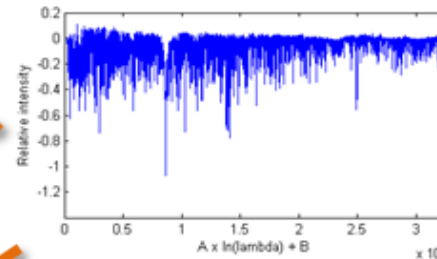
Calibration exposure: 30 sec.

Star exposure: 300 sec.

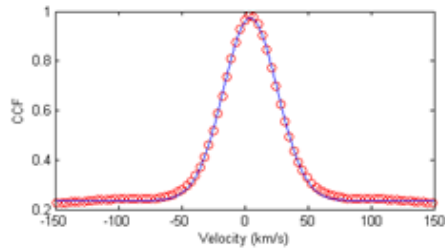
Calibration exposure: 30 sec.



Calibrated spectrum

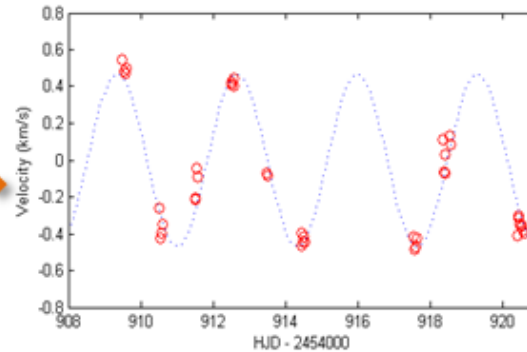


Constant velocity projection

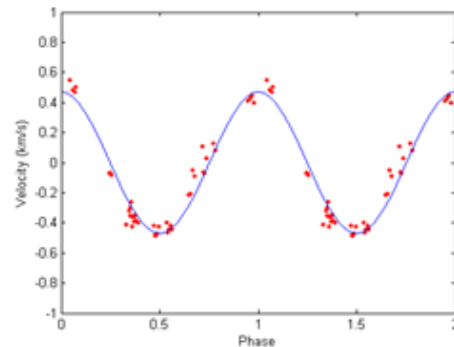


Cross-correlation function [CCF]

(a common Tau Boo reference spectrum is used)



Doppler velocity for Tau Boo. Each points correspond to a 15 minutes observation time of the star. The dotted plot is the Doppler ephemeris from Butler & all, ApJ 474, L115 (1997)



The phase plot of Tau Bootis system. The solid line is from the velocity orbit of Butler & all.

Ecriture d'un programme informatique de traitement automatisé et précis (périodogramme Lomb-Scargle, corrections héliocentrique, CCF, ...)

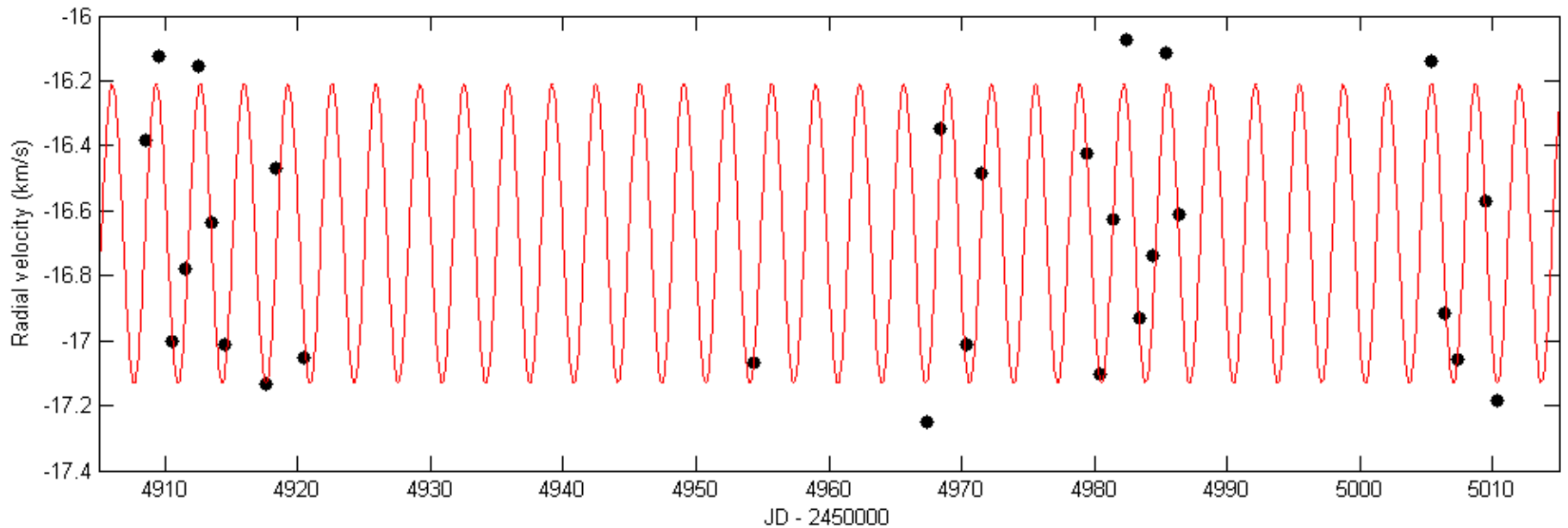
Repères :

- Vitesse de la Terre autour du Soleil = 29,8 km/s en moyenne, à corriger.
- Rotation de la Terre sur elle-même = 464 m/s, à corriger.
- Mesure du temps (variation de la vitesse de la Terre 1 m/s par minutes de temps).
- Un point de mesure représente 2 heures d'observations (alternances étoile / ThAr)

Détection de tau Boo b



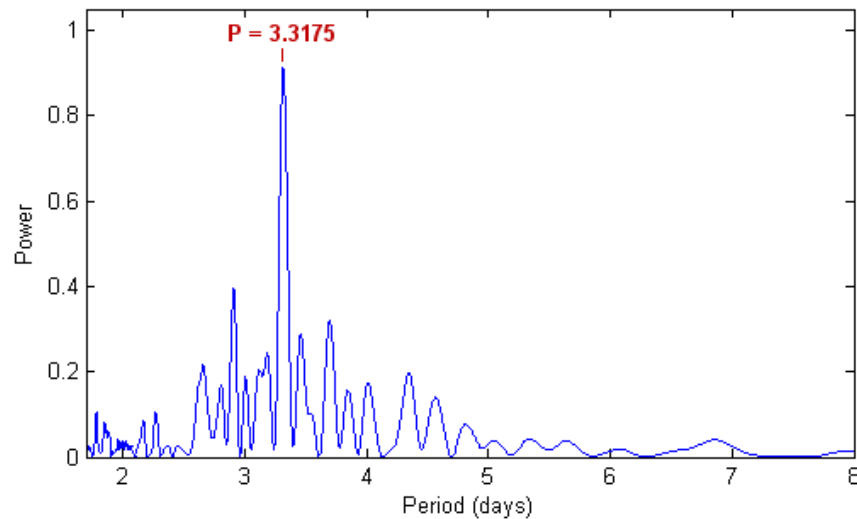
Localisation de tau Boo dans le ciel



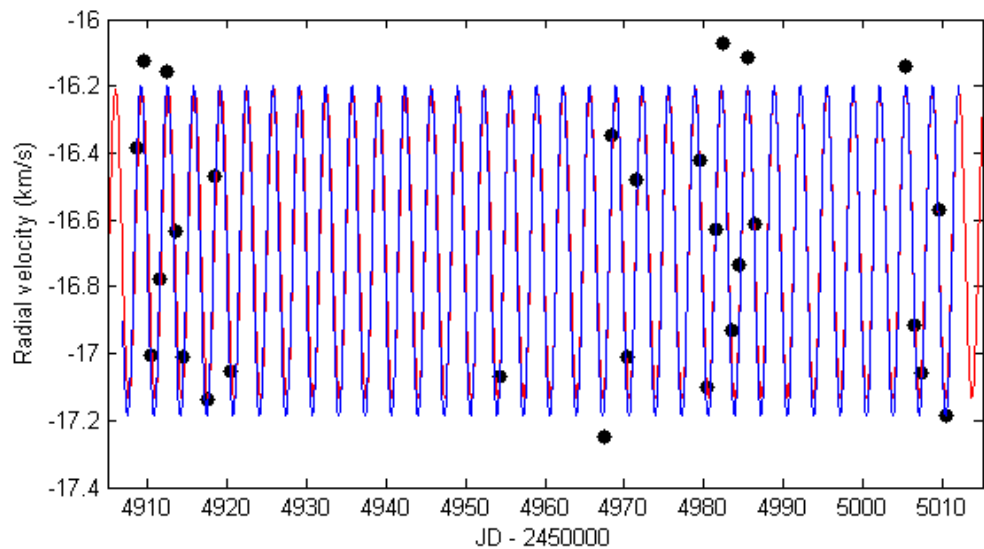
Vitesse radiale mesurée en fonction du temps (points noirs)
(en rouge, l'éphéméride théorique, période de 3,312 jours)

Repère : le déplacement des raies à détecter vaut typiquement 1/100 de la taille des pixels !

Evaluation des paramètres observationnels de la planète

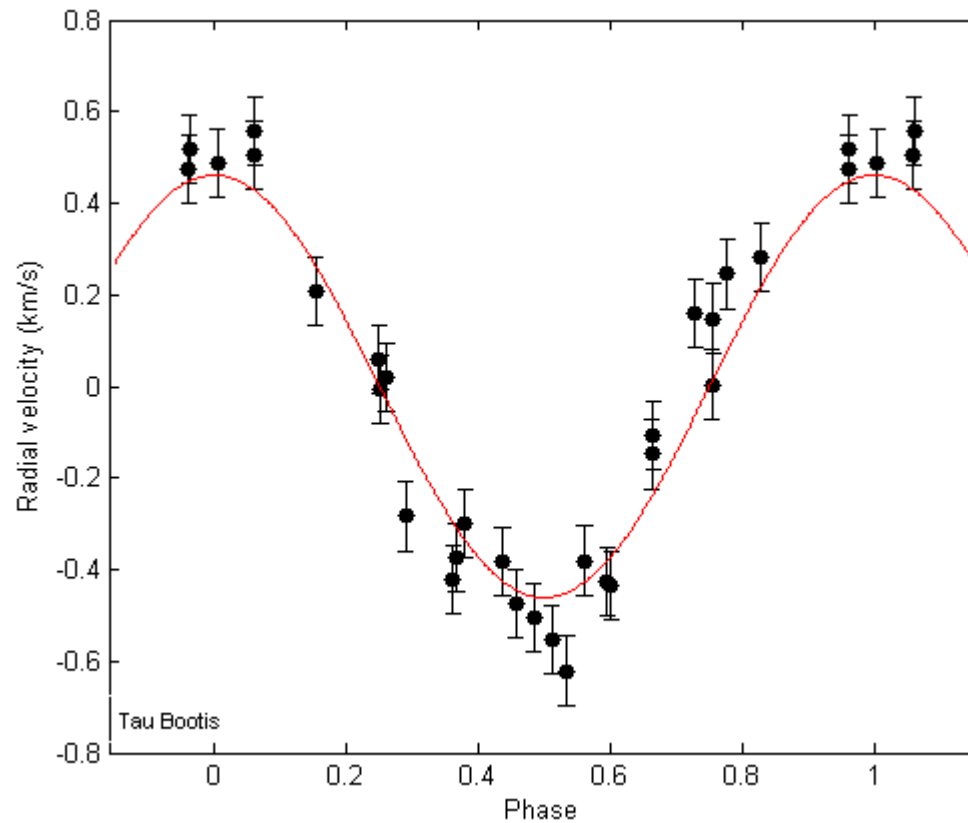


Périodogramme. Période orbitale trouvée : 3.317 jours. Valeurs officielle : 3,312 jours. Ecart de 0,1% seulement !



Superposition de l'éphéméride calculée et de l'éphéméride officiel.

Le résultat final



Courbe de phase du système tau Boo
(la barre d'erreur représente 75 m/s)

Paramètres physiques déduits de l'observation de l'exoplanète tau Boo b

Masse projetée (relativement à Jupiter) :

$$m [M_{Jup}] \sin i = \frac{K [m/s] M_{\star}^{2/3} [M_{\odot}] P^{1/3} [days]}{203}$$

$M_{\star} [M_{\odot}]$ = masse de l'étoile relativement au Soleil

P = période orbitale observée

K = demi-amplitude de vitesse observée

Application :

$$m [M_{Jup}] \sin i = \frac{494 \times 1.35^{2/3} \times 3.3175^{1/3}}{203} \simeq 4.43$$

Valeur officielle = 4,12 x masse Jupiter

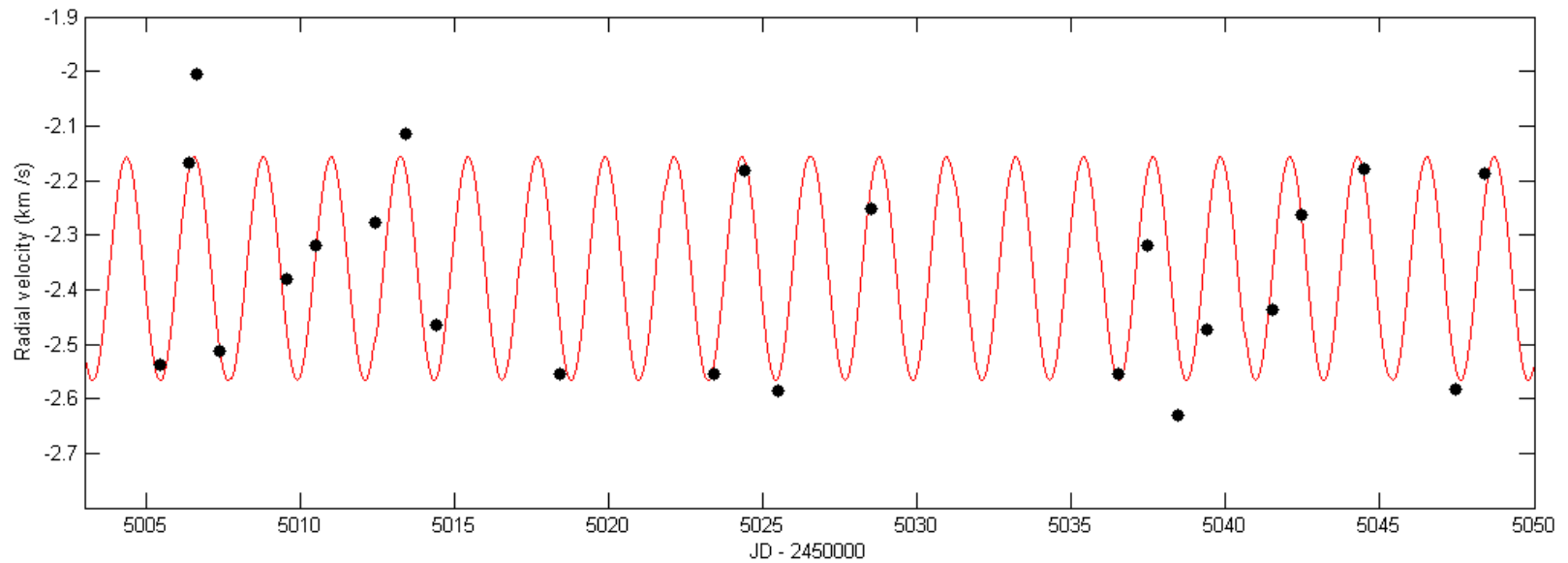
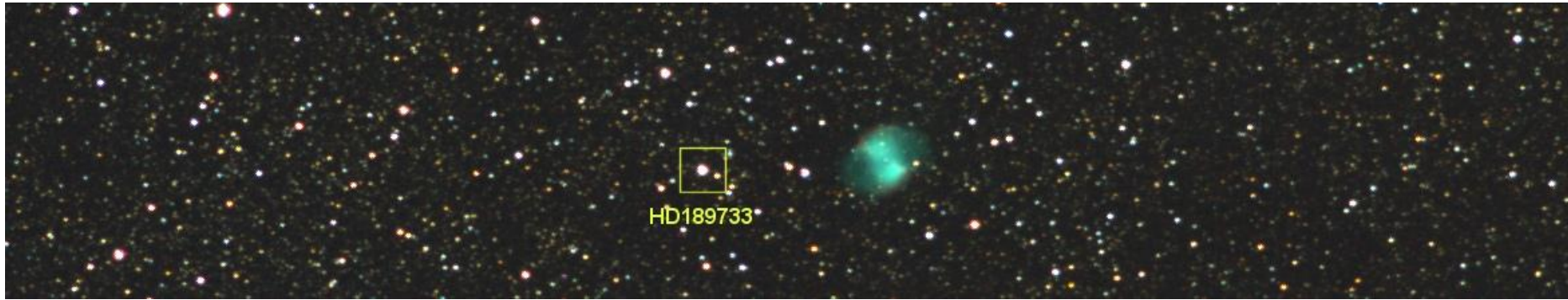
Cette formule permet de calculer le demi-grand axe de tau Boo b

Demi-grand axe : $a [UA] = 0.0196 P^{2/3} [days] M_{\star}^{1/3} [M_{\odot}]$

$$a [UA] = 0.0196 \times 3.3175^{2/3} \times 1.35^{1/3} \simeq 0,0479$$

(valeur adopté dans la littérature $a = 0,0481$ UA)

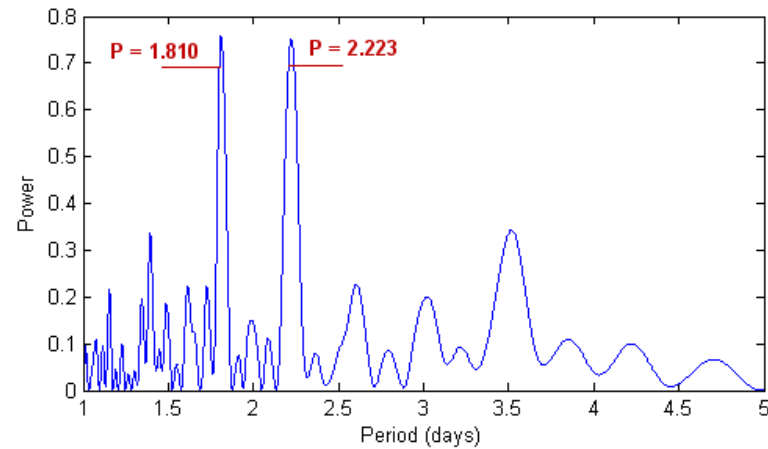
Observation de la planète extrasolaire HD189733 b



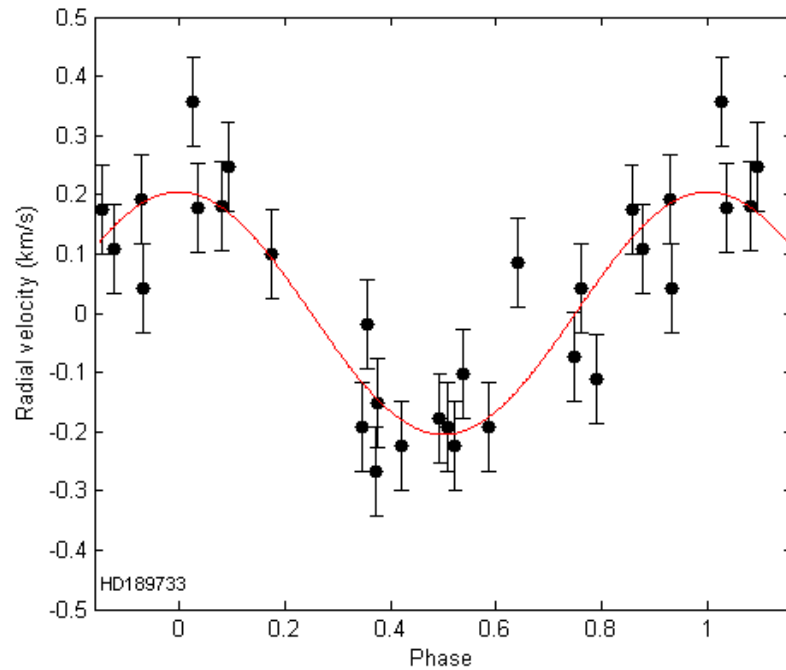
Vitesse radiale observée

Période = 2.218573 jours, demi-amplitude = 205 m/s

Observation de la planète extrasolaire HD189733 b



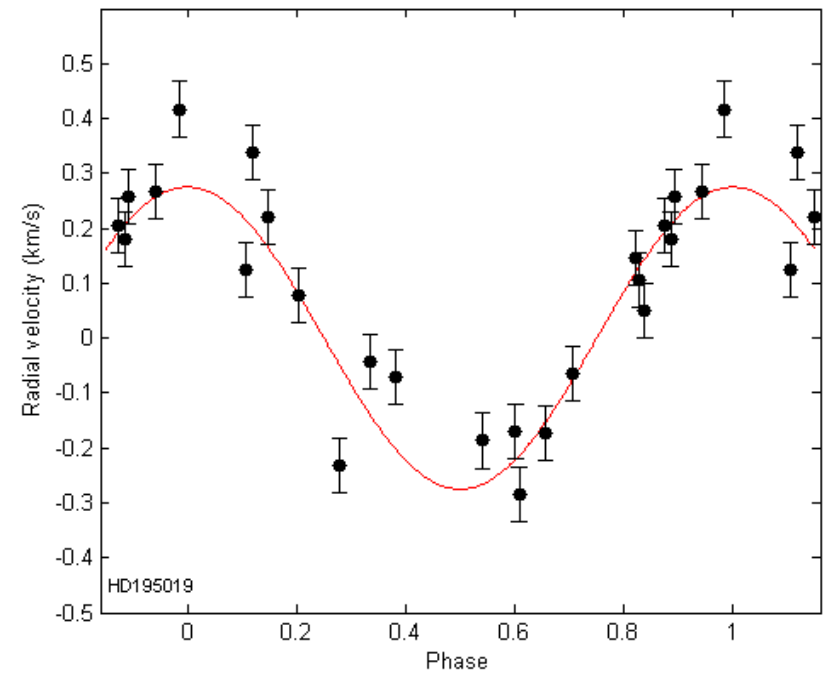
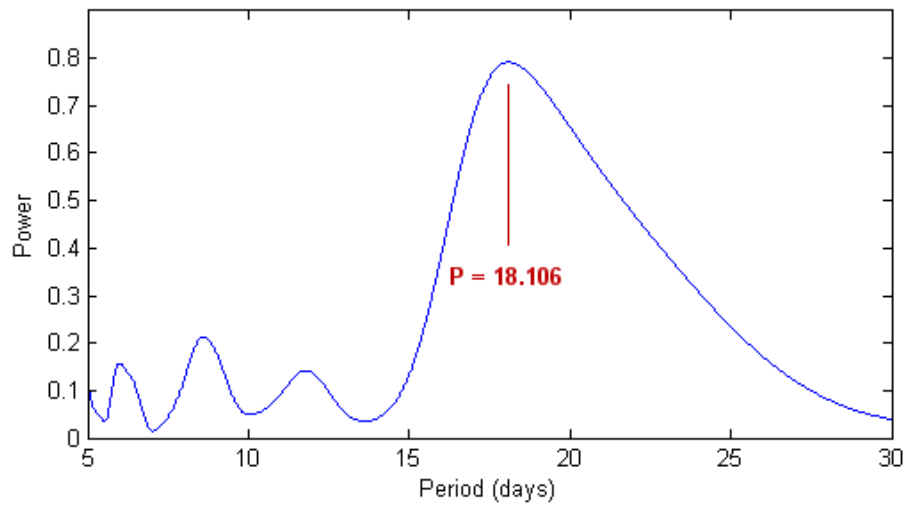
Périodogramme (la double période est un effet de l'échantillonnage)



Courbe de phase

Assez facile : HD195019 b

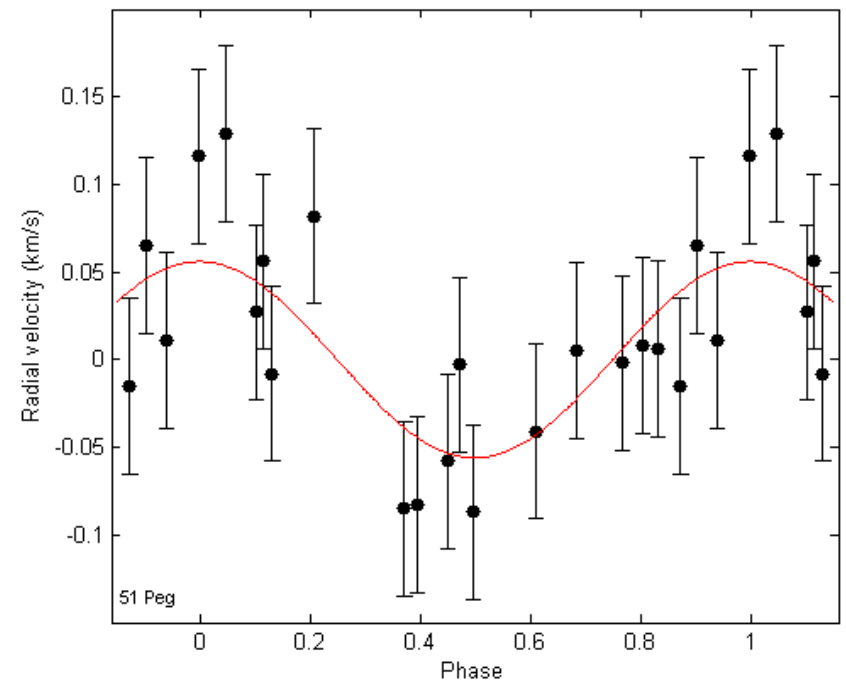
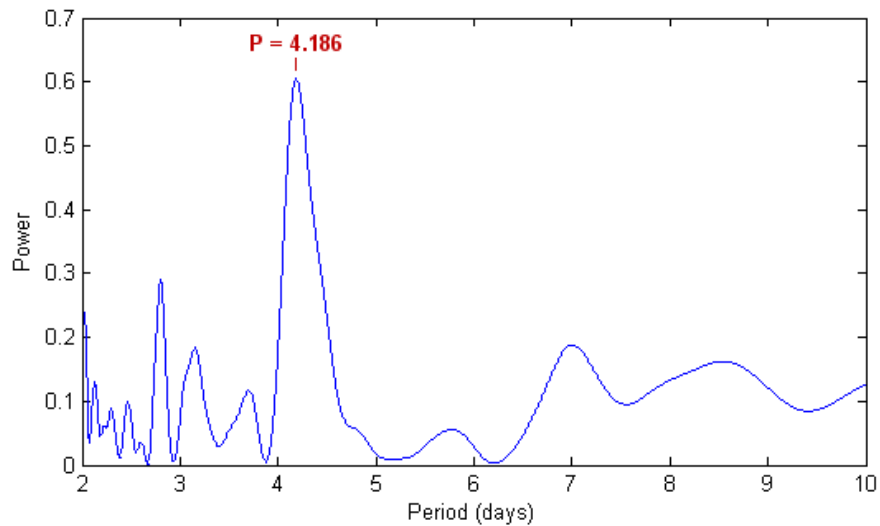
Magnitude 6,9 – Période = 18,2 jours – $K = 275$ m/s



Barre d'erreur de ± 50 m/s

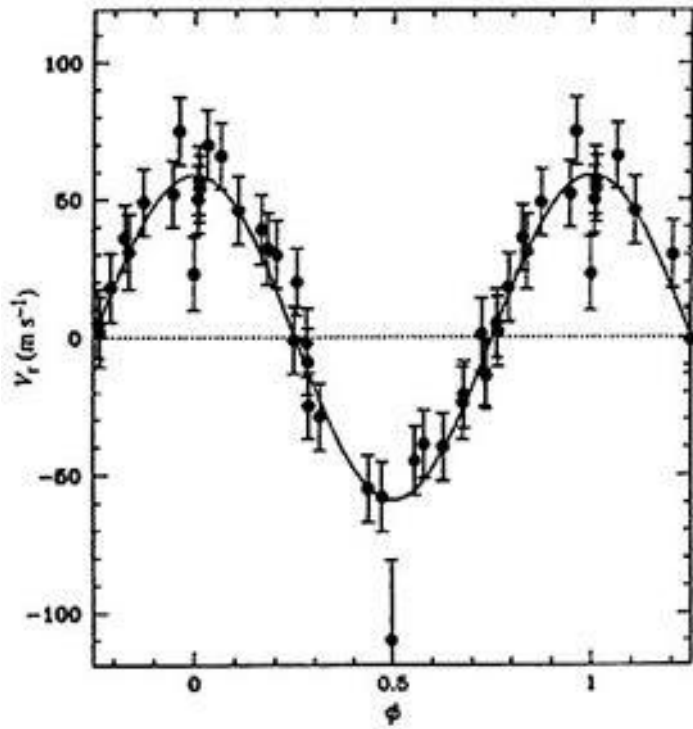
Assez difficile : 51 Peg b (un objet mythique !)

Magnitude 5,5 – Période = 4,23 jours – $K = 56$ m/s



Barre d'erreur de ± 50 m/s

Le sens de l'histoire...

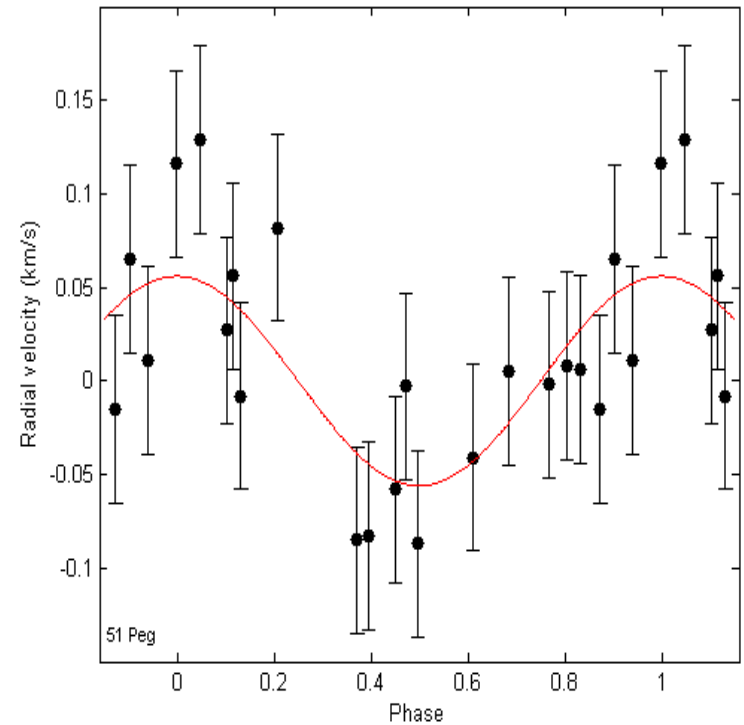


51 Pégase

Michel Mayor, Didier Queloz

Septembre 1994 – Septembre 1995

Spectrographe Elodie – Télescope de 1,93 m
Observatoire de Haute-Provence



51 Pégase

Christian Buil

24 juin 2009 – 5 août 2009

Spectrographe eShel – Télescope de 0,28 m
Observatoire de Castanet-Tolosan

Observations réalisées en milieu urbain et avec petit télescope (D = 0,28 m) !

Castanet Tolosan – Banlieue de Toulouse (France)



Reshel (Réduction des spectres eShel) - V1.10

Extraction | Traitement par lot | Utilitaires 1 | Utilitaires 2 | Vitesse radiale | Visualisation image | Visualisation profil | Configuration

Calcul de la vitesse héliocentrique

Jour : 13 956 Mois : 5 Année : 2009

AD : 13 H 47 M 16 S

DEC : 17 ° 27 ' 25 "

Go

Périodogramme (algorithme de Lomb-Scargle)

Nom du fichier .DAT à analyser : tauboo

Période minimale : 1

Période maximale : 5

Pas de calcul : 0.0001

Go

Périodogramme de c:\exoplanete2\tauboo.dat ...

Vitesse radiale = -16.675 km/s

Période = 3.3175000 jours

K = 0.4942 km/s (demi-amplitude)

J0 = 909.1925 (date du premier maximum)

Fichier périodogramme -> c:\exoplanete2\period.dat

Fichier d'ajustement -> c:\exoplanete2\fit.dat

Courbe de phase (données d'entrée) -> c:\exoplanete2\phase.dat

Courbe de phase (modèle) -> c:\exoplanete2\phase2.dat

O-C de la courbe de phase -> c:\exoplanete2\delta_phase.dat

Ok

Erreur de mesure en vitesse radiale (RV) :

$$\delta RV = \frac{\sqrt{FWHM}}{(S/B)\sqrt{W}}$$

FWHM = finesse spectrale

S/B = rapport signal sur bruit

W = largeur spectrale observée

Evaluation pour eShel :

Magnitude	Celestron 11 - f/5.9	60 cm - f/3.5
3	37 m/s	18 m/s
4	56 m/s	28 m/s
5	95 m/s	46 m/s
6	175 m/s	75 m/s
7	360 m/s	140 m/s

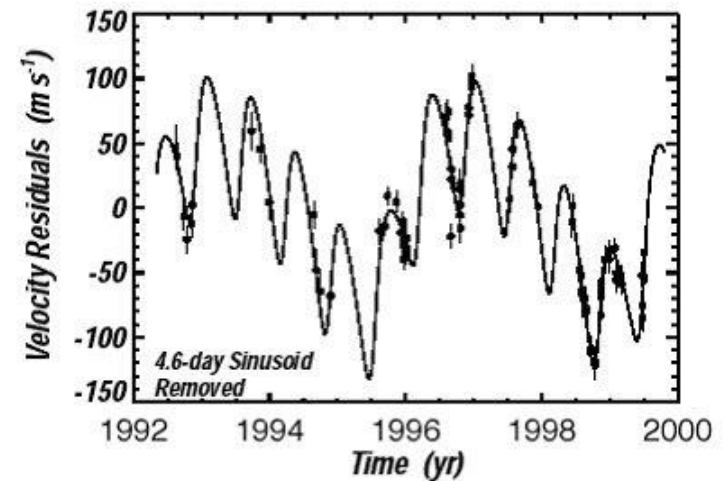
(erreur de mesure à 3 sigma)

Possibilités de découvertes...

- Observation d'étoiles chaudes (type A ou B)
- Observation sur de longues périodes
- ...

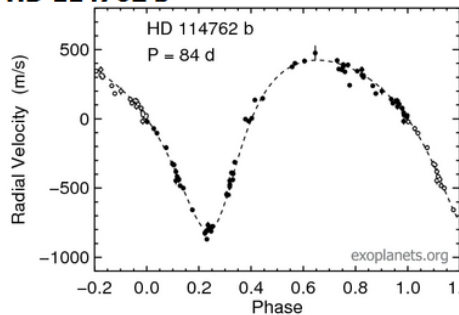
et les produits dérivés...

- Observation des pulsations (RR Lyr, ...)
- Observation de la surface des étoiles (imagerie Doppler)
- ...



Système Upsilon And. Trois planètes de périodes 4,6 jours, 241,2 jours et 1266,6 jours.

HD 114762 b



[NStED Velocities and Light Curves](#)

Discovery and References

First Publication Date	1989
Method of Discovery	RV
Orbit Reference	Butler 2006
First Reference	Latham 1989
Star Type Reference	Valenti 2005
Star Mass Reference	Valenti 2005
Parallax Reference	van Leeuwen 2009
EPE Link	HD 114762
NStED Link	64426
SIMBAD Link	HD 114762

Orbital Parameters

Msin(i)	[mjupiter]	11.7±0.843
Semi-Major Axis	[au]	0.363
Orbital Period	[days]	83.888±0.0086
Velocity Semi-amplitude	[m/s]	615±6.7
Orbital Eccentricity		0.336±0.0091
Argument of Periastron	[deg]	202±1
Time of Periastron	[d]	2449805.4±0.370

Orbital Fit Properties

Reduced Chi Squared	1.21
# of Observations	45
RMS of Velocities	24

Stellar Properties

Star Name	HD 114762
Spectral Type	F9V
Binary Flag	1
Mass of Star	[msun] 0.89±0.0895
[Fe/H]	-0.65±0.03
T _{eff}	[K] 5950±44
log ₁₀ (g)	4.54±0.06
Vsin(i)	[km/s] 1.8±0.5
Components	1

Stellar Magnitudes

V mag	7.3
B-V	0.525
2MASS J	6.144
2MASS H	5.887
2MASS K _s	5.812

Coordinates and Catalogs

RA (h:m:s)	13:12:20.099
DEC (d:m:s)	+17:31:01.66
Parallax	[mas] 25.9±0.76
Distance to Star	[pc] 39±1.14
Hipparcos Catalog #	64426

Exemple
d'exoplanète
« facile »





Merci !



