

# Spectrographie : les nouveaux horizons

Christian Buil

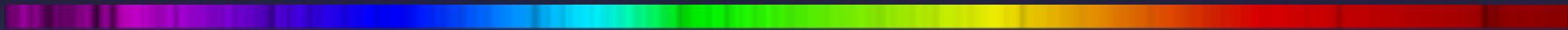
Rencontres du Ciel et de l'Espace  
1 - 3 novembre 2018, Paris

## Spectrographie : (quelques) nouveaux horizons



- Capteur CMOS et spectrographie
- Faire des images de la surface des étoiles
- La spectro-polarimétrie
- Pourquoi et comment observer dans l'ultraviolet

# Capteurs CMOS et spectrographie



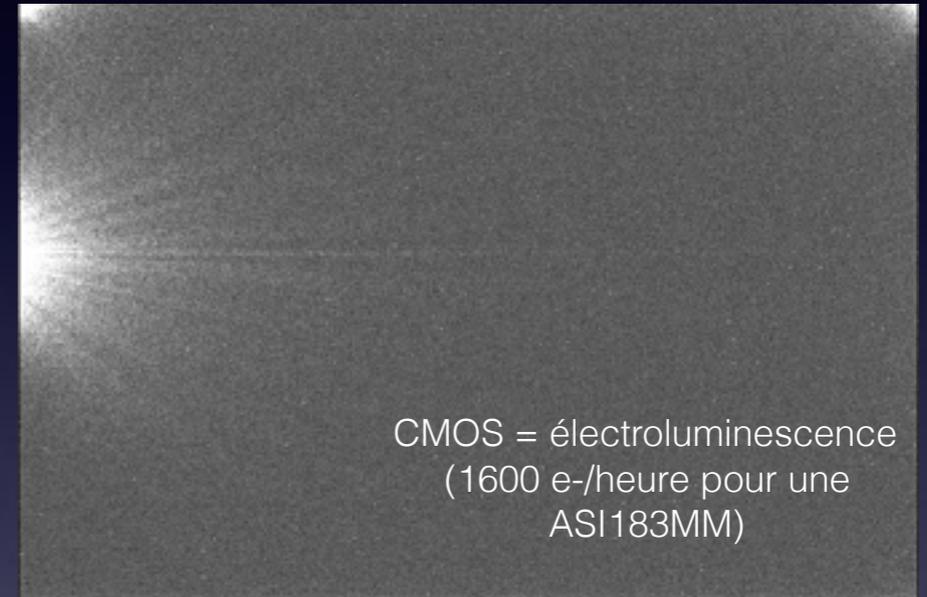
# Capteurs CMOS et spectrographie

L'usage des caméras équipées de capteur CMOS en imagerie du ciel profond et planétaire est une évidence... mais en 2018, est-ce le cas en spectrographie ?

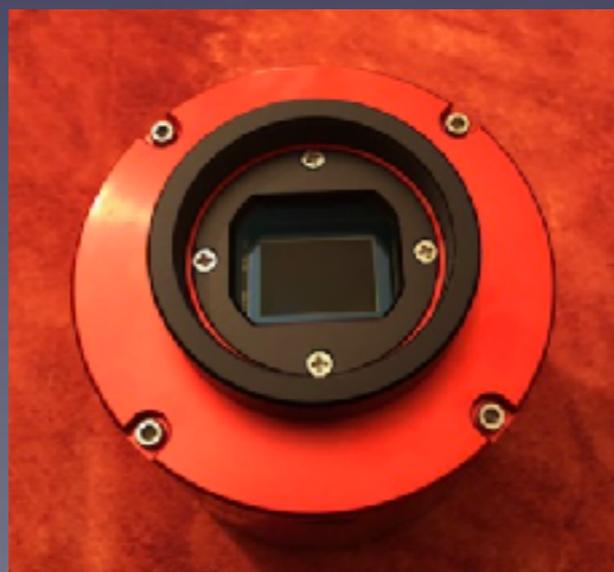
CCD vs CMOS : quelles différences ?



A gauche, une caméra **ASI183MM**, à droite une caméra **ATIK460EX** (noter la différence du reflet)



CMOS = électroluminescence  
(1600 e-/heure pour une ASI183MM)

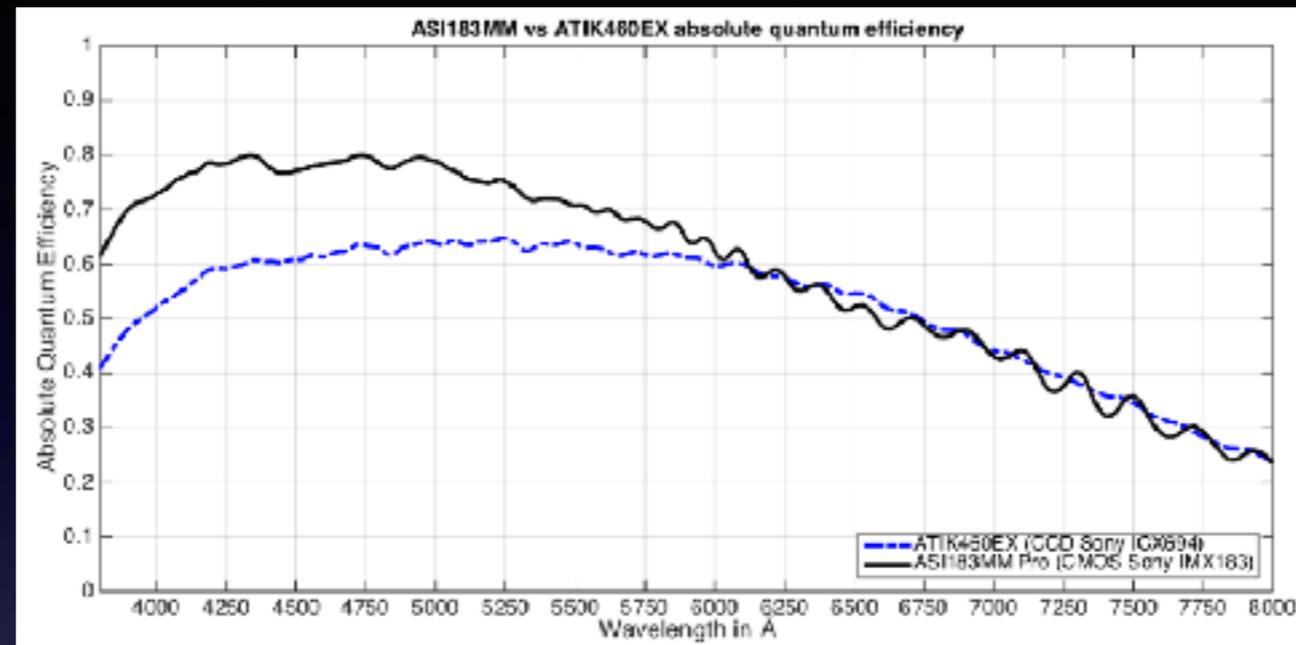


## **ASI294MC**

Sony IMX294CJK - 4144 x 2822 pixels - **Matrice Bayer** :-(  
Pixels de 4,63 microns (2,40 microns pour ASI183M - ratio surface = 3,7)  
Bruit < 2 électrons (1,5 e- ?)  
Numérisation sur 14 bits  
Dynamique : 63000 e-  
Eclairé arrière (BSI) - QE > 80% ?

# Capteurs CMOS et spectrographie

Rendement quantique



**Les plus du CMOS** : faible bruit de lecture

5,5 électrons sur ATIK460EX

1,5 électron sur ASI183MM

*Paramètre fondamental en spectrographie !*

Progrès rapides : exemple, éclairage arrière = gain QE

Prix réduit (production de masse)

**Le moins du CMOS** : petit taille des pixels (sauf ASI294...),

dynamique réduite et prédominance des capteurs couleur

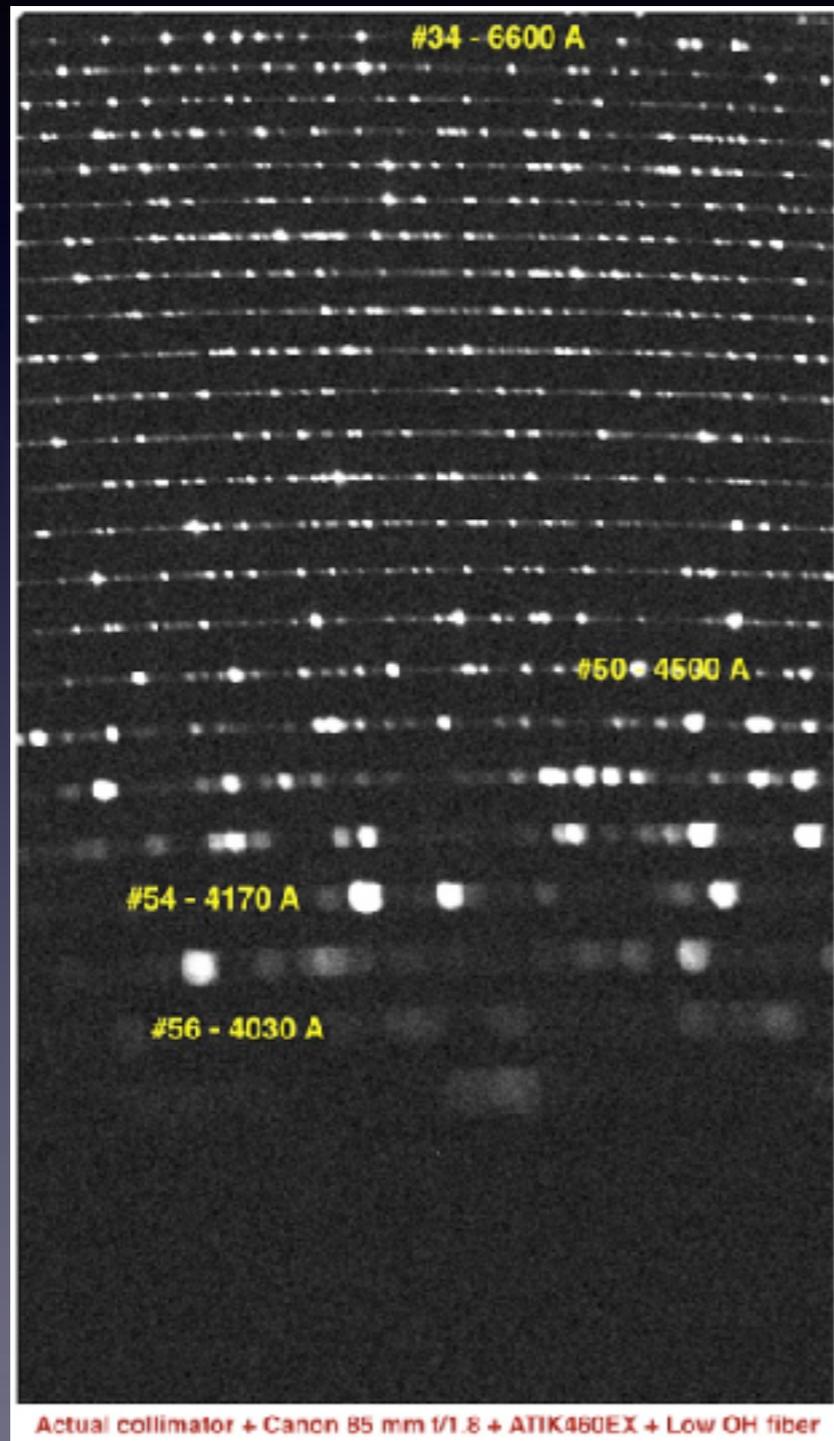
(matrice de Bayer interdite en spectrographie)

**Les capteurs CMOS ont encore des défauts, mais à terme, la question ne se posera plus... on ne trouvera que des caméras CMOS !**

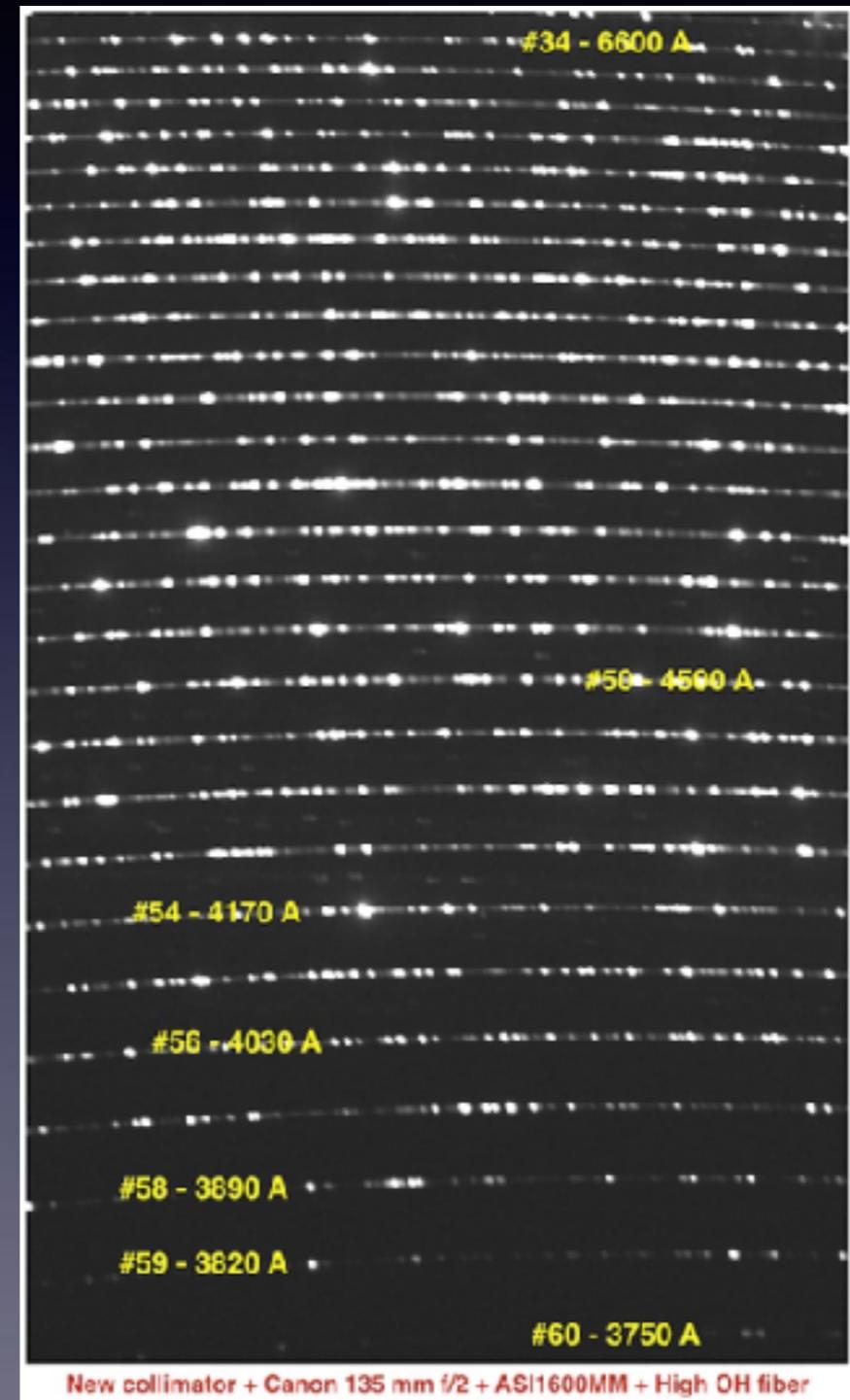
# Capteurs CMOS et spectrographie

## Capteurs CMOS grand-format : aide à l'optimisation des spectrographes

Exemple du spectrographe eShel : l'usage du modèle ASI1600MM pour une amélioration substantielle de la performance



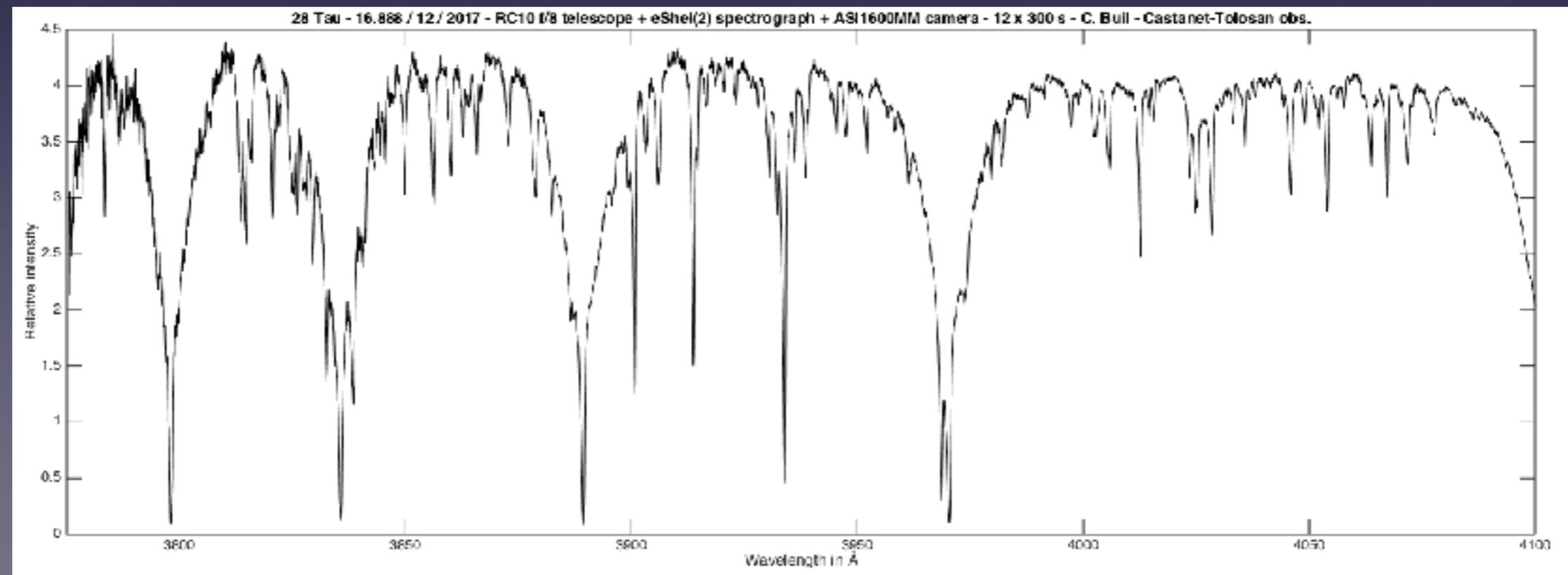
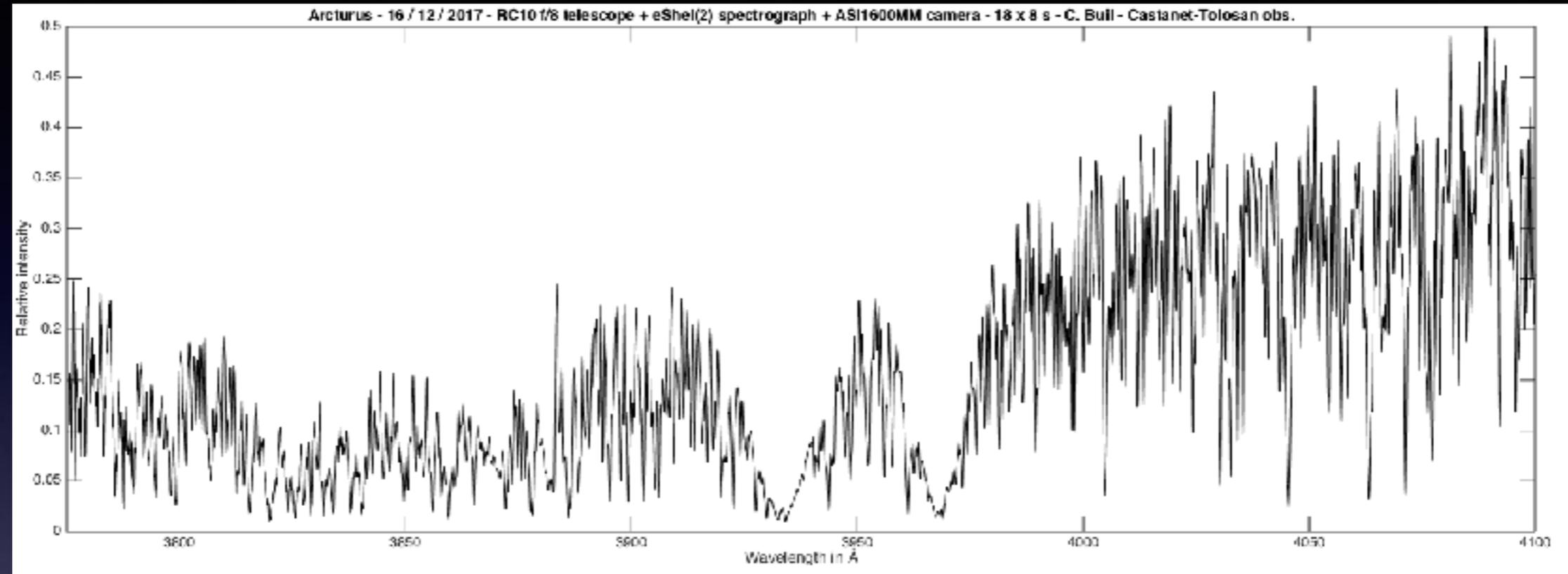
Avant



Après

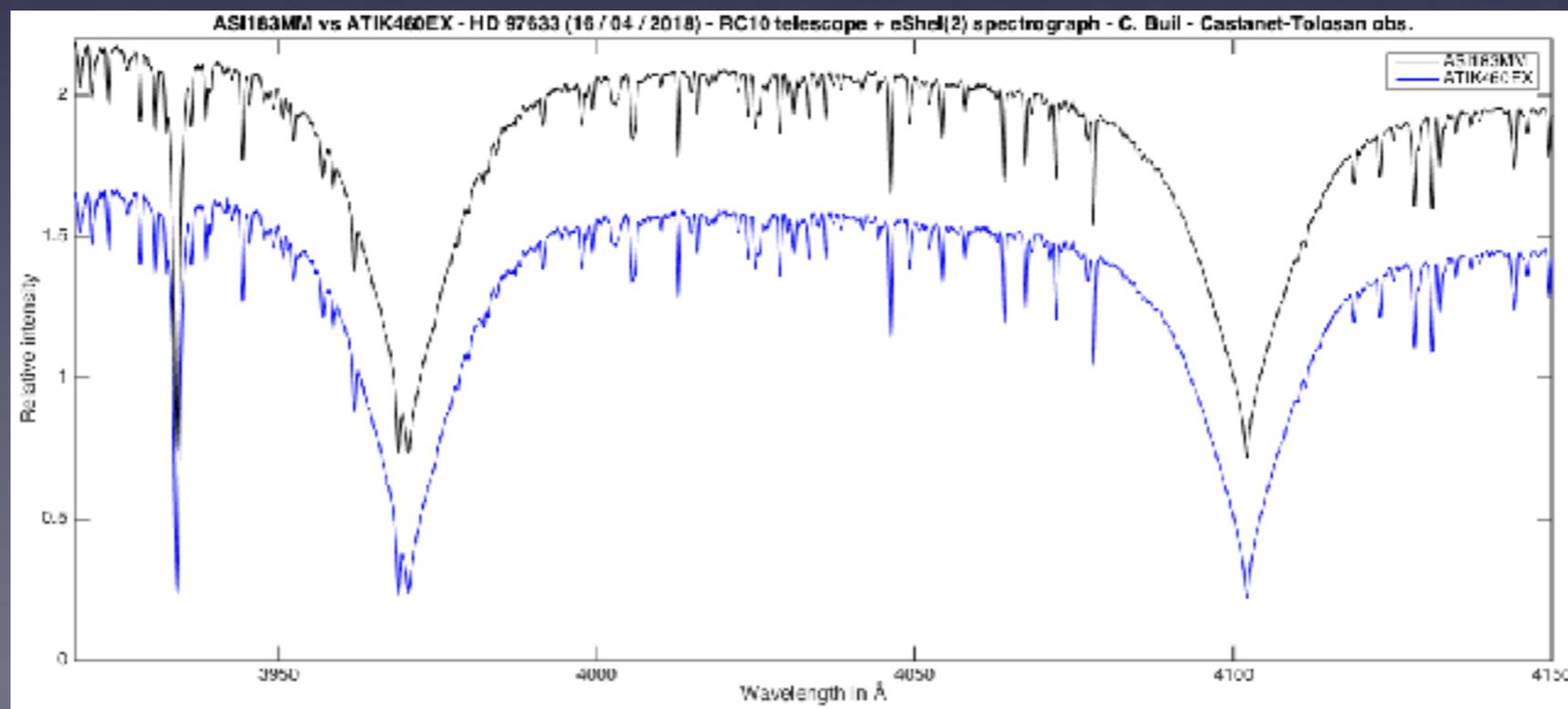
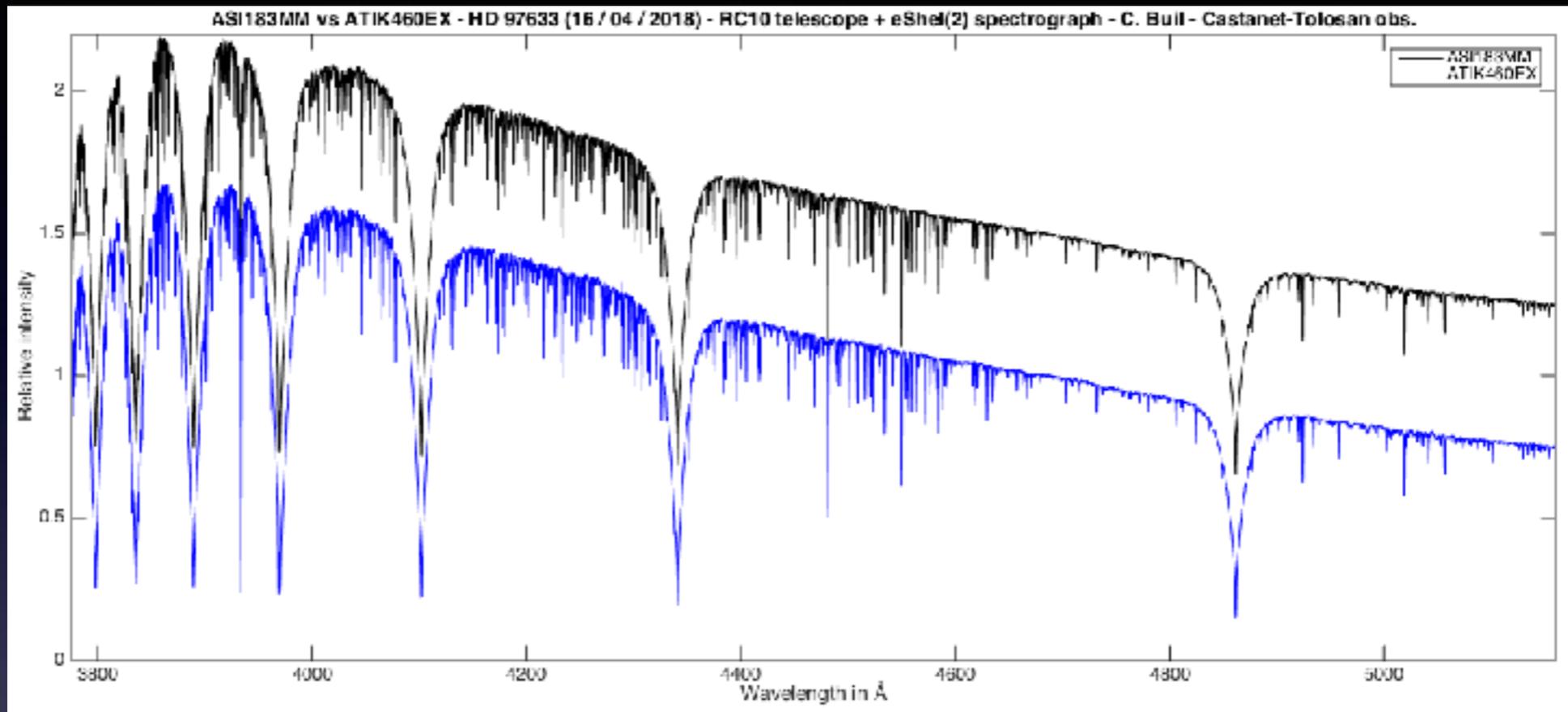
# Capteurs CMOS et spectrographie

Exemples de spectres (portions) : spectrographe eShel et caméra ZWO ASI1600M (extension du domaine spectral en dessous de 3800 Å)



# Capteurs CMOS et spectrographie

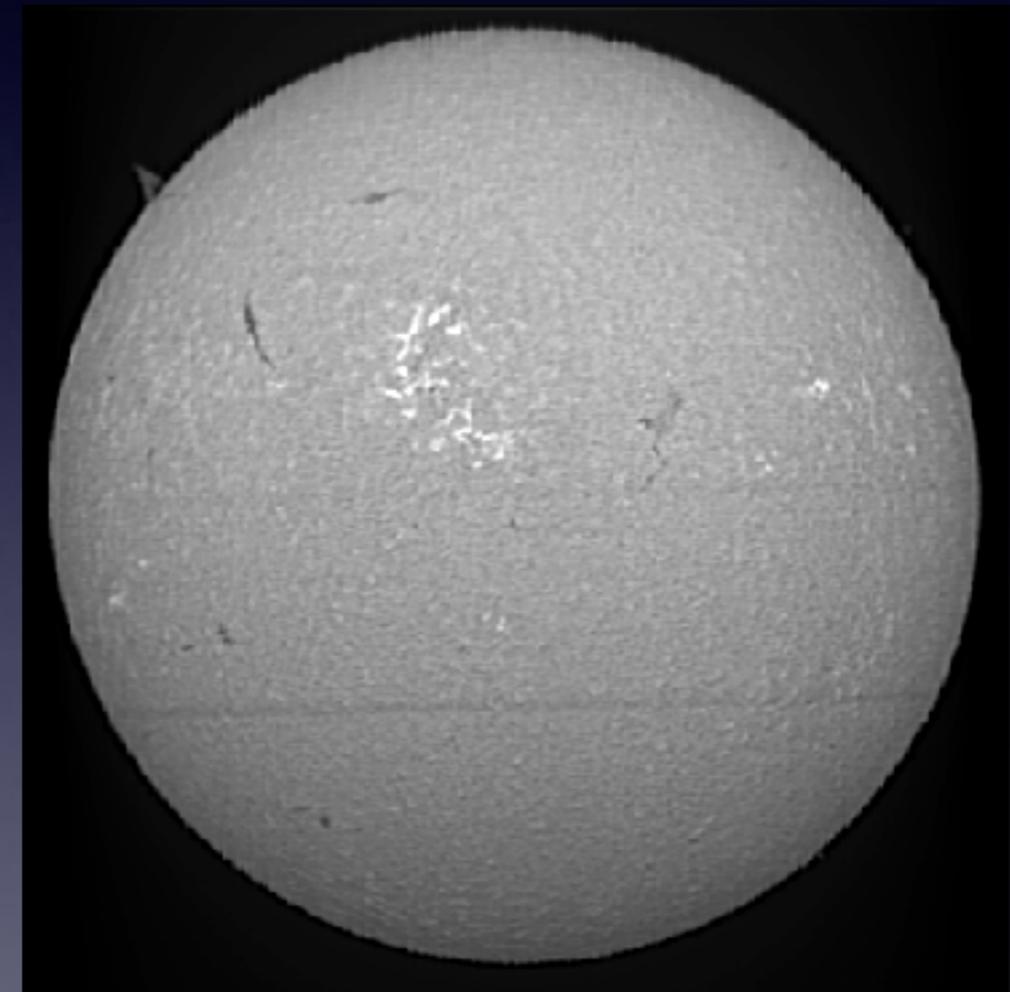
Comparaison CCD (ATIK460EX) vs CMOS (ASI1600MM)  
HD 97633 - Télescope RC10 - Spectrographe eShel



# Capteurs CMOS et spectrographie

Ou comment transformer simplement un spectrographe (Lhires II) en spectrohéliographe...

*La grande vélocité de lecture et les petits pixels sont aussi service de la spectrographie*

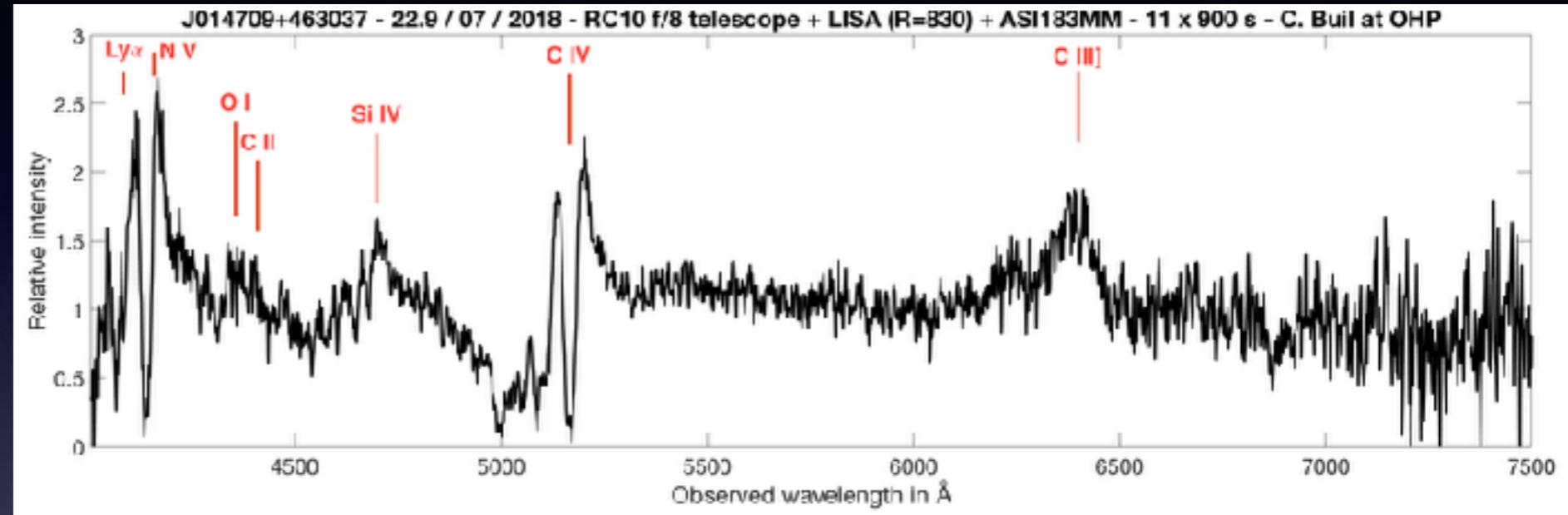
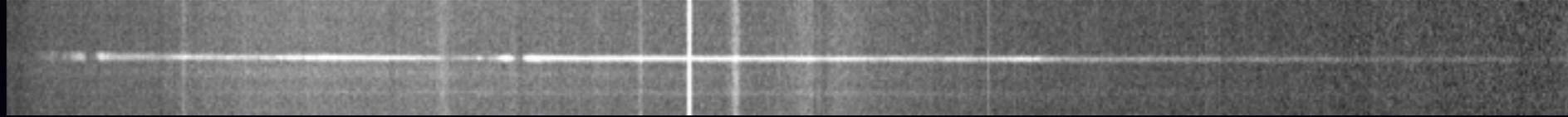
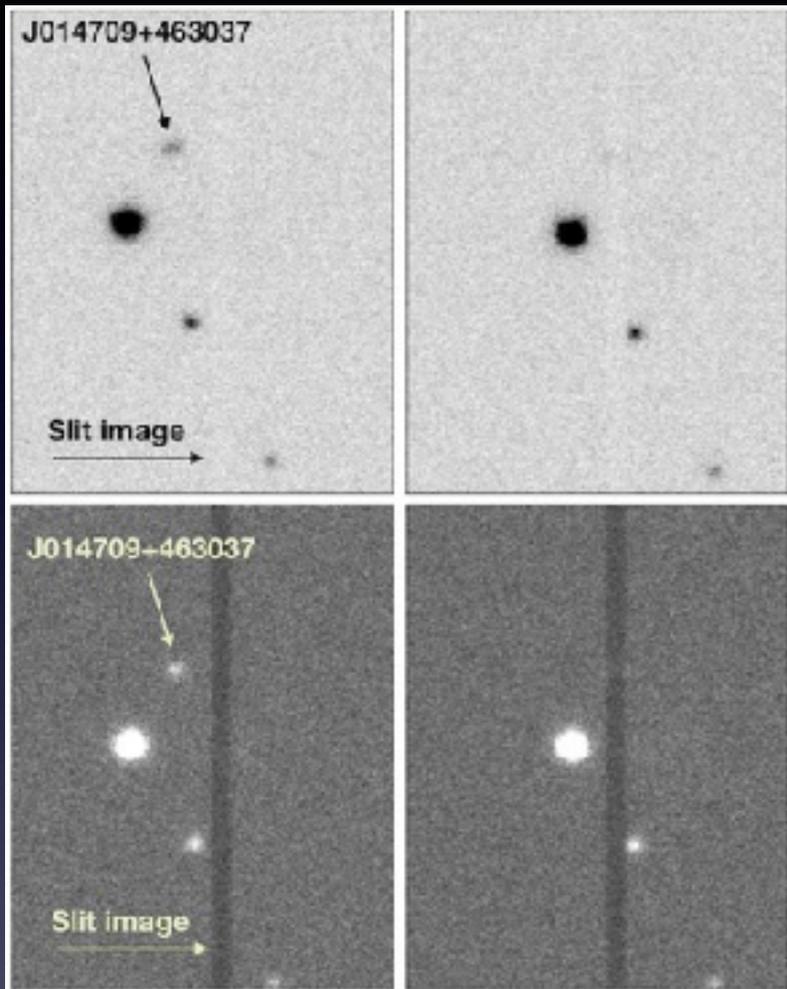


Technique du scanning : l'image de la fente défile devant la fente puis mise à côte à côte de fines tranches de spectre correspondant à la raie H $\alpha$

Spectrohéliogramme obtenu avec une lunette FS60 et une caméra ASI178MM  
17 janvier 2017

# Caméras CMOS et spectrographie

Quadruple quasar J014709+463037 (lentille gravitationnelle) - Magnitude V=15,5 - z = 2,85  
RC10 (GSO de 25 cm f/8) + spectrographe LISA + caméra ASI183MM (ZWO)

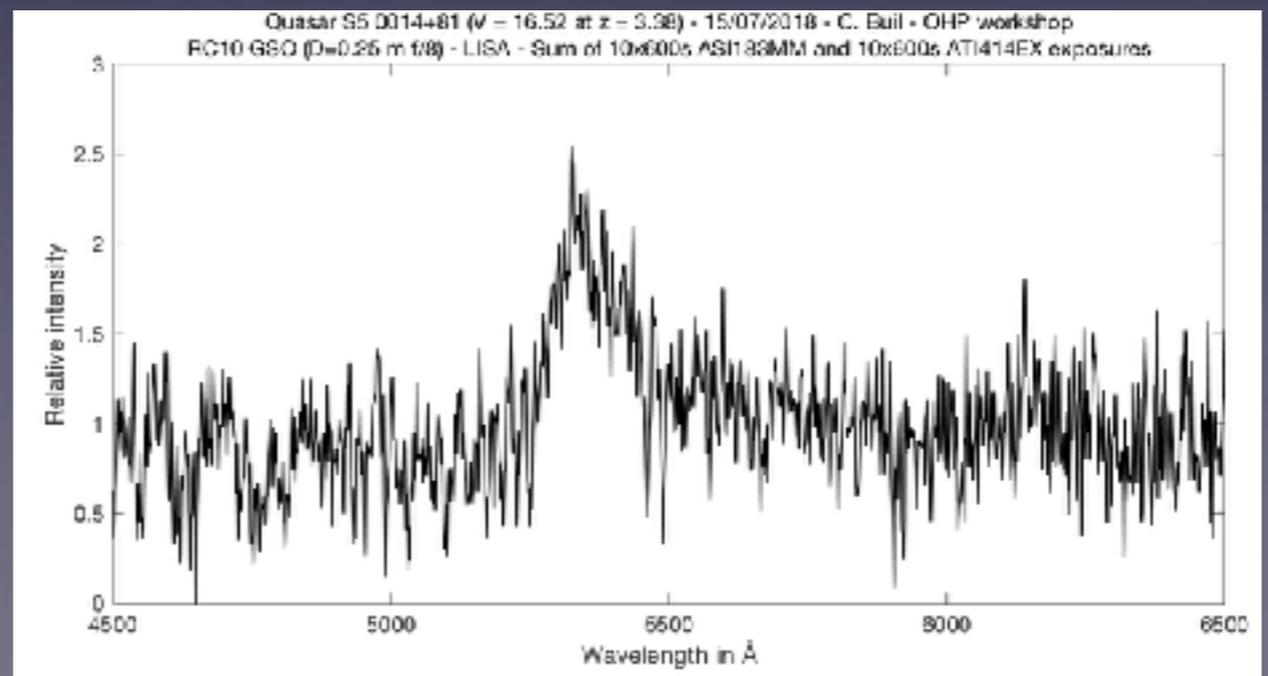


Temps de pose de 11 x 900 s = 2 h 45 mn - OHP 2018

Image de la caméra de guidage  
ASI1600MM

Plus difficile : quasar 0014+81 - Magnitude V = 16,5  
Z = 3,38 (12 milliards d'années lumière)  
RC10 + caméras ASI183MM et ATIK414EX

Raie Lyman  $\alpha$  : 1218 Å  $\rightarrow$  5346 Å



# Faire des images de la surface des étoiles

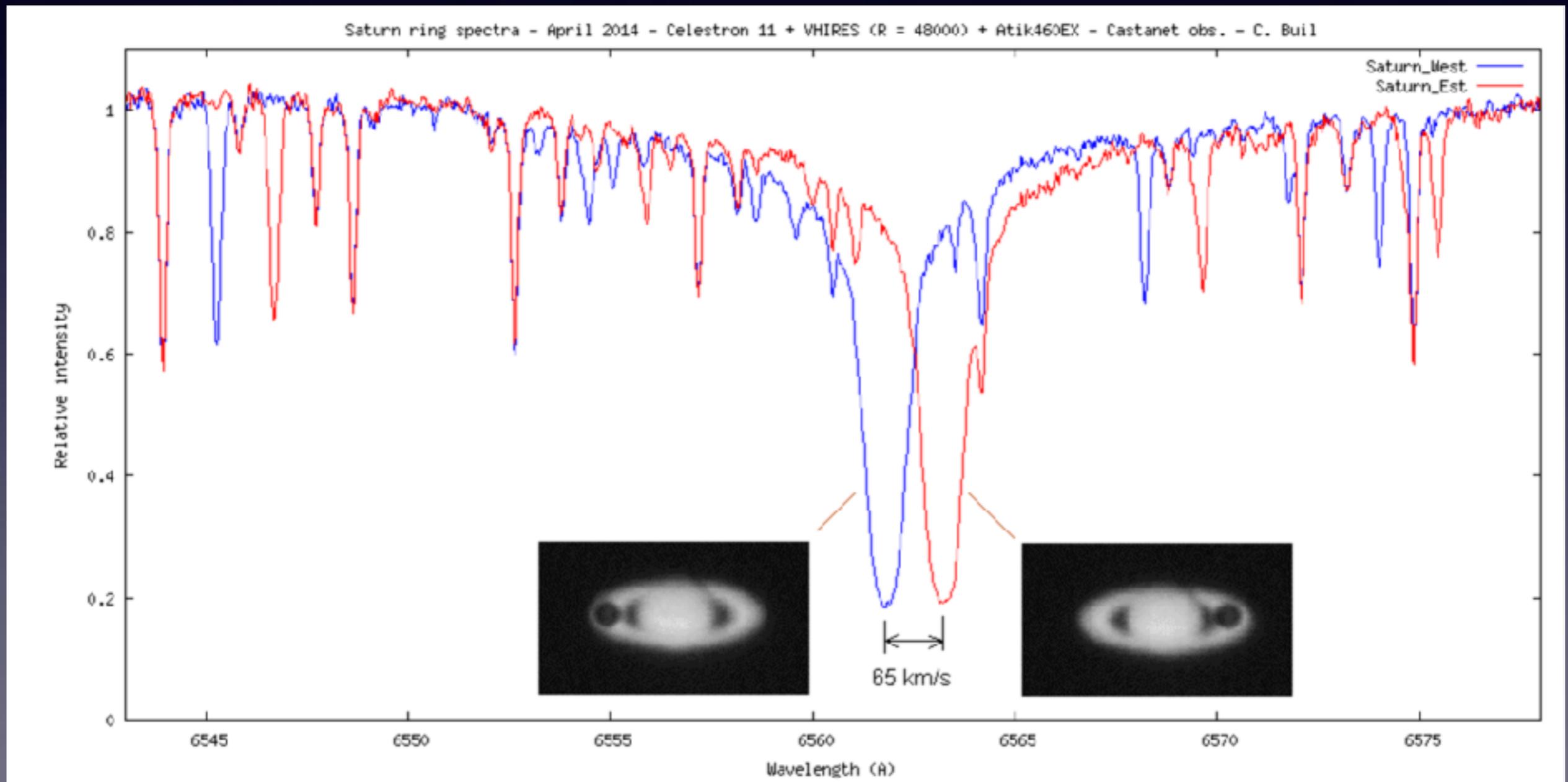


# Faire des images de la surface des étoiles

## L'effet Doppler

Décalage des raies spectrales en fonction de la vitesse radiale ( $\Delta\lambda = v / c \times \lambda$ )

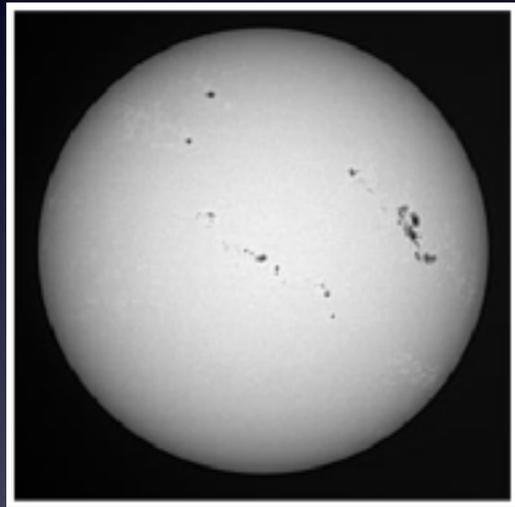
Exemple : la mesure de la vitesse de rotation des anneaux de Saturne



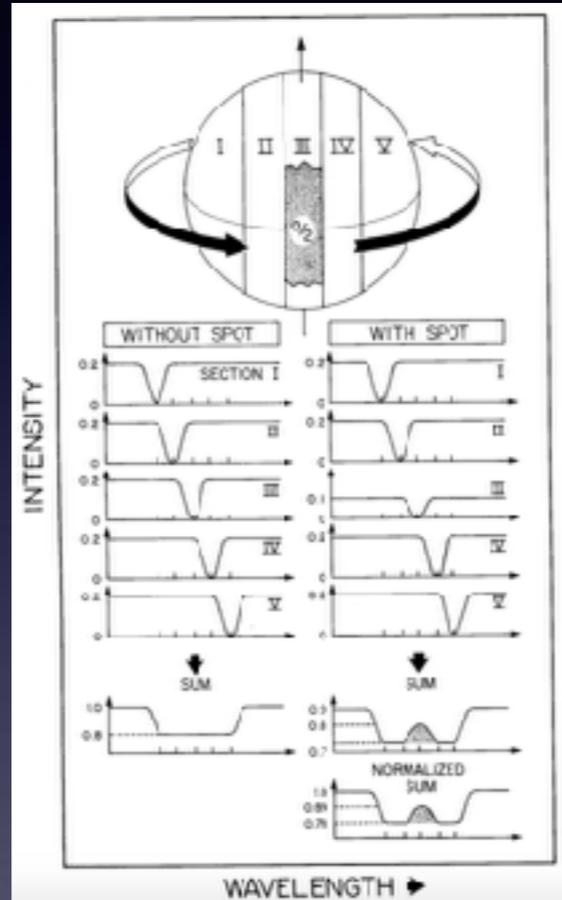
# Faire des images de la surface des étoiles

## L'imagerie Doppler

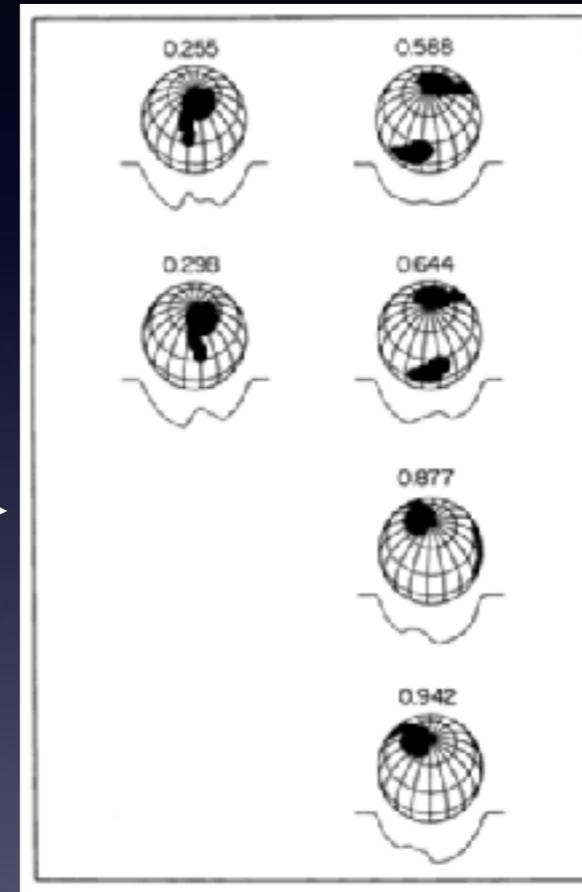
*Un sujet fascinant*



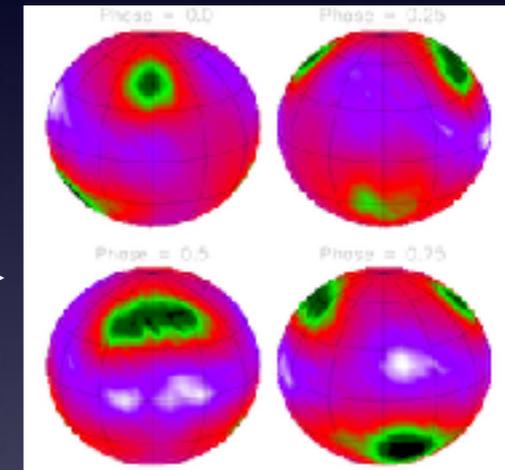
(1) L'étoile tourne sur elle-même



(2) Les différents points du disque ont une vitesse radiale distincte



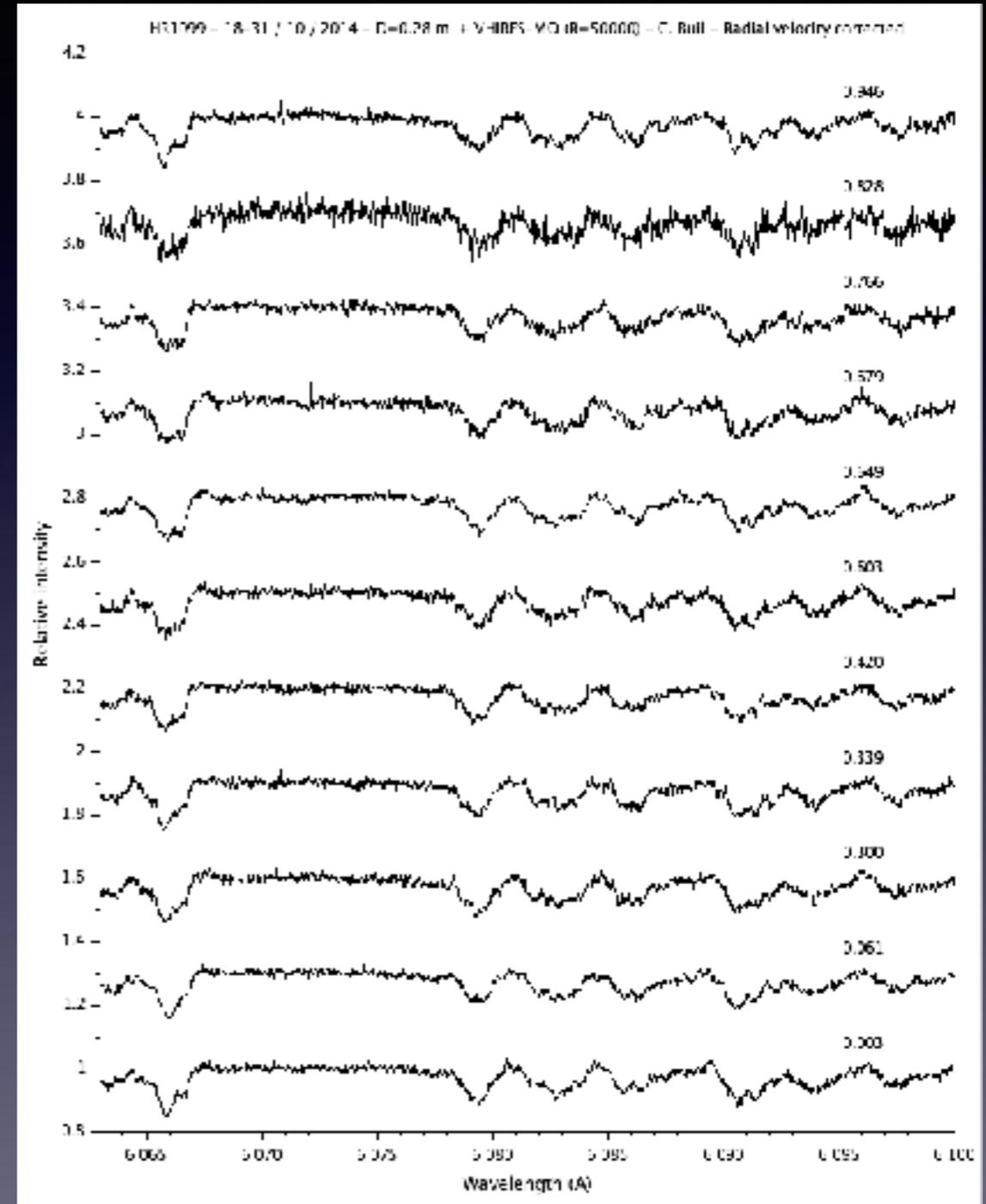
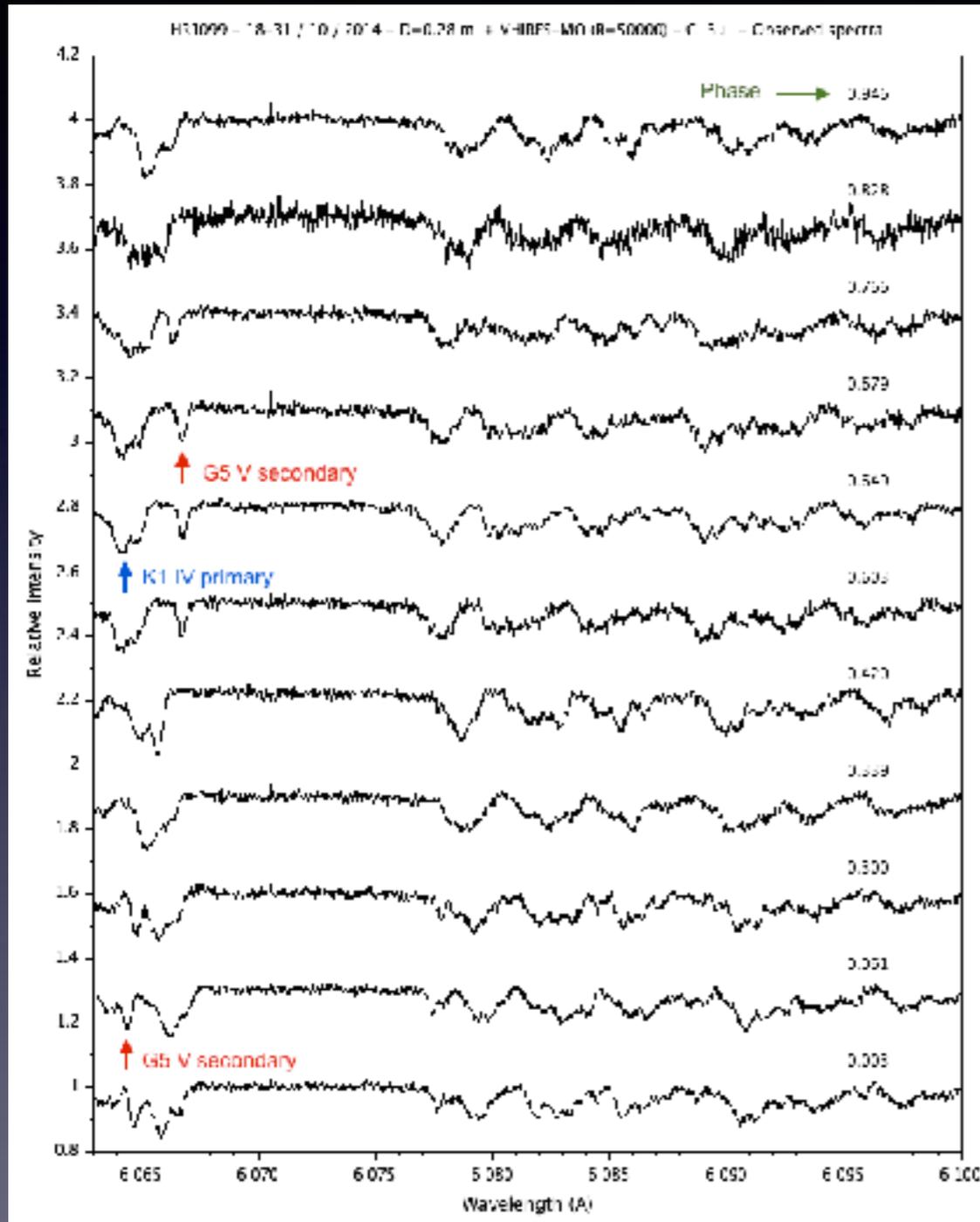
(3) Chacun des points participe à la formation du spectre. Si des taches sombres sont présentes, le profil des raies spectrales est déformé (Vogt & Penrod, 1983)



(4) Inversion mathématique du profil des raies en fonction du temps pour retrouver l'image la plus probable de l'étoile ( $\sigma$  Gem, A. Semenova, 2006)

# Faire des images de la surface des étoiles

L'étoile HR 1099 (type RS CVn)  
Une surface couverte de taches

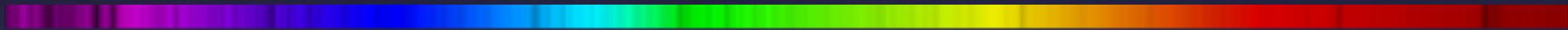


Système double (cas un peu compliqué !)

Spectre de l'étoile K1 IV (région H $\alpha$ ) isolé en supprimant le spectre de l'étoile G5V (modèle synthétisé à partir d'une observation de HD 5268)



# Spectro-polarimétrie

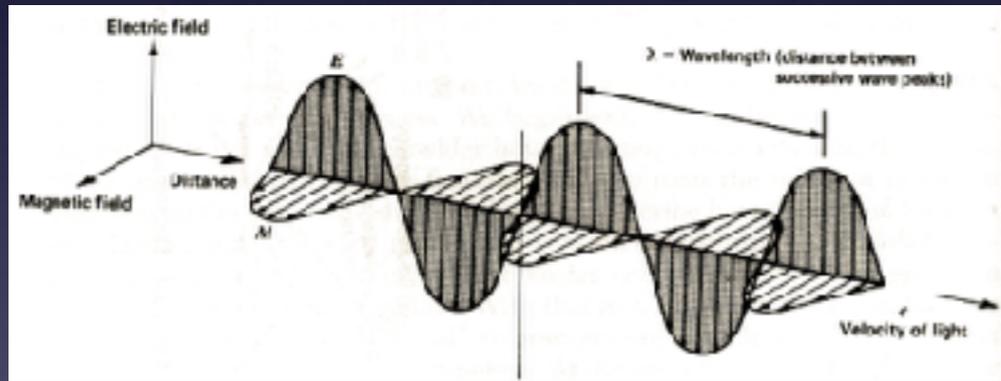


# Spectro-polarimétrie

Objectifs :

- Etude de la polarisation du milieu interstellaire
- Étude du nuage circumstellaire des étoiles Be
- Etude des proto-étoiles
- Etude du nuages de poussière des comètes
- Etude de la nature du sol des astéroïdes et planètes
- Etude du champ magnétique des étoiles

## Que mesure-t-on ?

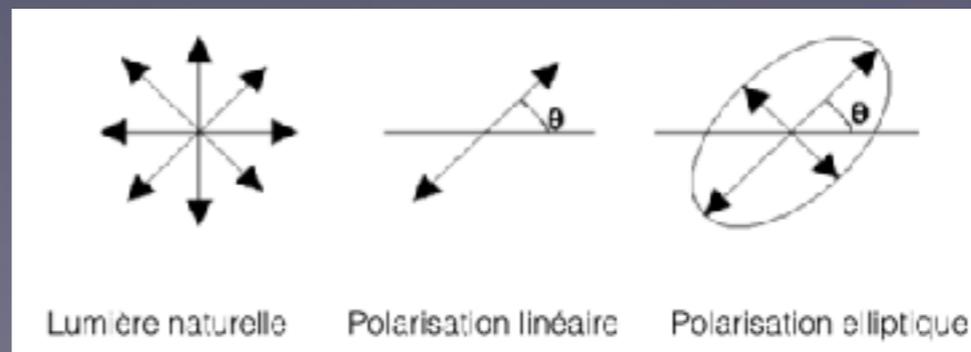


La lumière est une onde électromagnétique  
Polarimétrie : mesure de l'orientation du champ électrique



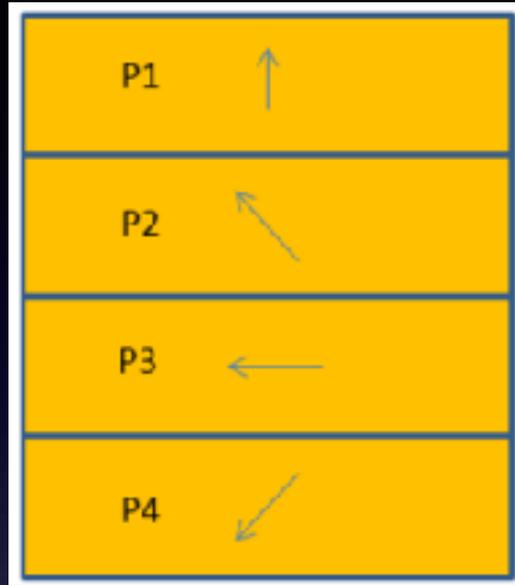
Notre outil est le filtre polarisant  
Laisse passer la lumière associée à une orientation données du champ électrique

Orientation aléatoire = lumière non polarisée  
Orientation fixe = polarisation rectiligne  
Rotation du champ = polarisation circulaire  
Mélange rec. + circ. = polarisation elliptique



# Spectro-polarimétrie

Comment si prendre ?



4 images associées à 4 orientations distinctes du filtre polarisant



$$\begin{aligned} I &= S1 + S3 = S2 + S4 \\ Q &= S1 - S3 \\ U &= S2 - S4 \end{aligned}$$

Calcul de I, Q, U (paramètres de Stokes)



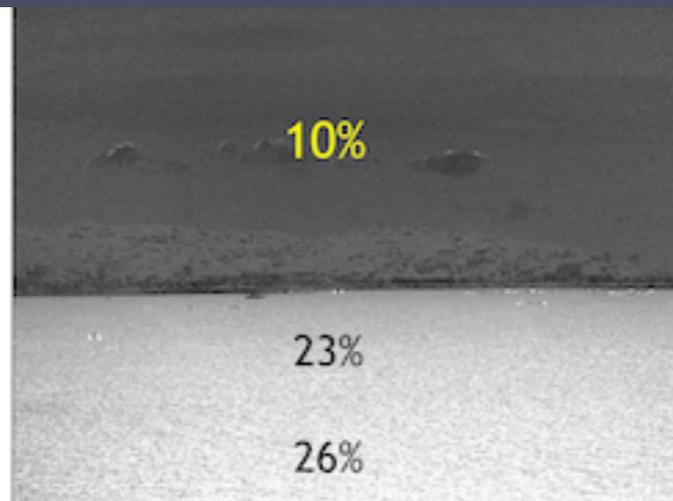
$$p_L = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I}$$

$$\tan 2\theta = \frac{U}{Q}$$

Calcul du taux de polarisation (proportion entre lumière polarisée et lumière non polarisée) et angle de polarisation



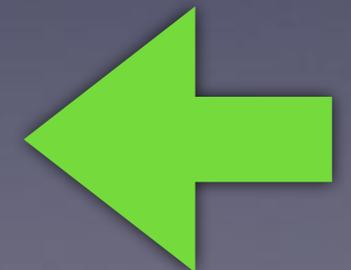
Image en lumière naturelle



Taux de polarisation



Angle de polarisation



# Spectro-polarimétrie

La polarisation de la lumière est une donnée abstraite pour nous car l'oeil humain n'y est pas directement sensible (contrairement à la couleur)



Soyons jaloux de la squile mante paon (Odontodactylus scyllarus) !

ou la furieuse envie de devenir un crustacé...

L'oeil de cette performante crevette :

- 16 photo-récepteurs (12 destinées à la vision colorée)
- Sensible à la lumière polarisée linéairement et circulairement !
- Très grand champ
- Vision 3D
- Forte mobilité (capacité de pointage)

Le système visuel le plus performant du règne animal



Source photos : <http://www.animogen.com>

Lire aussi : Le lumière et la vie, B. Valeur et E. Bardez, Belin

# Spectro-polarimétrie

## Comment observer ?

Où trouver des filtres ?



Aller voir un film en projection cinéma 3D  
et garder les lunettes !

Placer la roue à filtre devant un spectrographe  
**Spectro-polarimétrie = mesure de la polarisation en  
fonction de la longueur d'onde**

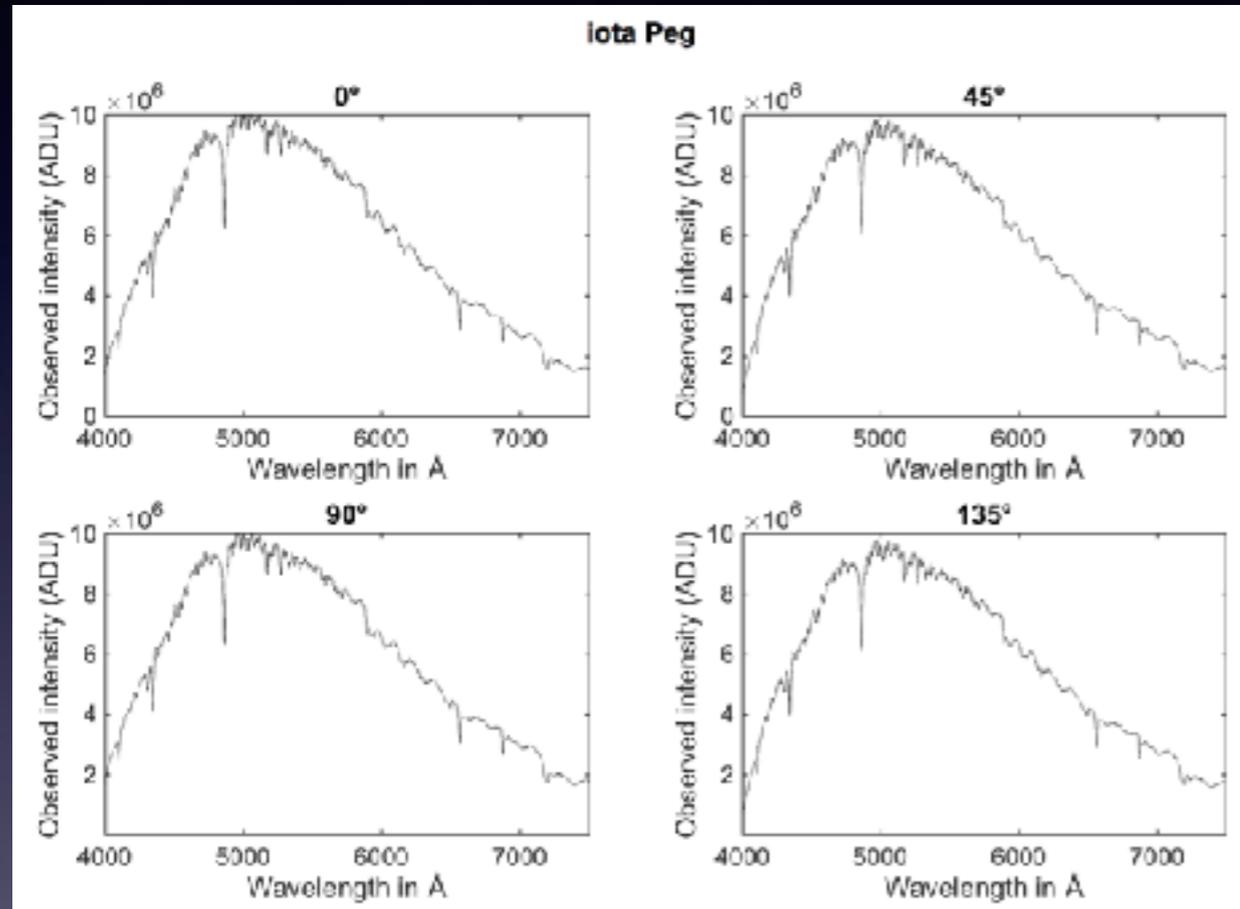


Découper et monter dans un roue à  
filtre (4 orientations)



# Spectro-polarimétrie

Observation d'une étoile non polarisée : iota Peg

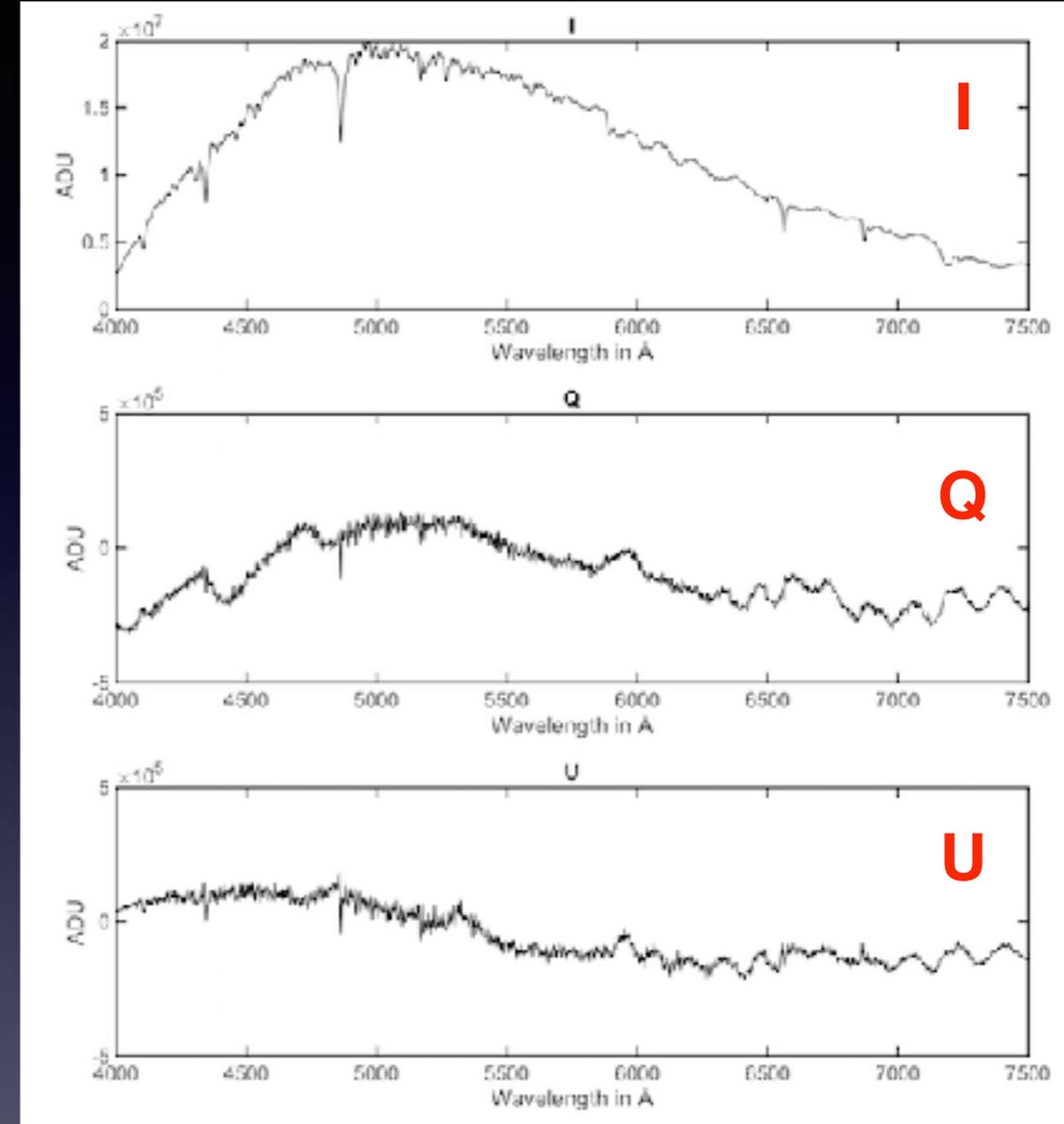


Acquisition de 4 spectres en tournant successivement le filtre polarisant (0°, 45°, 90°, 135°)

$$I = S1 + S3 = S2 + S4$$

$$Q = S1 - S3$$

$$U = S2 - S4$$



Le résultat :

Stokes I : le spectre en intensité classique

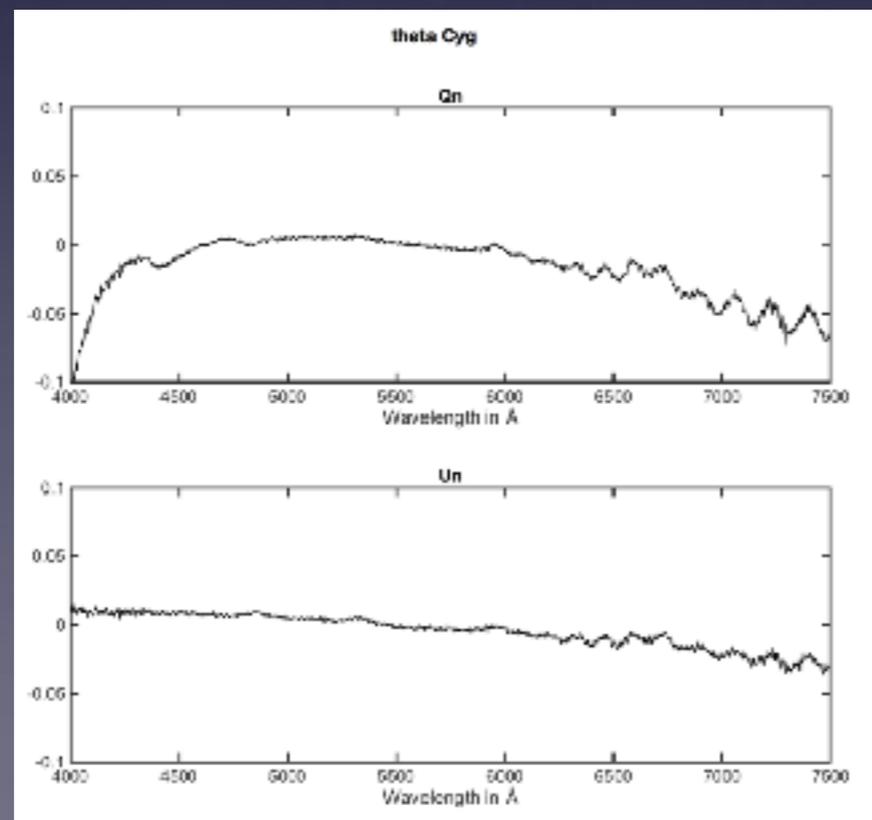
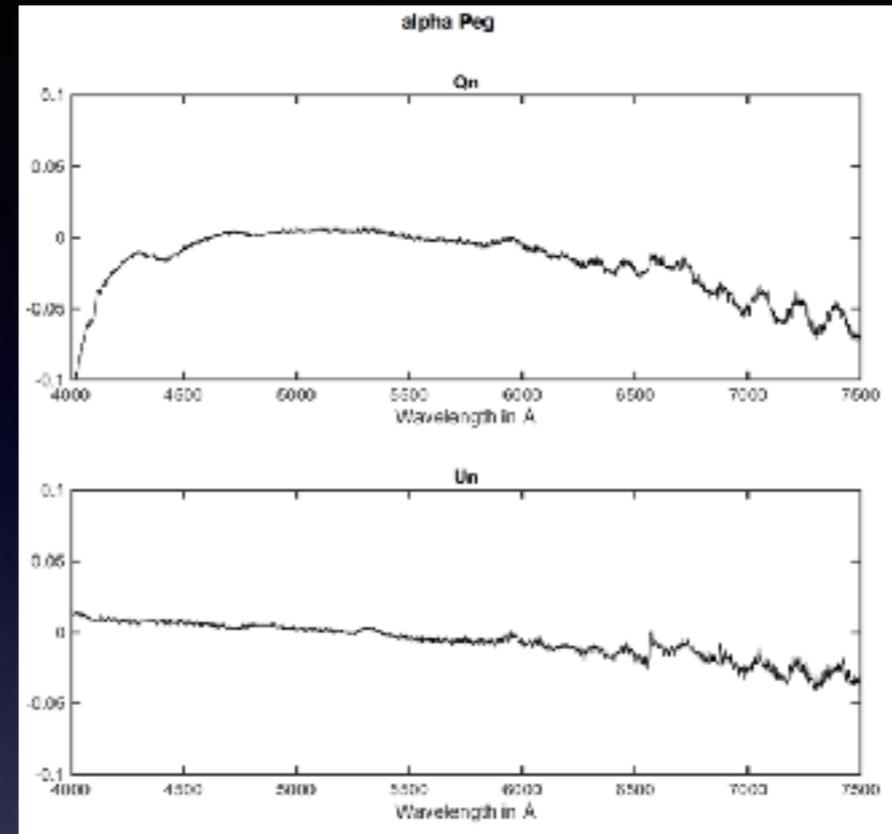
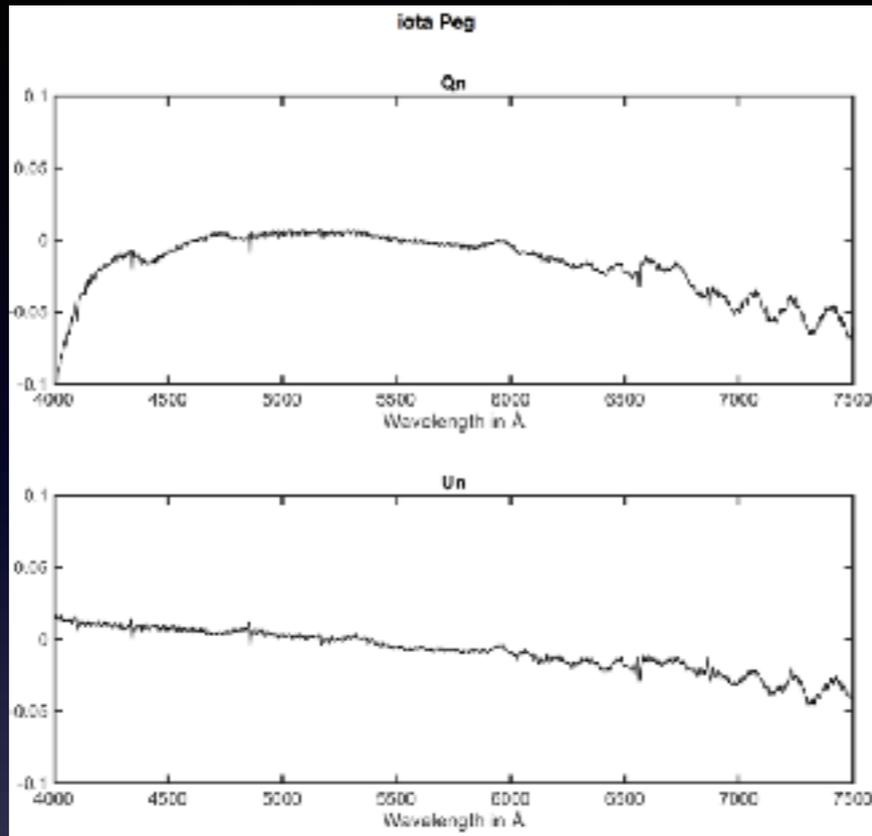
Stokes Q : le taux de polarisation axe vertical

Stokes U : le taux de polarisation axe à 45°

**Mise en évidence de la polarisation instrumentale**

# Spectro-polarimétrie

Observation d'une séquence d'étoiles non polarisées



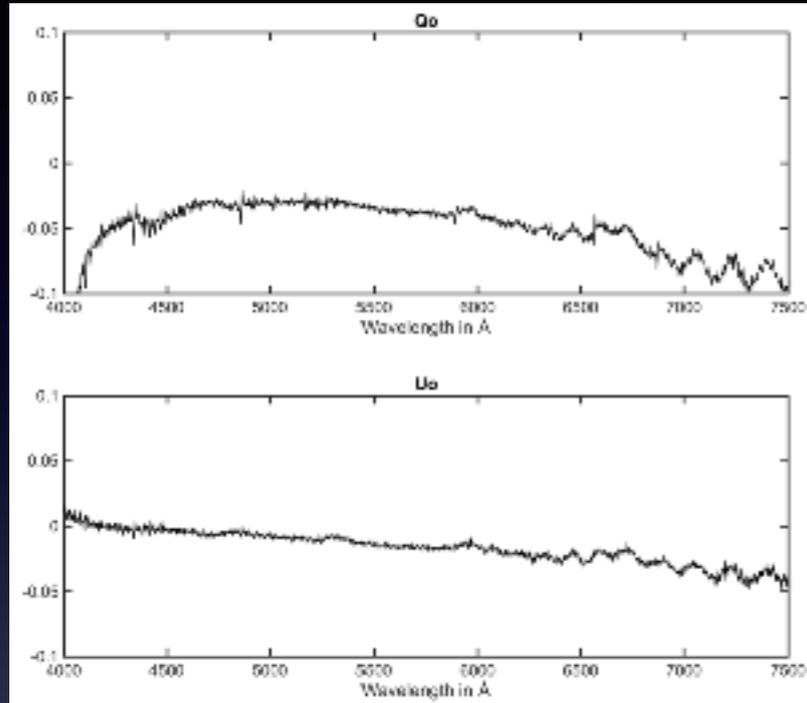
Calcul des paramètres de Stokes normalisés  
( $Q_n = Q / I$ ,  $U_n = U / I$ )

**Moyenne des résultats : la signature polarimétrie de l'instrument (étalonnage)**

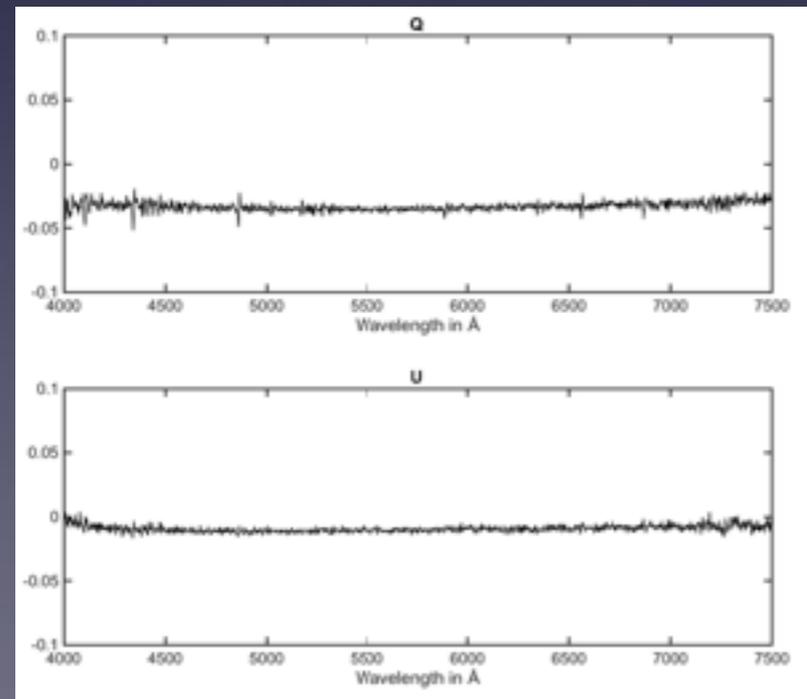
Précision absolue constatée sur le taux ( $p$ ) : 0,05%  
Télescope RC10, spectrographe LISA, caméra ASI183MM  
Filtres polarisant : lunettes de cinéma 3D (!)

# Spectro-polarimétrie

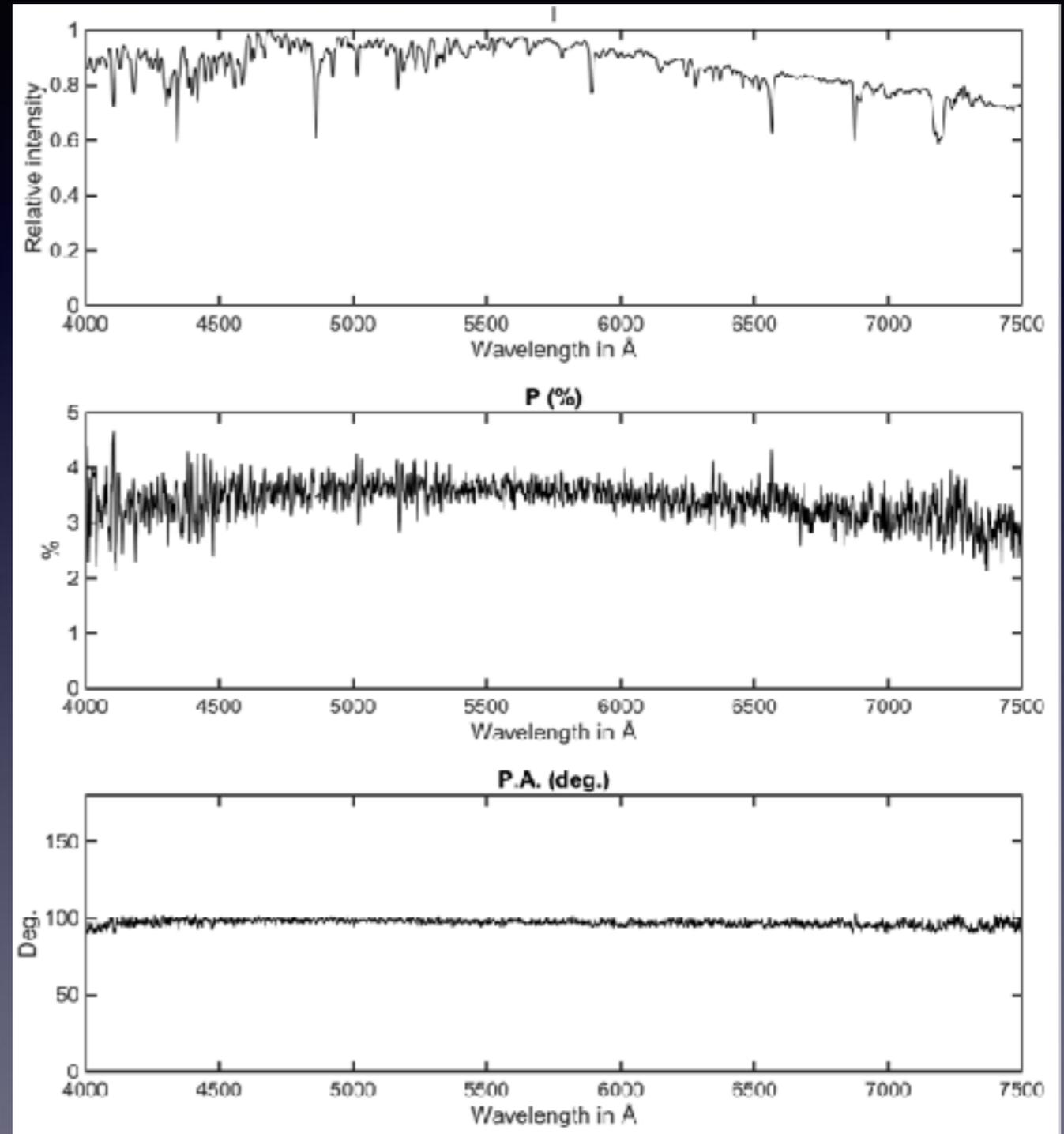
Observation d'une étoile polarisée : phi Cas  
Standard polarimétrique :  $p = 3,3\%$ ,  $\theta = 91^\circ$



Avant soustraction de la polarisation instrumentale



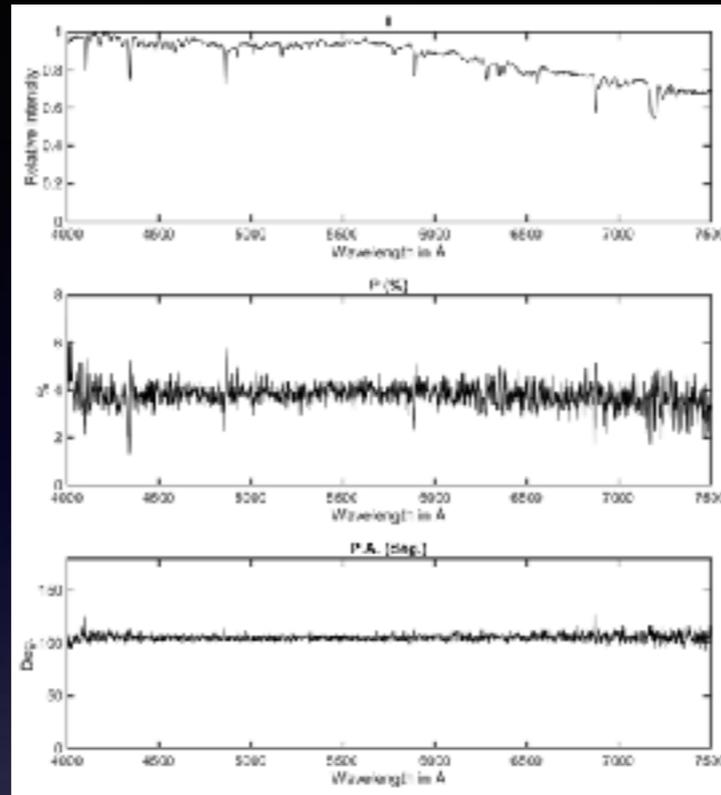
Après soustraction de la polarisation instrumentale



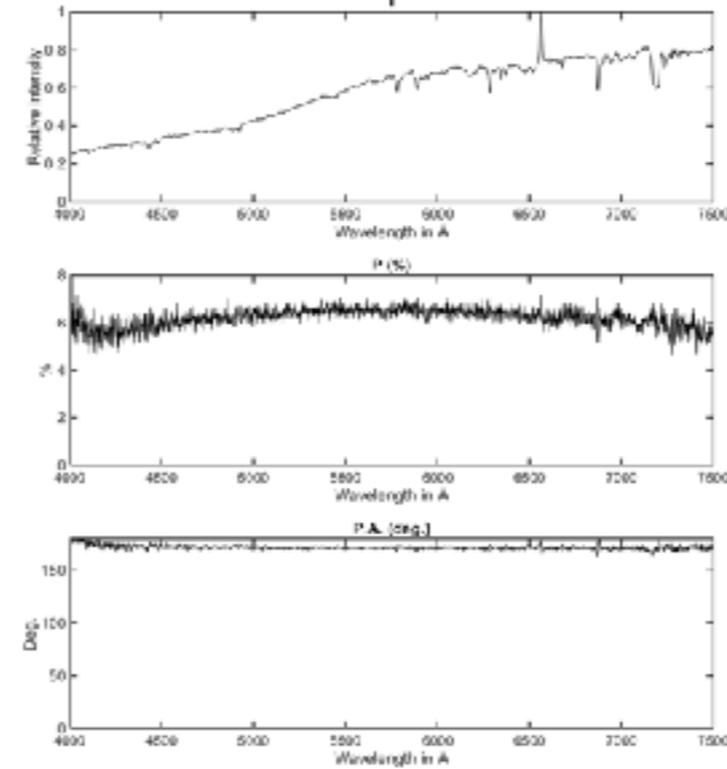
Taux et angle de polarisation mesurés  
(24 minutes d'observation pour une étoile de magnitude  $V = 5,0$ )

# Spectro-polarimétrie

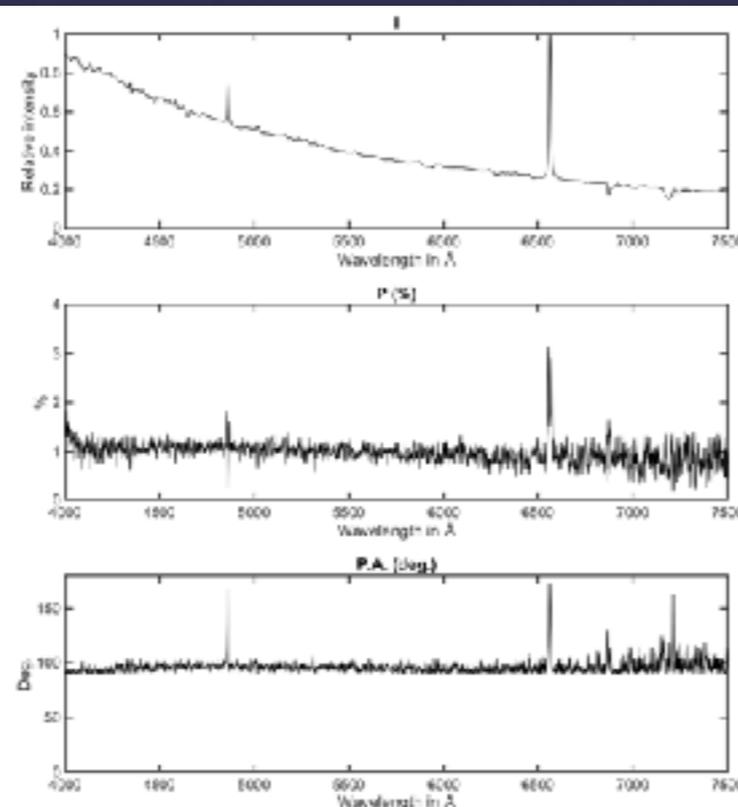
Quelques exemples...



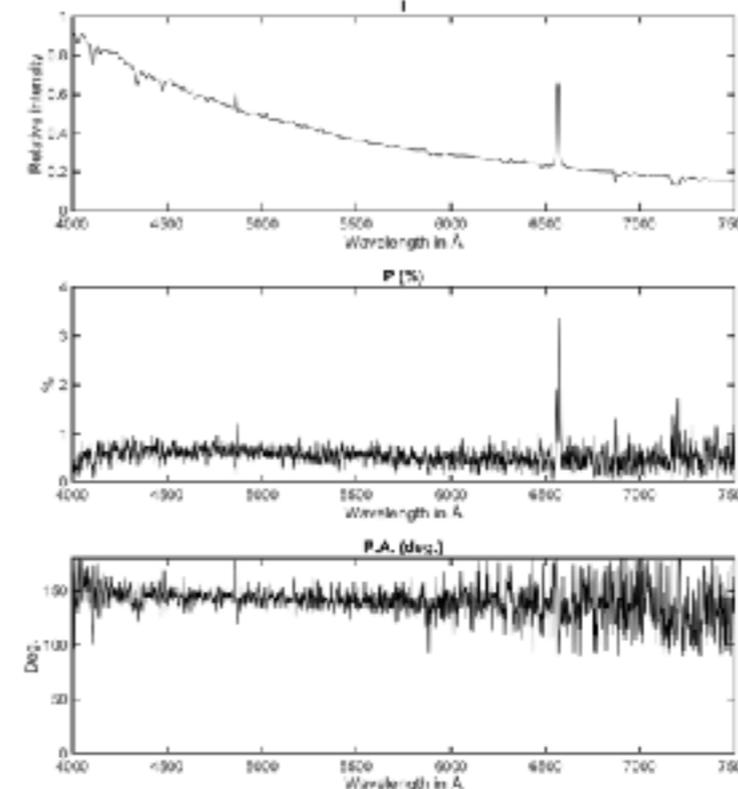
HD 14433



HD 183143



gamma Cas



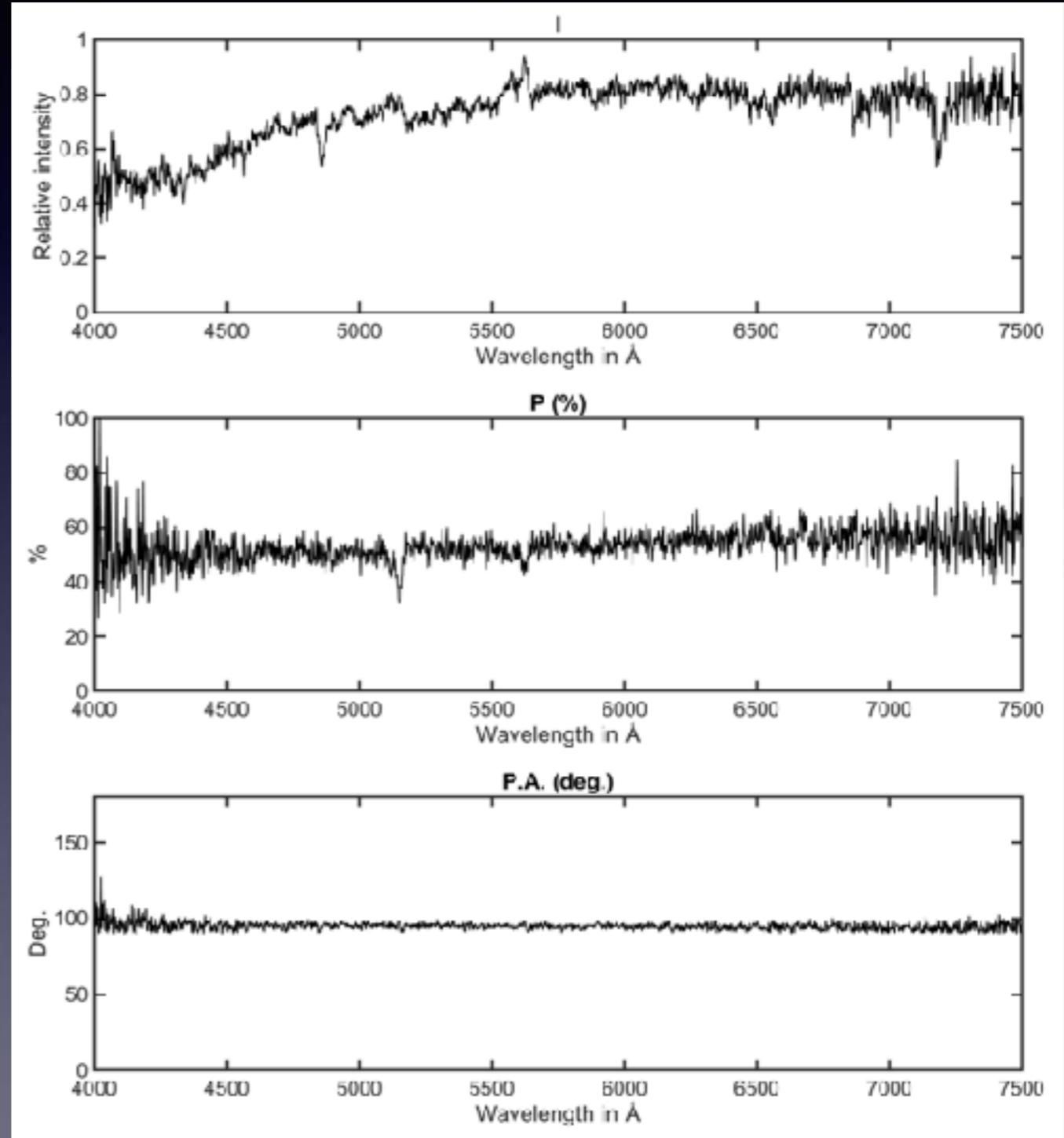
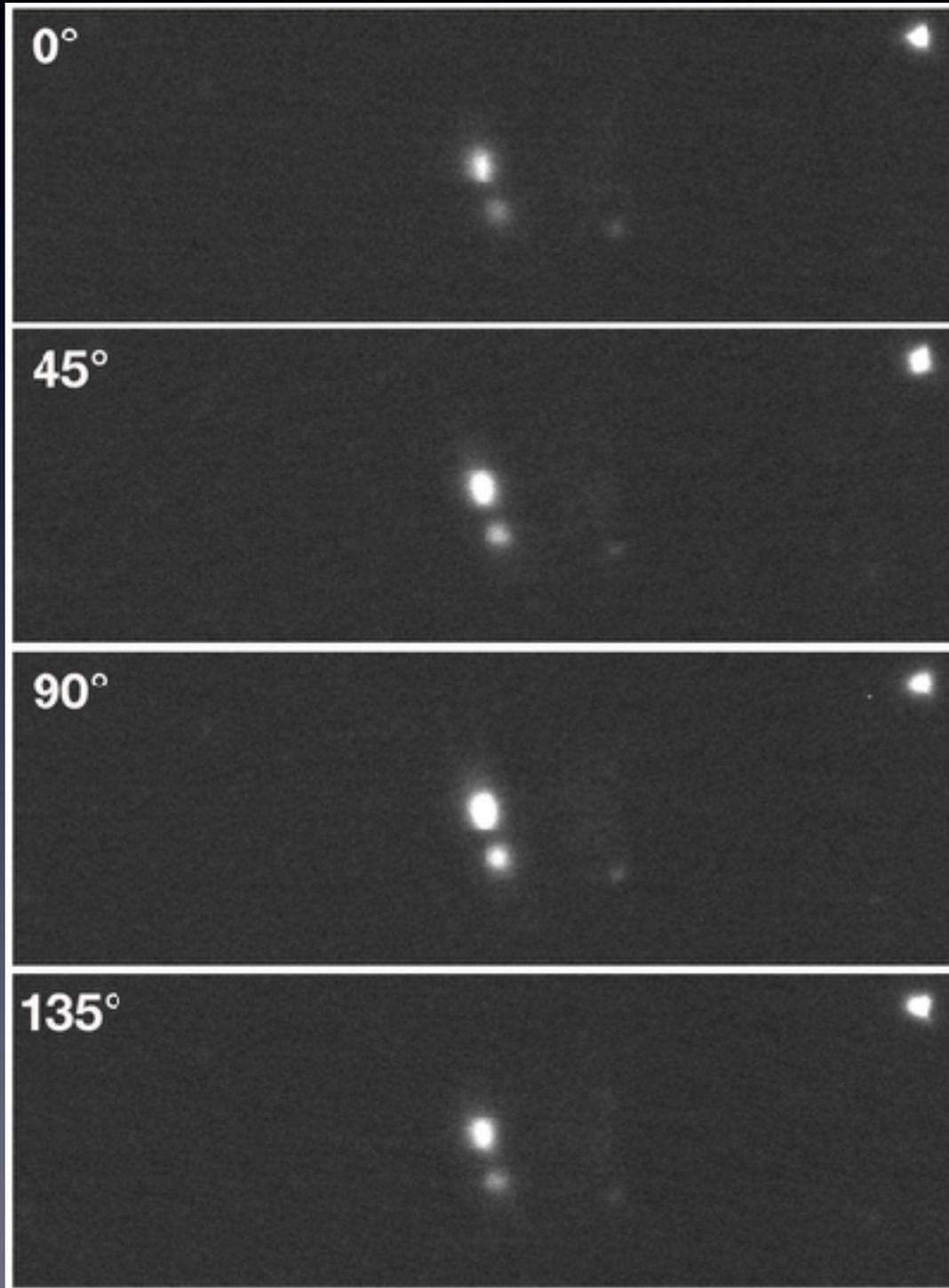
phi Per

# Spectro-polarimétrie

Proto étoile (AGB) CL 2688

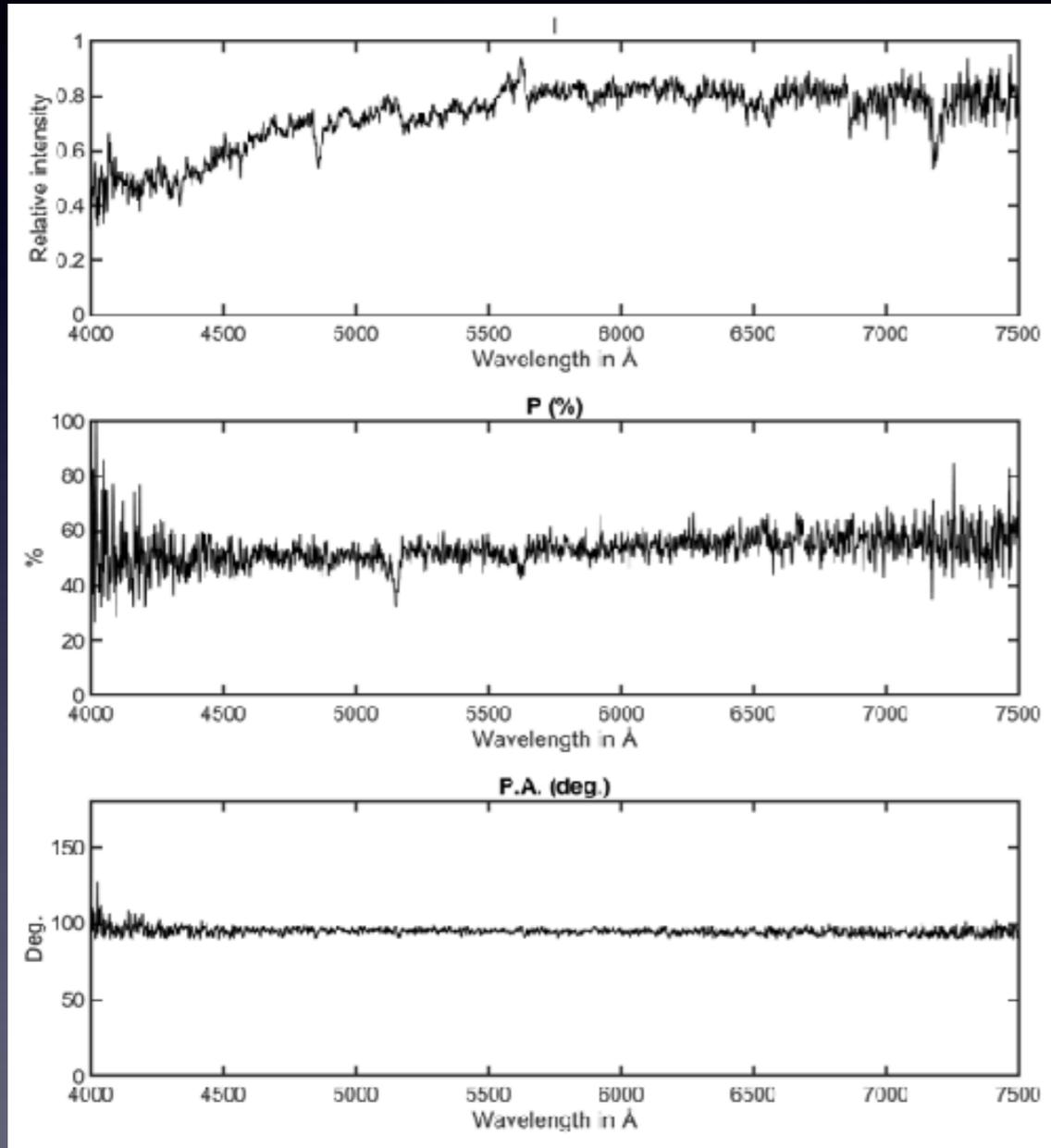
L'étoile elle-même est invisible au centre de la nébuleuse bipolaire

*Le taux de polarisation atteint 50%*

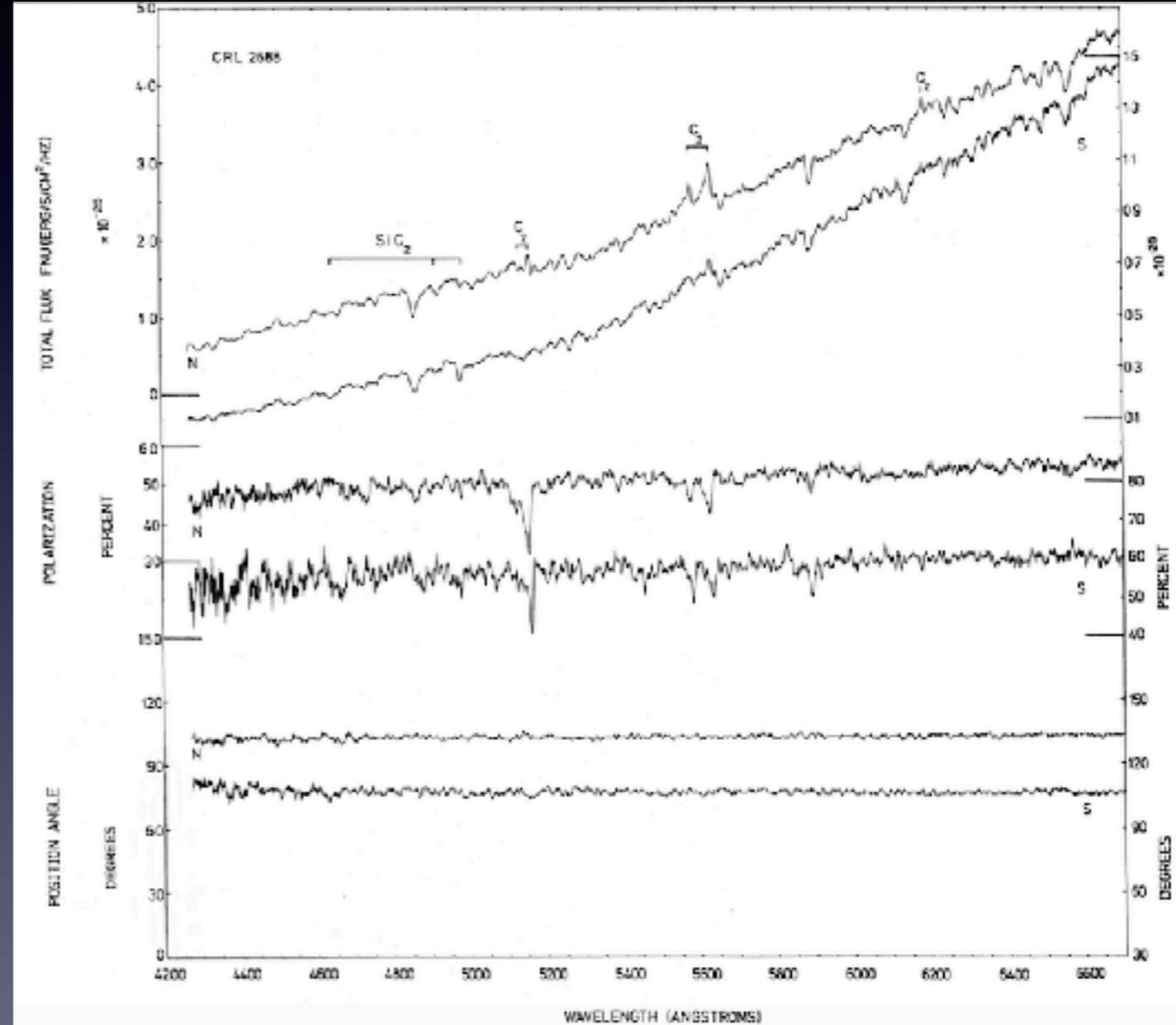


# Spectro-polarimétrie

## CL 2688 (Egg nebula)



Observation actuelle (0.25 m télescope, RC10)  
Détection de la polarisation des bandes de Swan (C2) à 5165 Å et 5636 Å

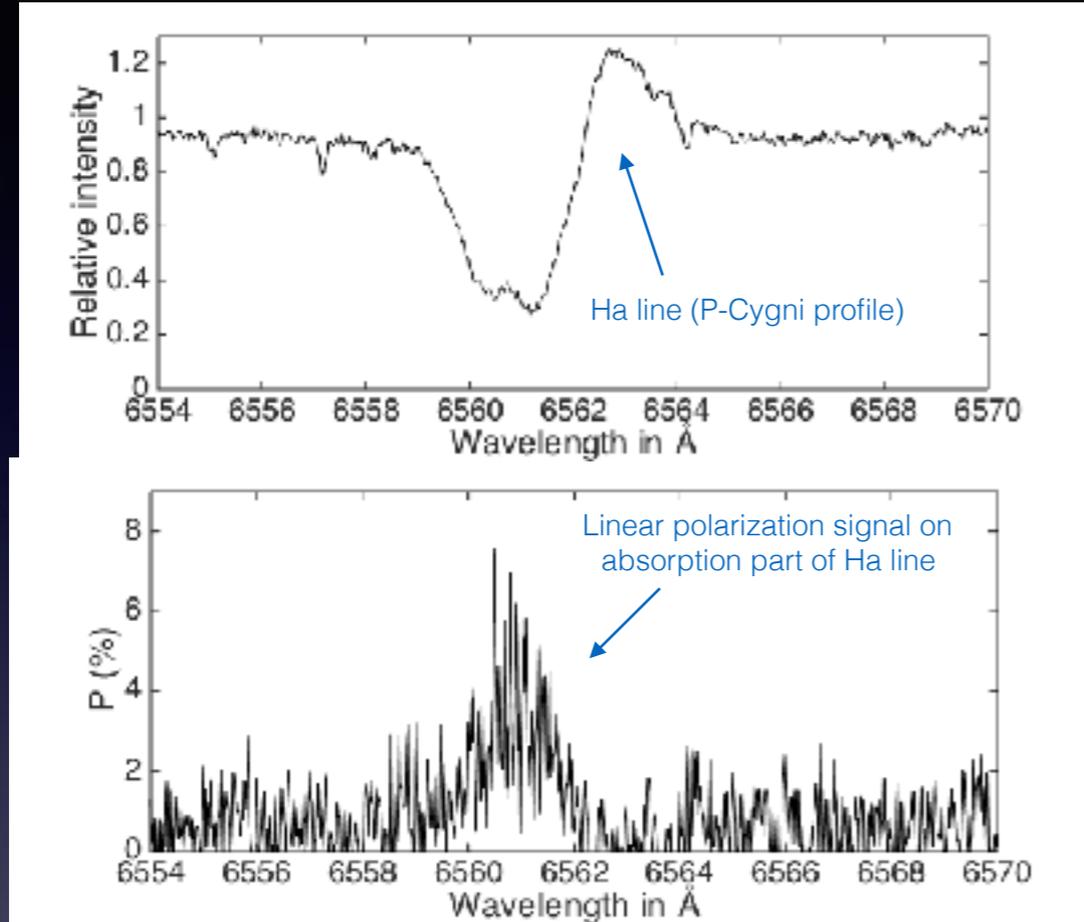


Résultat professionnel (3.0 m télescope - Lick observatory)  
D'après M. Cohen et L. Chui, *Astrophysical Journal*, 213, 79-92, 1977

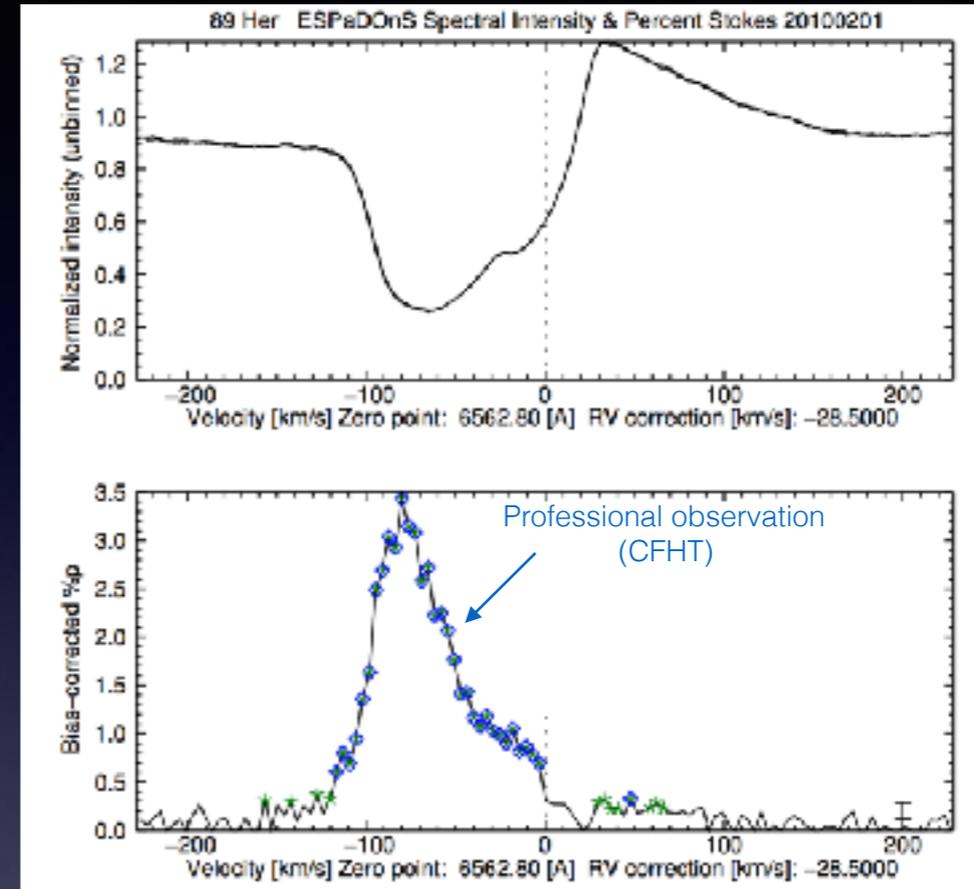
# Spectro-polarimétrie

Etoile post-AGB 89 Her - Observation à très haute résolution (R=50 000, VHIRES-MO)

89 Her VHIRES-MO spectrograph - Castanet observatory (09/04/2017)

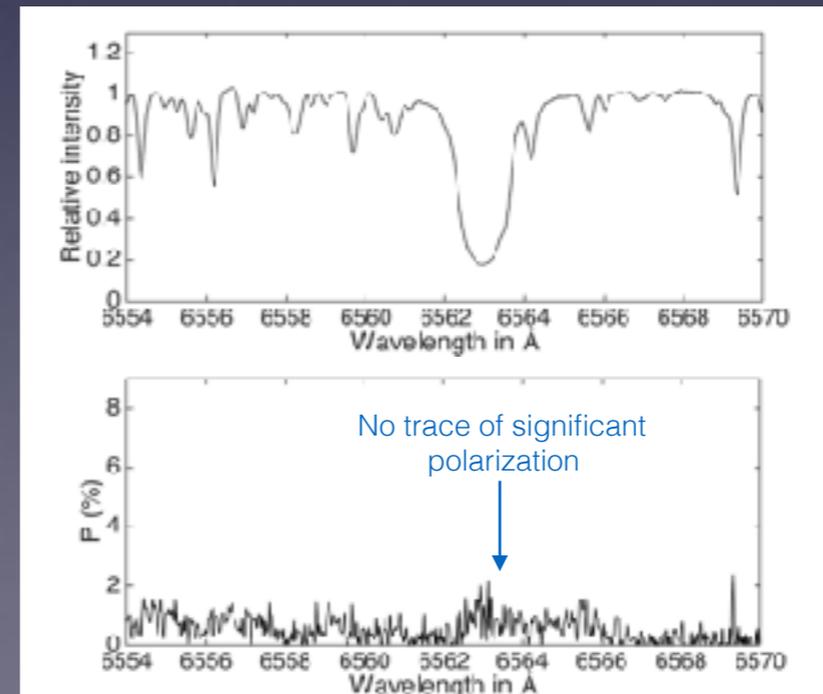


ESPaDOnS spectrograph (from K. M. Geese 2015 these about Eps Aur)



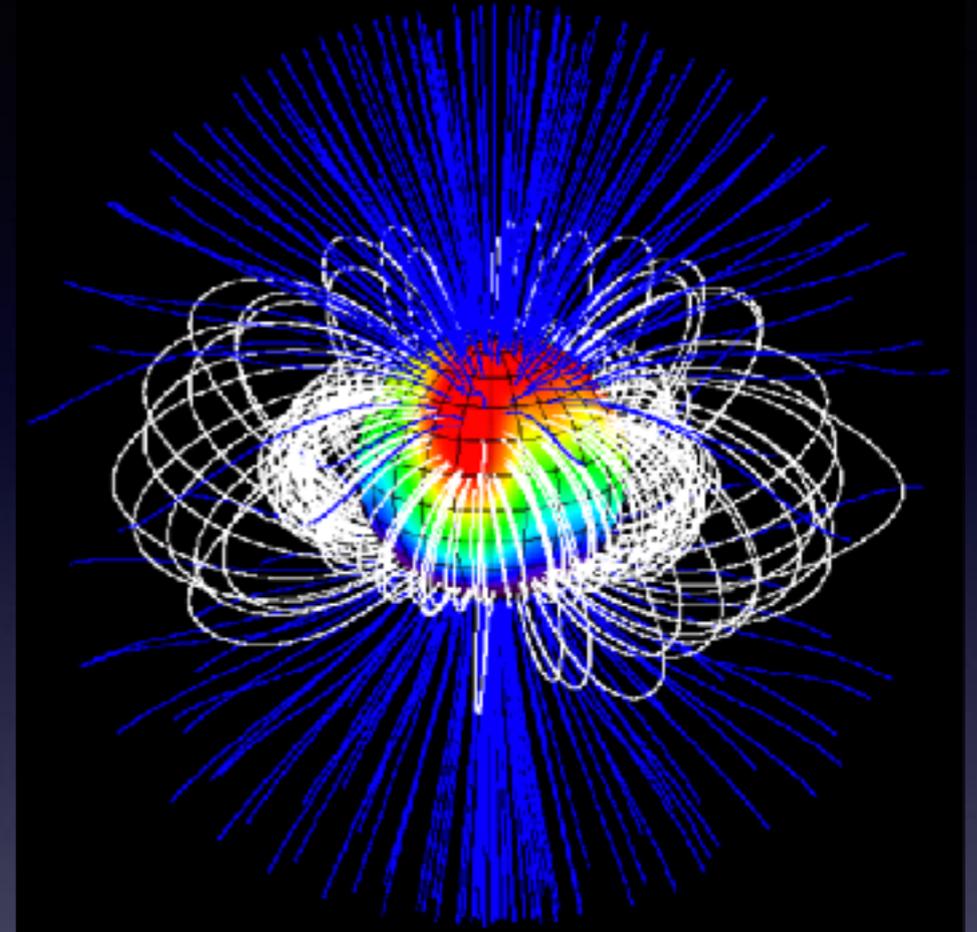
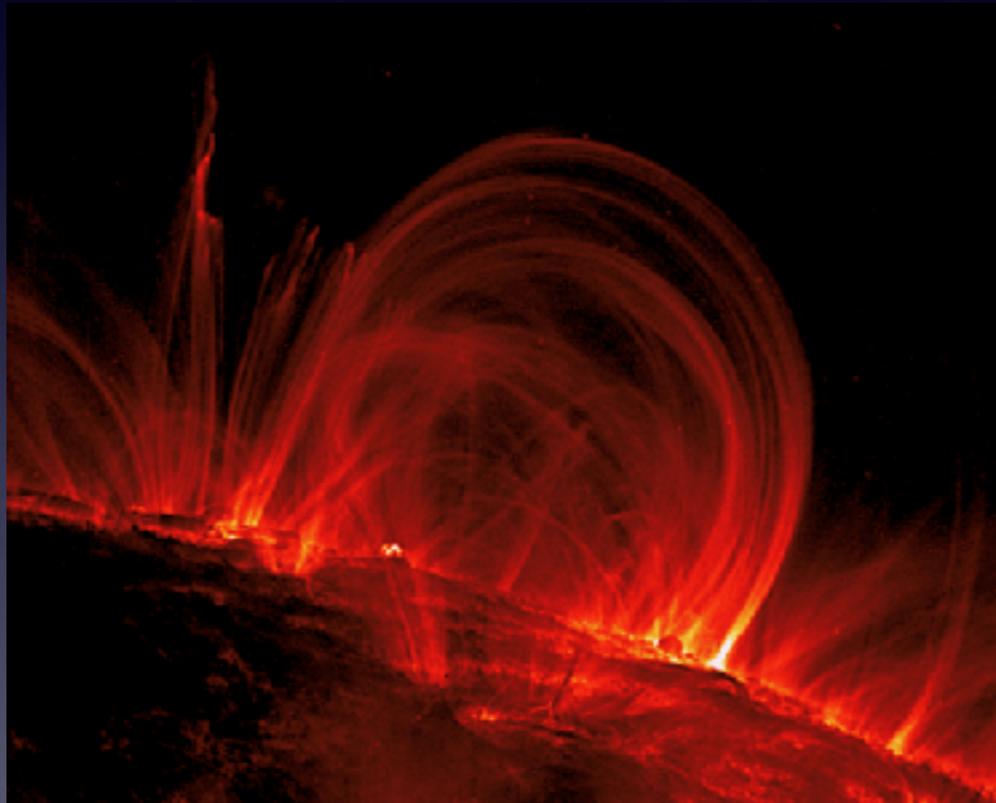
Percent of linear polarization light  
Polarisation de la raie H $\alpha$

Preuve (absence de polarisation instrumentale)  
Observation de l'étoile non polarisée alpha UMa  
(K0I ab)

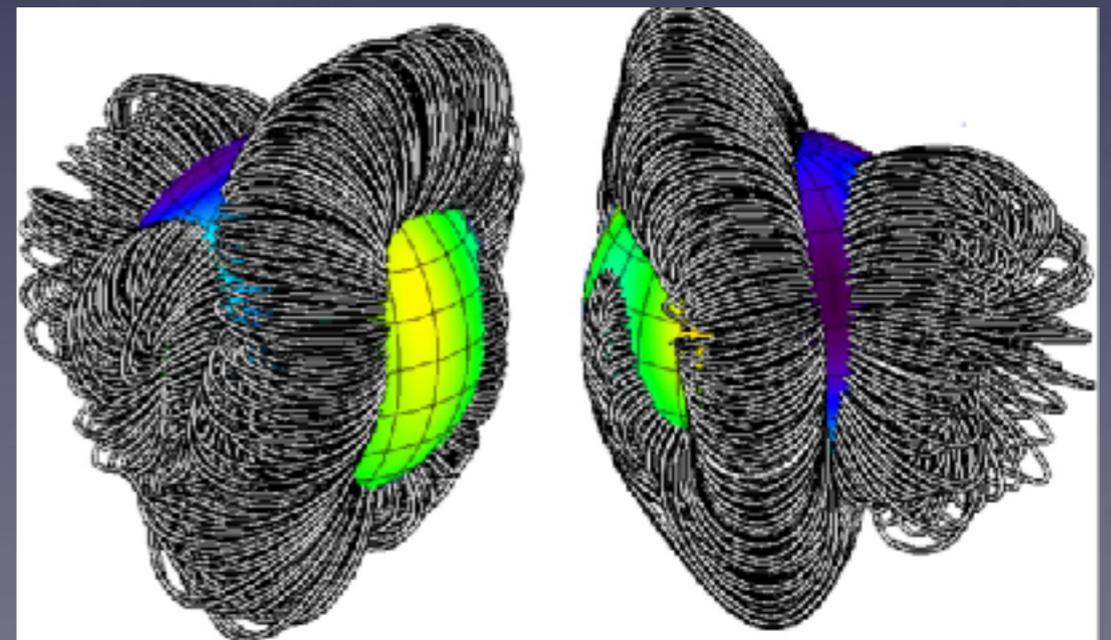


# Spectro-polarimétrie

## Le champ magnétique des étoiles



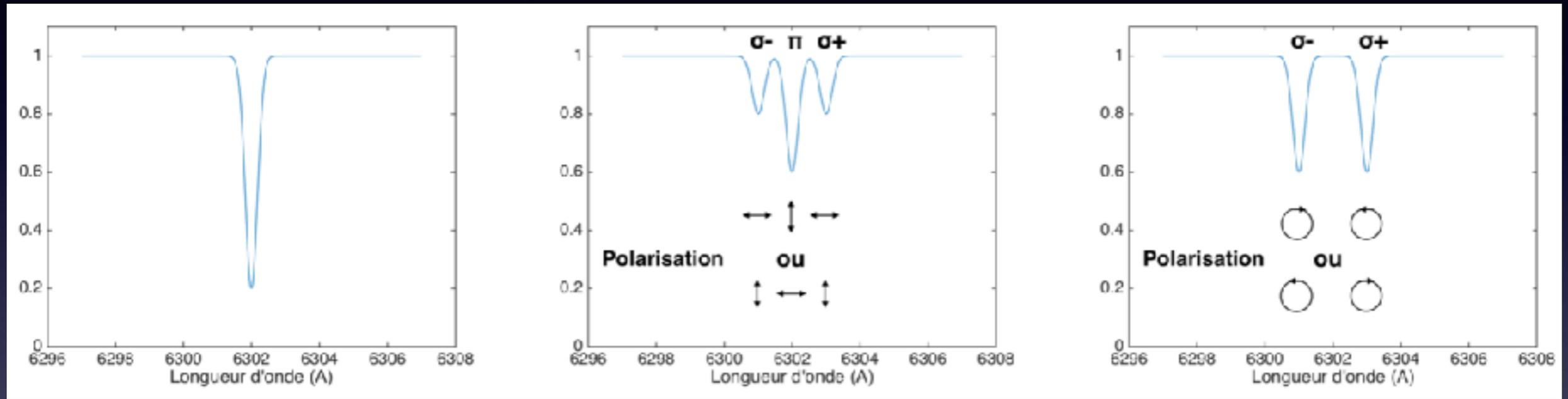
Champ fossile  
Champ dynamo



# Spectro-polarimétrie

## L'observation du champ magnétique des étoiles

L'effet Zeeman :



Profil spectral en intensité  
(pas de champ magnétique)

Séparation des raies en présence  
d'un champ magnétique transverse

Séparation des raies en présence  
d'un champ magnétique longitudinal



Les raies sont polarisées circulairement  
avec un sens de rotation inverse. La  
séparation de composantes est  
proportionnelle au champ

**C'est ce que nous allons observer**

# Spectro-polarimétrie

## Champ magnétique : de la difficulté de la mesure

Séparation des composantes (champ longitudinal) :  $\Delta\lambda = 4,67 \times 10^{-13} g \lambda^2 B_{//}$

$g$  = facteur de Landé (dépend des raies,  $g_{\max} = 3$ )

$\lambda$  = longueur d'onde des raies (en angstroms)

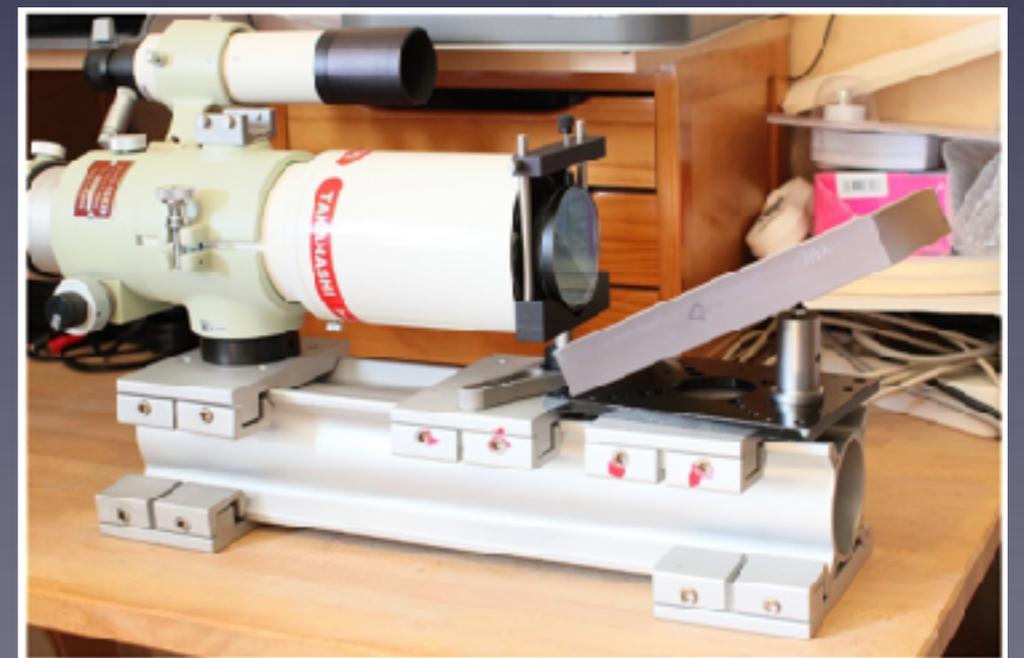
$B_{//}$  = force du champ magnétique longitudinal (en Gauss)

Exemple : raie du fer à 6302.5 Å,  $g = 2.49$ ,  $G = 3000$  Gauss (centre actif solaire) -  $\rightarrow \Delta\lambda = 0,14$  Å  
Une séparation directe implique un pouvoir de résolution de  $R = \lambda / \Delta\lambda = 6302.5 / 0.14 = 45\ 000\dots$

**Séparation physique des composantes techniquement difficile + élargissement naturel supérieur (élargissement Doppler induit par rotation de l'étoile sur elle même...)**

La stratégie : profiter de la polarisation des composantes pour faire des spectres distincts (isoler la polarisation circulaire gauche, puis droite) et étudier en différence ces deux spectres (différences de longueur d'onde, différence des profils = paramètre de Stokes V)

*Résolution spectrale supérieur à  $R=10\ 000$  si possible, très grande stabilité du spectrographe, très bon étalonnage : usage spectrographe échelle hautement recommandé (VHIRES, eShel...)*

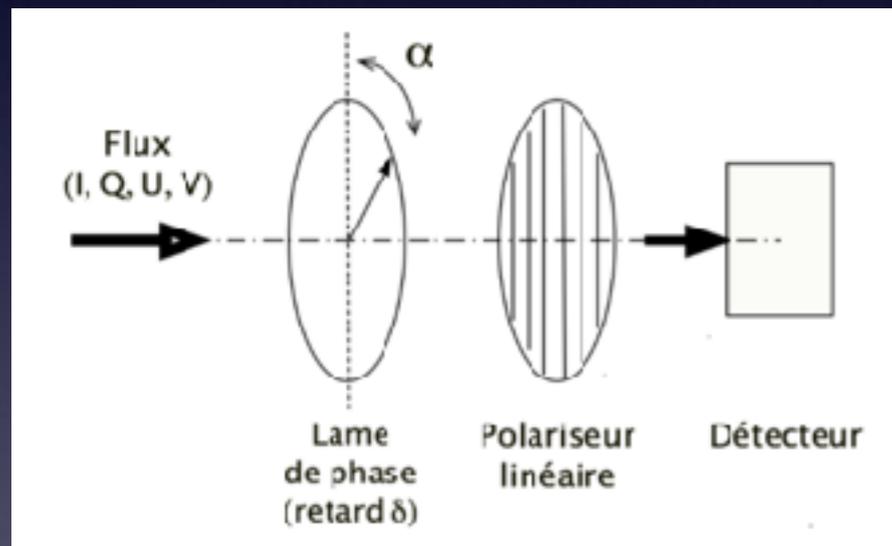


# Spectro-polarimétrie

## Mesure du champ magnétique des étoiles : en pratique

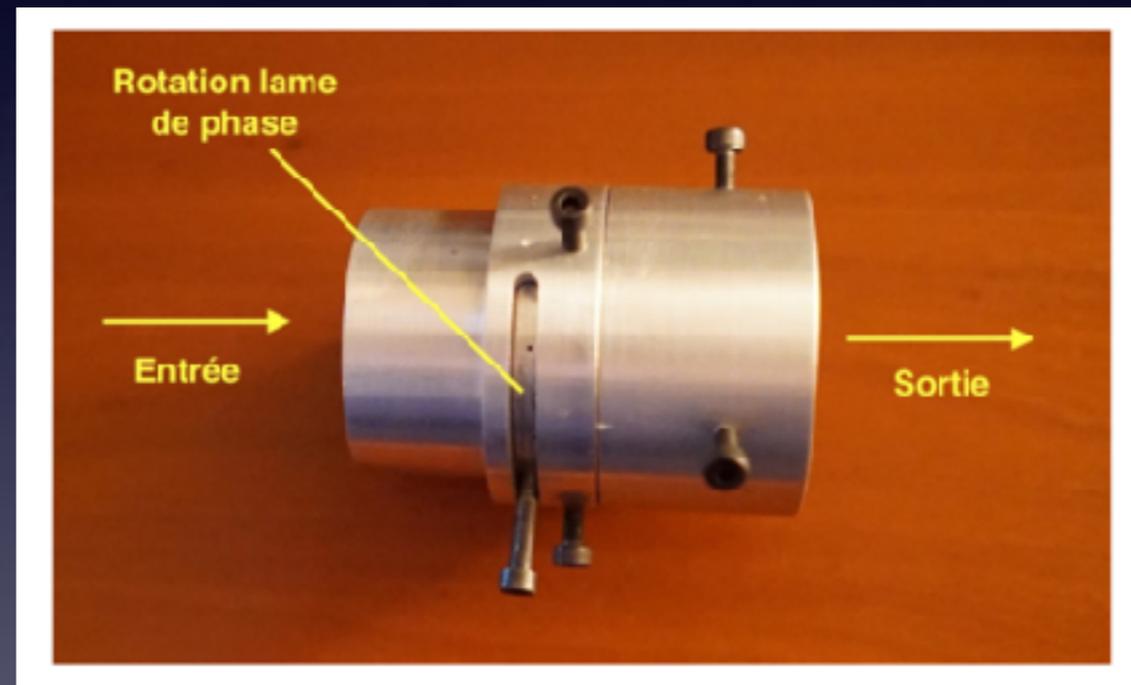
Il faut fabriquer un *polarimètre* sensible à la polarisation circulaire : un polariseur précédé d'une lame déphase quart-d'onde

(la polarisation circulaire de la lumière incidente est convertie en une polarisation rectiligne par la lame 1/4 d'onde, qui est ensuite analysée par le filtre polariseur)



En pivotant l'axe de la lame 1/4 d'onde de 90°, on isole soit la polarisation circulaire droite, soit la polarisation circulaire gauche :

$$I' = 1/2 [I \pm V]$$



Exemple de réalisation d'un polarimètre (le filtre déphasant et le filtre polariseur ne coutent que quelques dizaines d'euros au catalogue Edmund)  
*Conception : Daniel Verihac*

Nota : polariseur linéaire (analyseur) est fixe par rapport au spectrographe, ce qui réduit beaucoup la instrumentale

# Spectro-polarimétrie

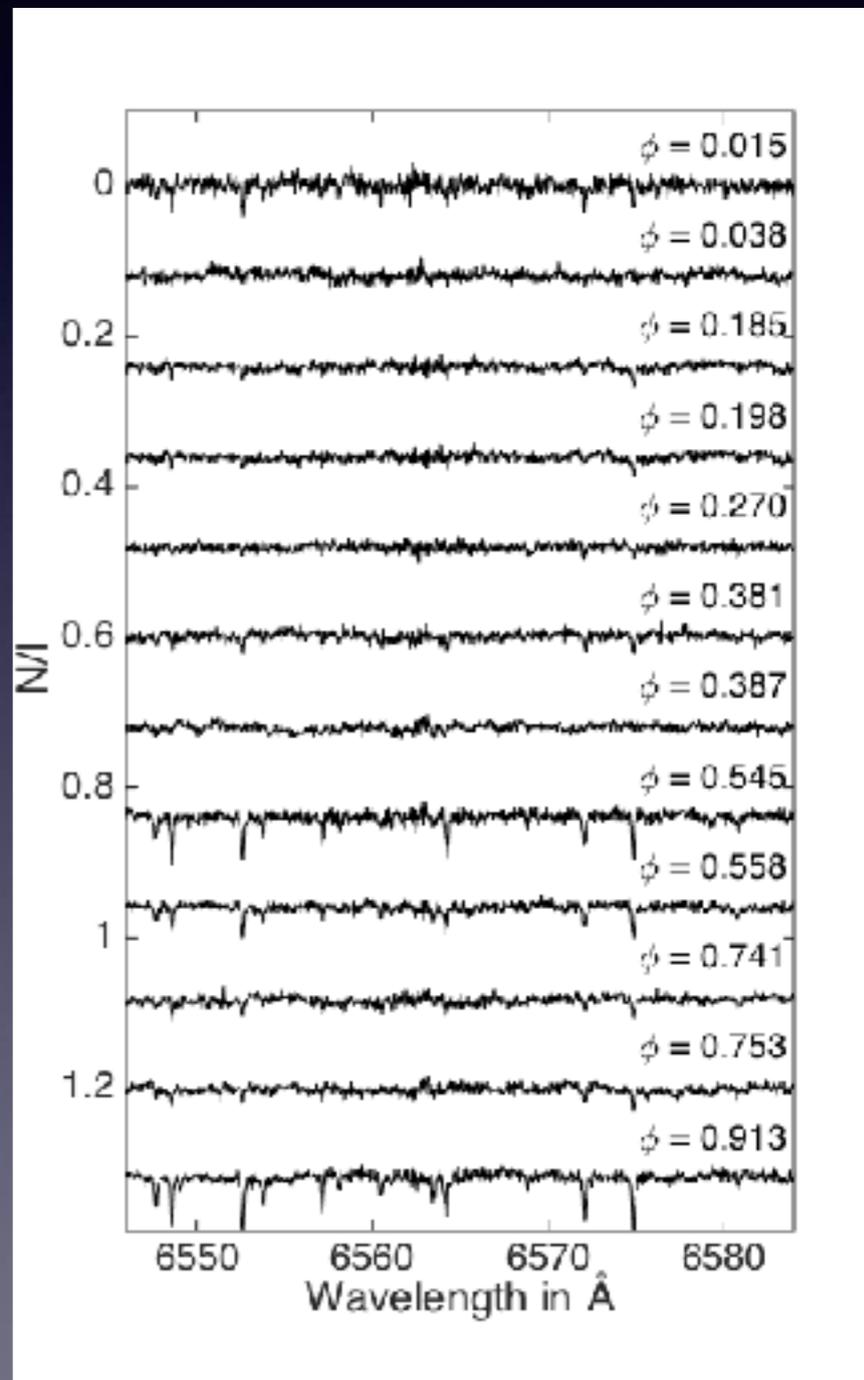
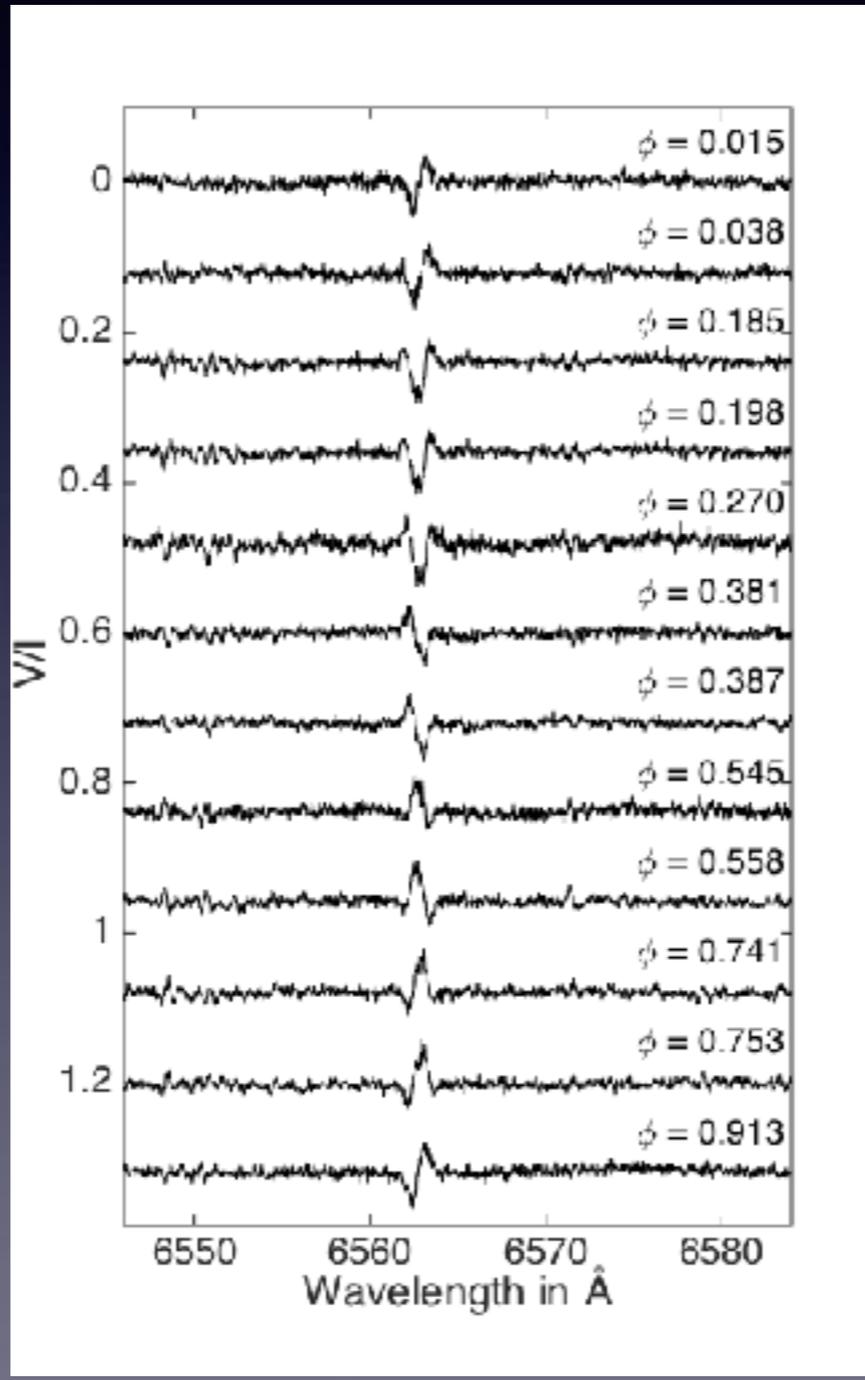
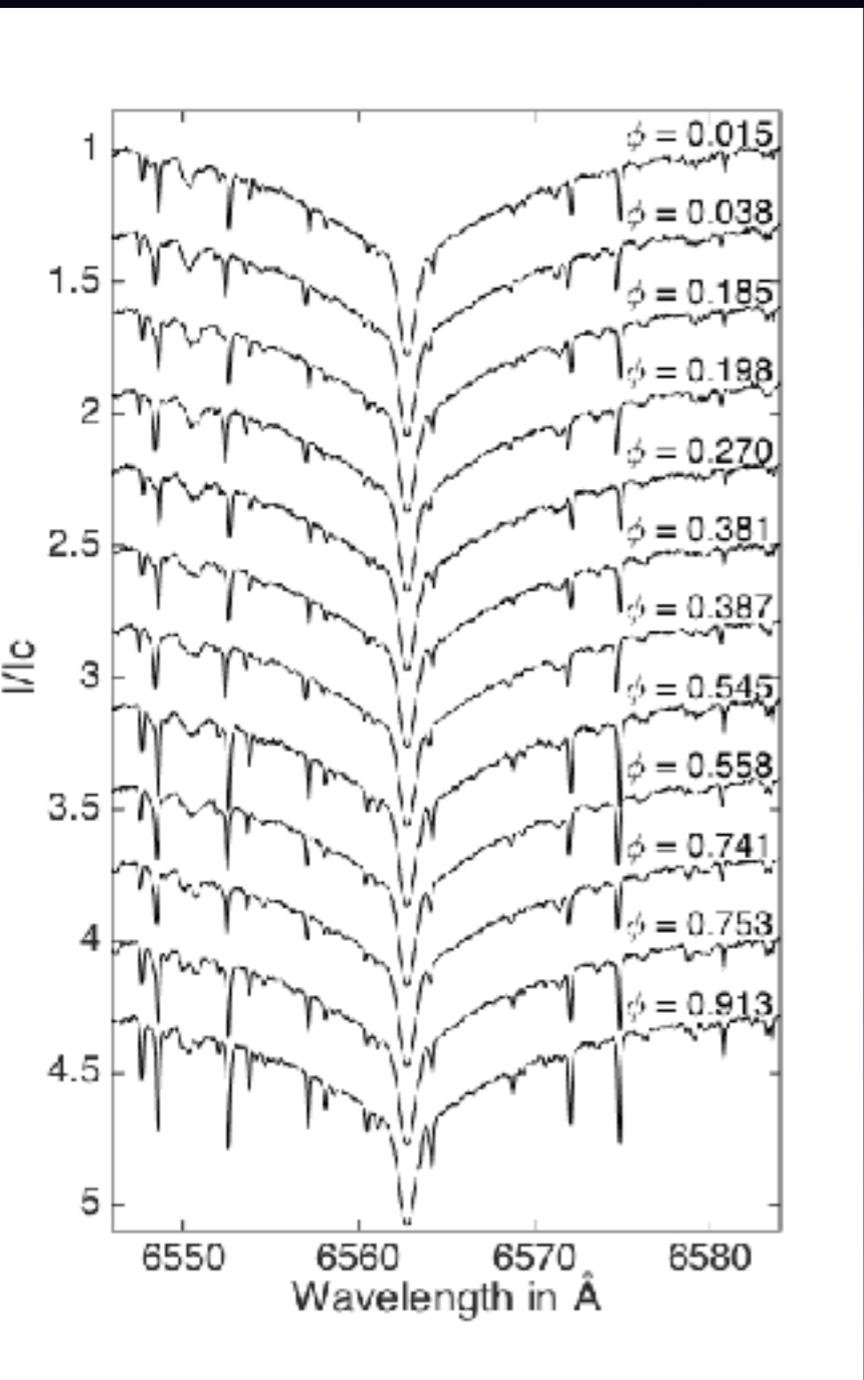
$$\frac{V(\lambda)}{I(\lambda)} = \frac{I_L(\lambda) - I_R(\lambda)}{I_L(\lambda) + I_R(\lambda)}$$

$$\frac{V(\lambda)}{I(\lambda)} = \frac{[I_L(\lambda) - I_R(\lambda)] + [I_{L'}(\lambda) - I_{R'}(\lambda)]}{I_L(\lambda) + I_R(\lambda) + I_{L'}(\lambda) + I_{R'}(\lambda)}$$

$$\frac{N(\lambda)}{I(\lambda)} = \frac{[I_L(\lambda) - I_{L'}(\lambda)] + [I_R(\lambda) - I_{R'}(\lambda)]}{I_L(\lambda) + I_R(\lambda) + I_{L'}(\lambda) + I_{R'}(\lambda)}$$

Exemple : l'étoile magnétique alpha2 CVn  
(Cor Corali) - période de rotation : 5,5 jours  
VHIRES-MO + C11

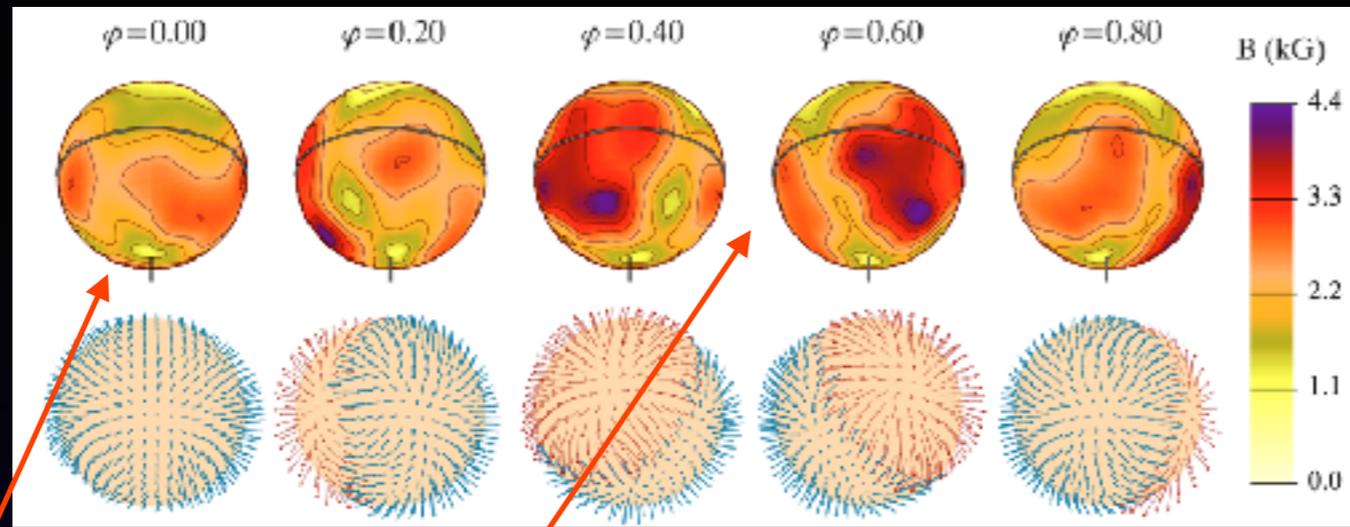
Interlacement LRR'L' = évaluation de l'erreur de mesure (« null polarization »)



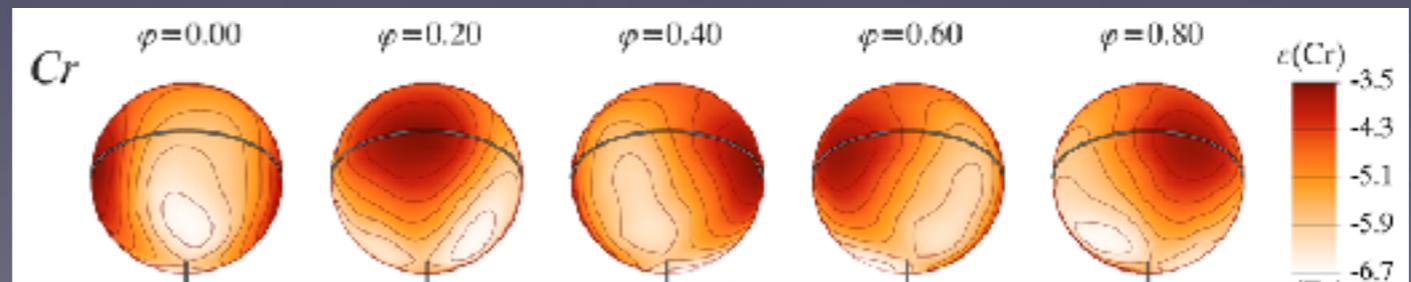
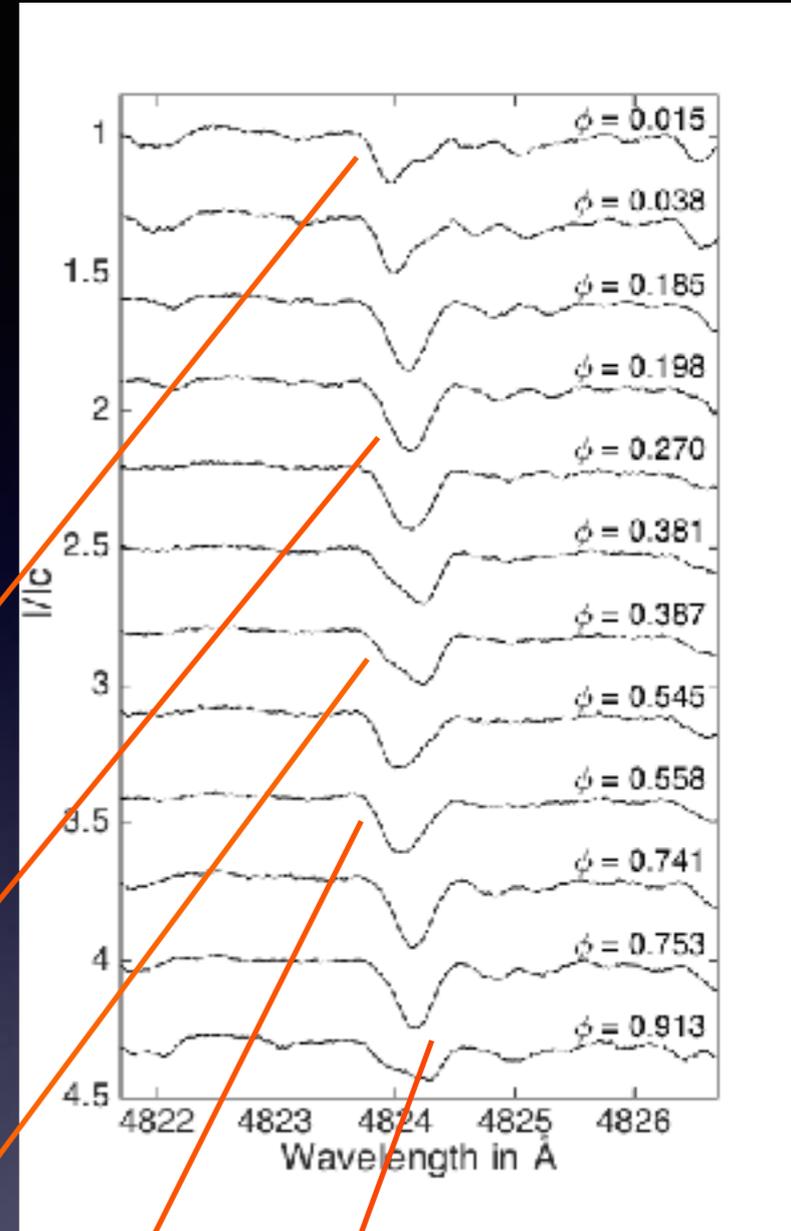
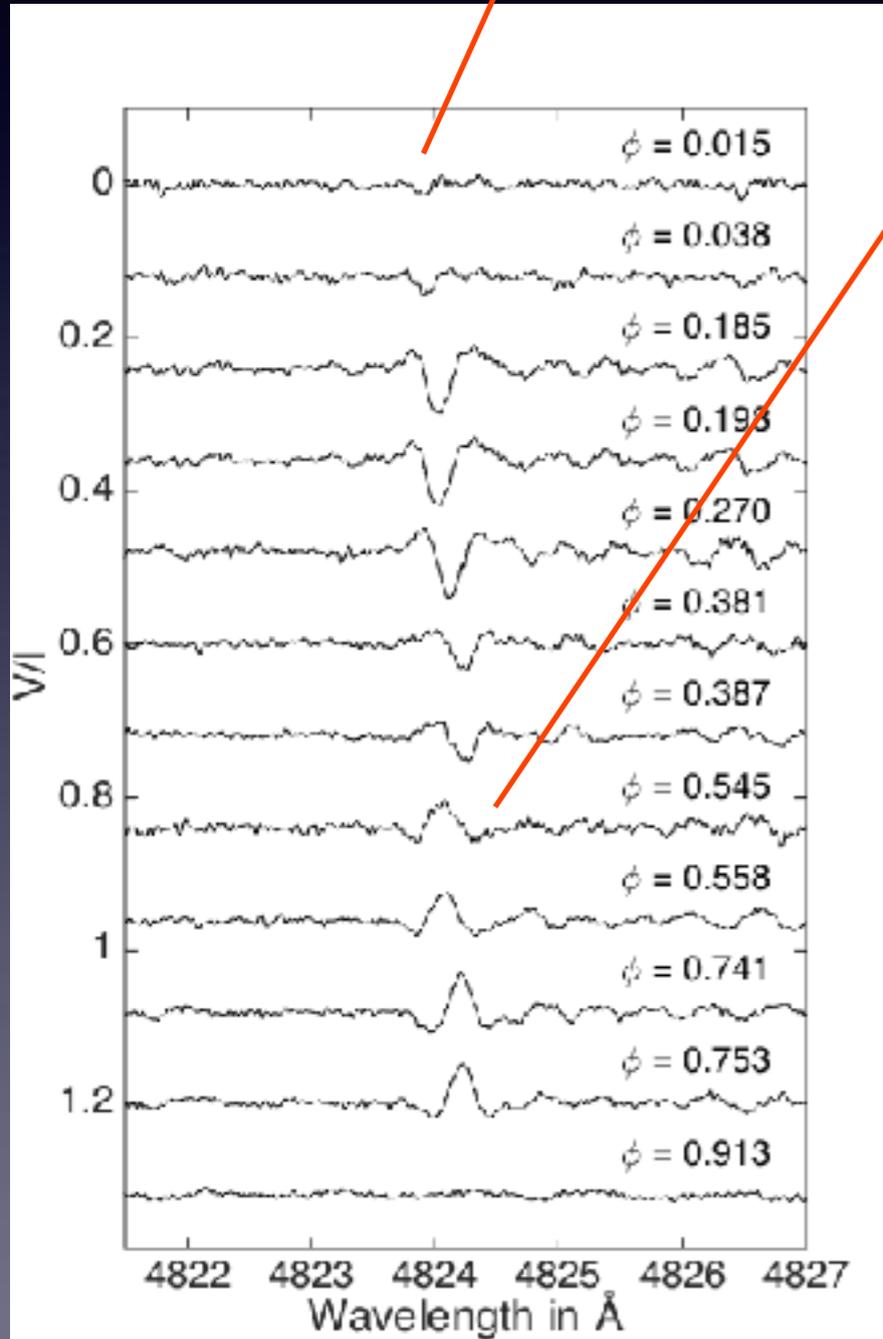
# alpha2 CVn

Raie du chrome  $\lambda 4824$

Champ moyen longitudinal minimal



Champ moyen apparent longitudinal maximal



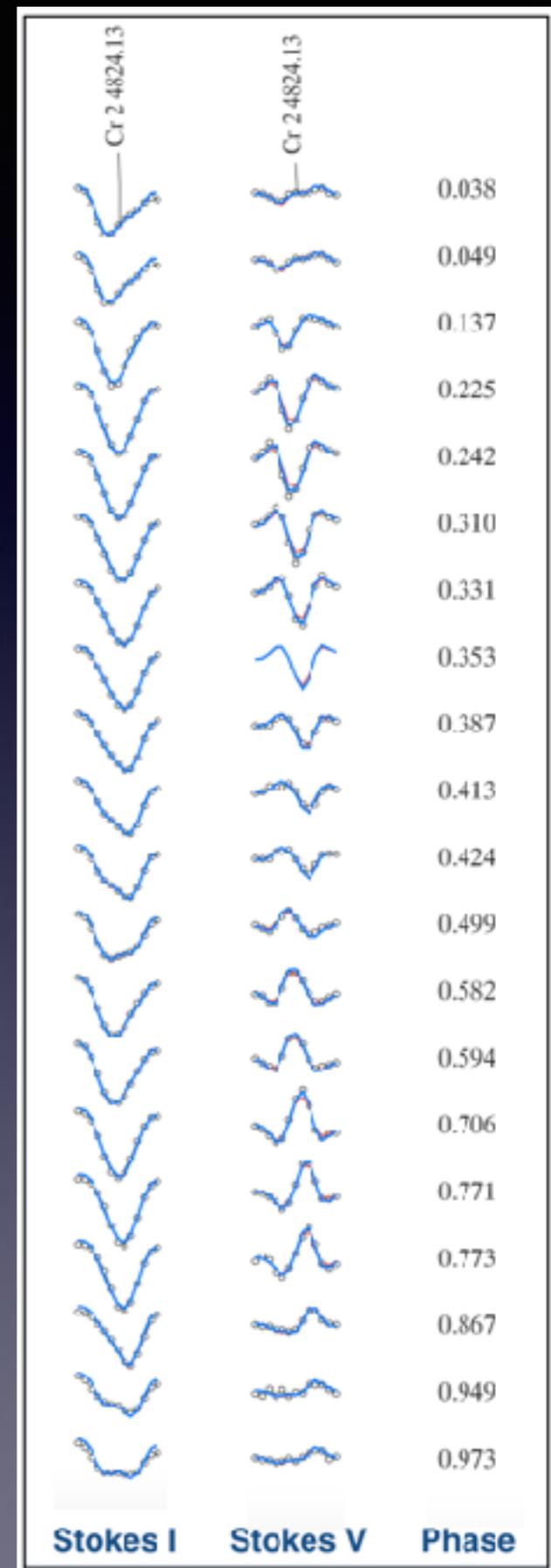
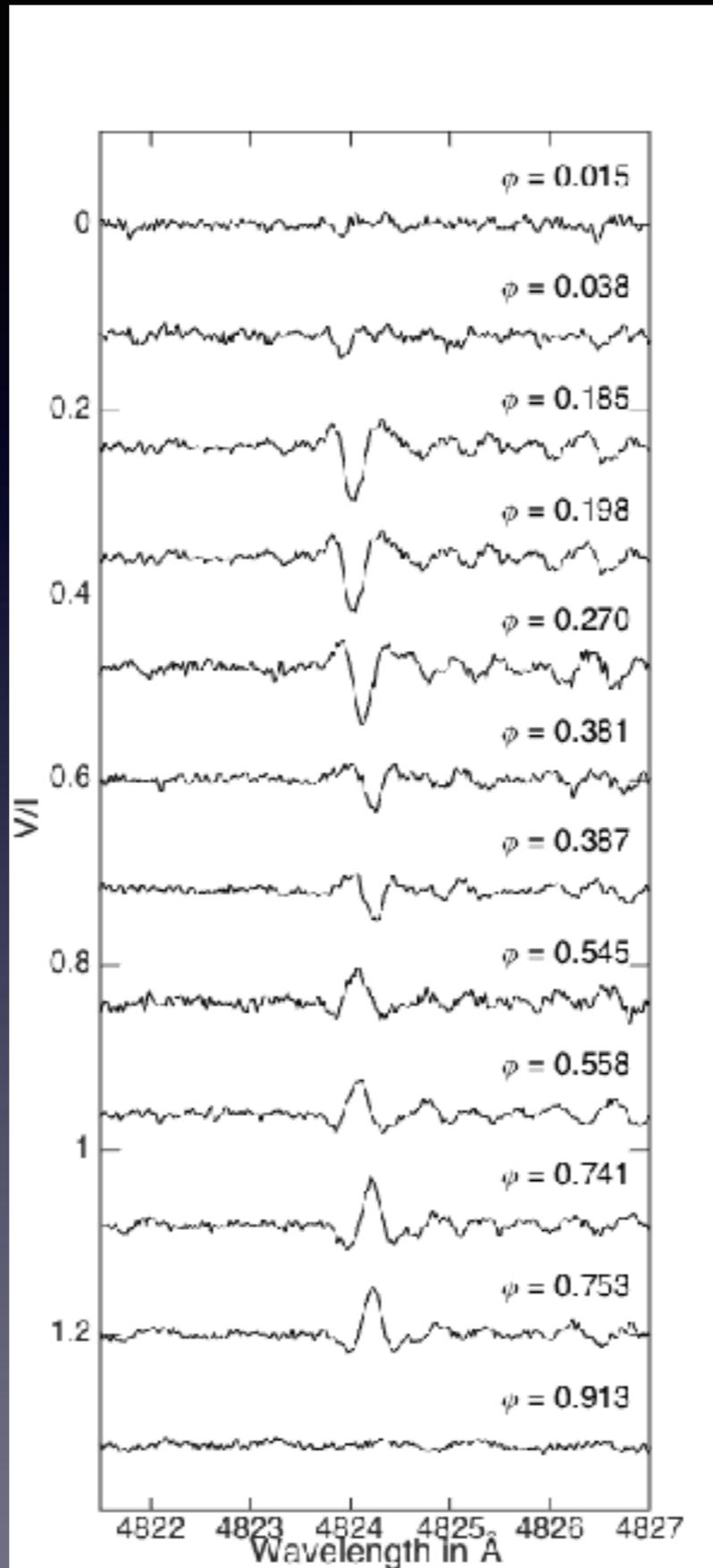
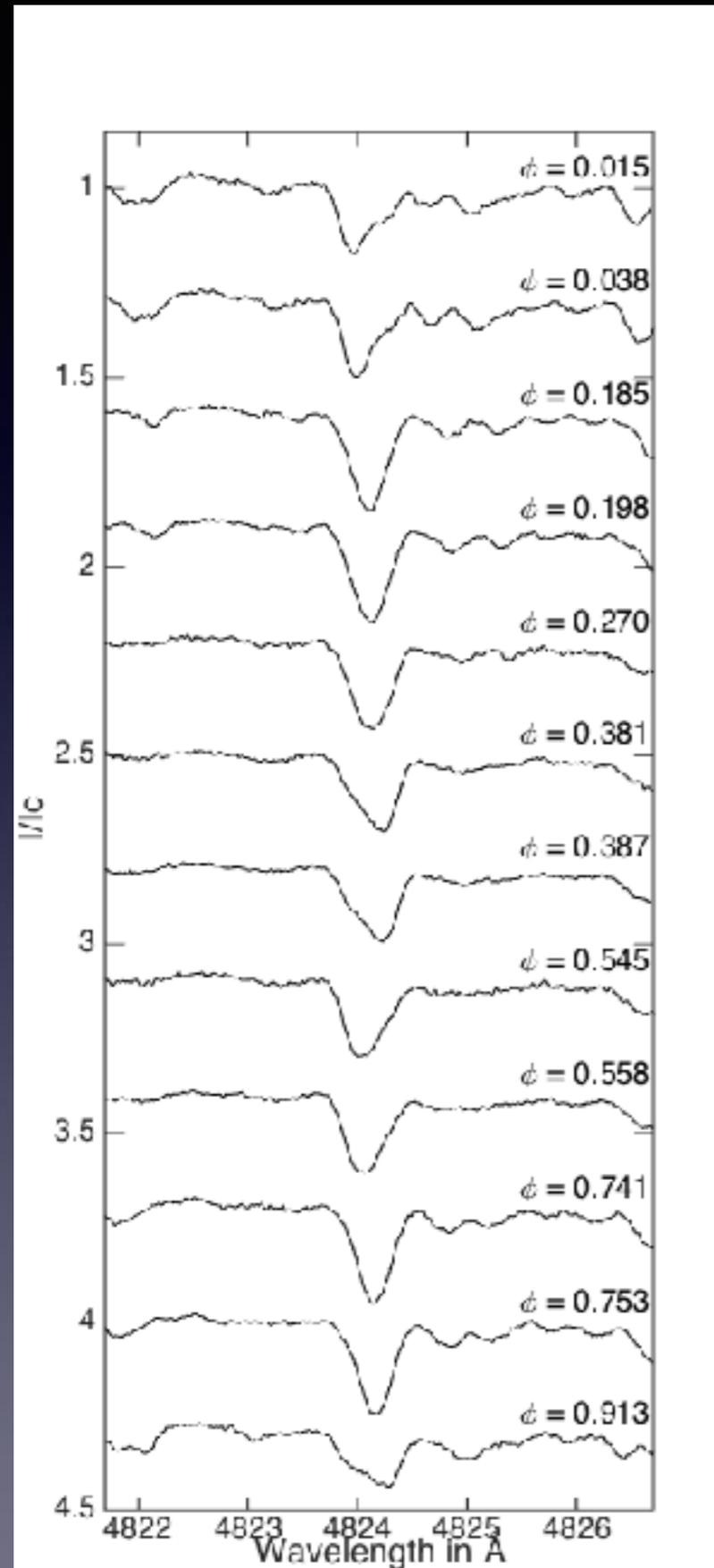
Surface distribution of the Cr abundance (element concentration given in a logarithmic scale)

Adapted from O. Kochukhov & all, A&A 513, A13 (2010)

# Spectro-polarimétrie

alpha CVn2 : observation professionnelle

De la possibilité de cartographier le champ magnétique des étoile

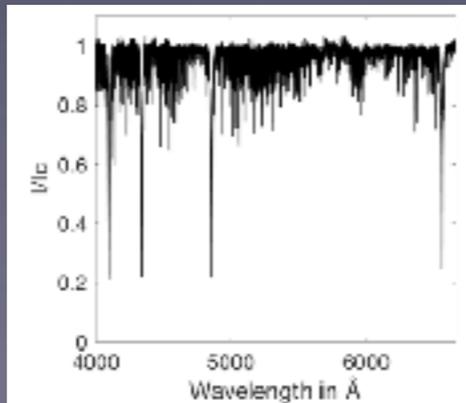
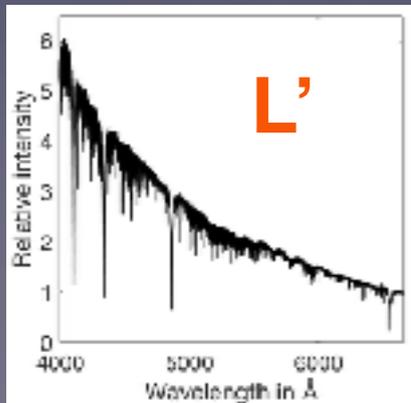
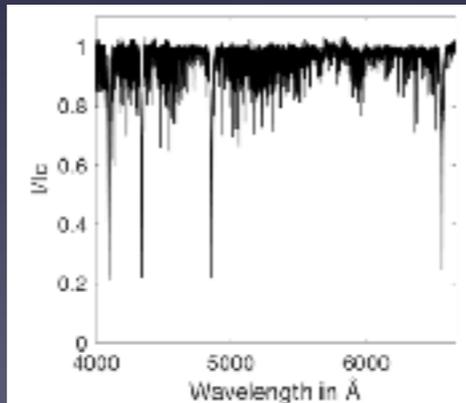
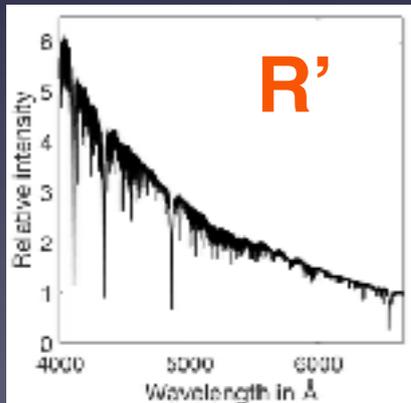
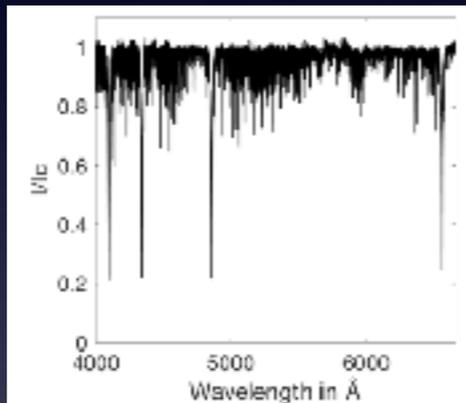
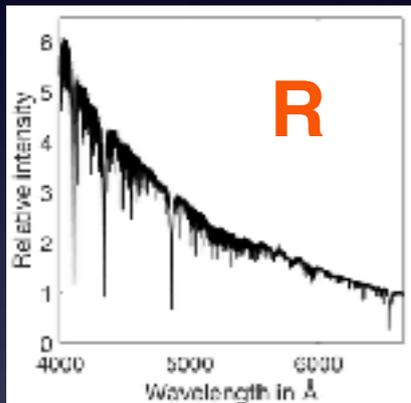
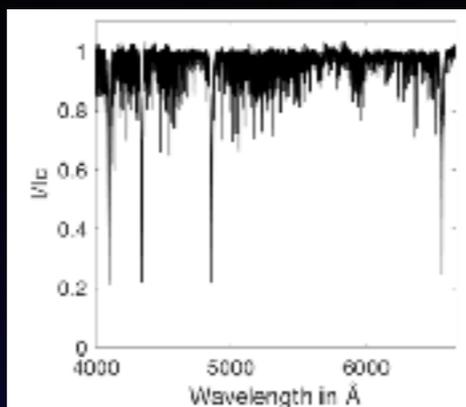
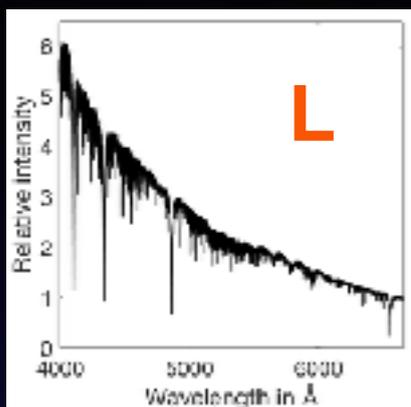


# Spectro-polarimétrie

Procédure de traitement (méthode LSD)

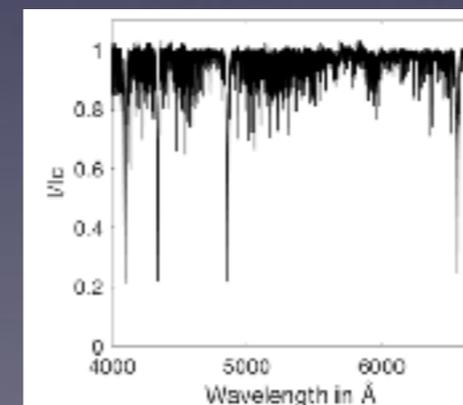
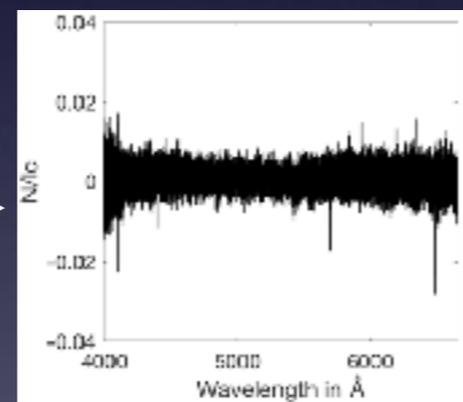
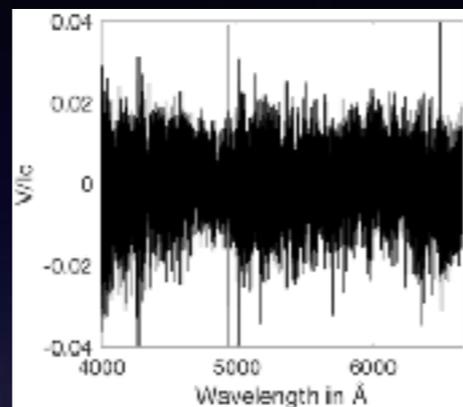
Capacité du spectrographe eShel (R=11000) à mesurer la signature Zeeman des étoiles

Exemple sur alpha2 CVn  
Télescope de 0.25 m (RC10) - exposition 8 x 600 sec.



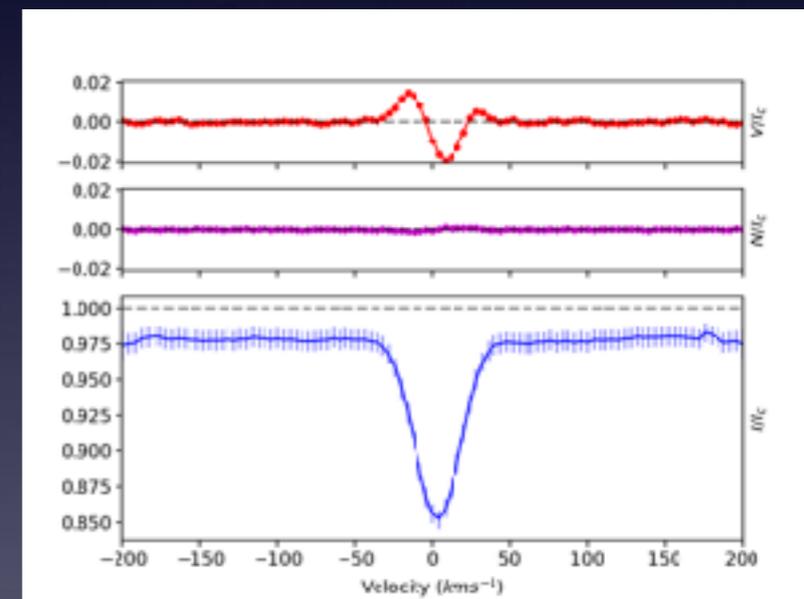
$$\frac{V(\lambda)}{I(\lambda)} = \frac{[I_L(\lambda) - I_R(\lambda)] + [I_{L'}(\lambda) - I_{R'}(\lambda)]}{I_L(\lambda) + I_R(\lambda) + I_{L'}(\lambda) + I_{R'}(\lambda)}$$

$$\frac{N(\lambda)}{I(\lambda)} = \frac{[I_L(\lambda) - I_{L'}(\lambda)] + [I_R(\lambda) - I_{R'}(\lambda)]}{I_L(\lambda) + I_R(\lambda) + I_{L'}(\lambda) + I_{R'}(\lambda)}$$



## LSD

« Least-Square Deconvolution »  
(Donati et al, 1997)



Calcul des profils de Stokes en exploitant la signature Zeeman de plus de 1000 raies (pondérée par l'intensité des raies et la facteur de Landé)

# Spectro-polarimétrie

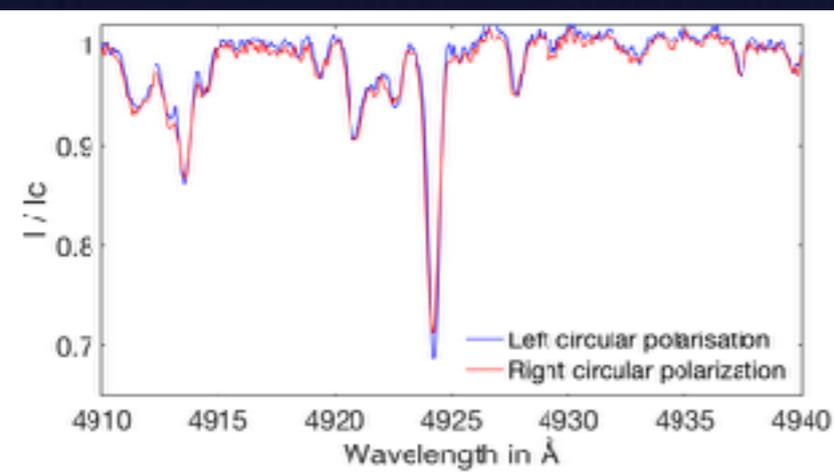
Méthode optimale d'extraction de la signature Zeeman (et de la force du champ magnétique longitudinal)

## alpha2 CVn

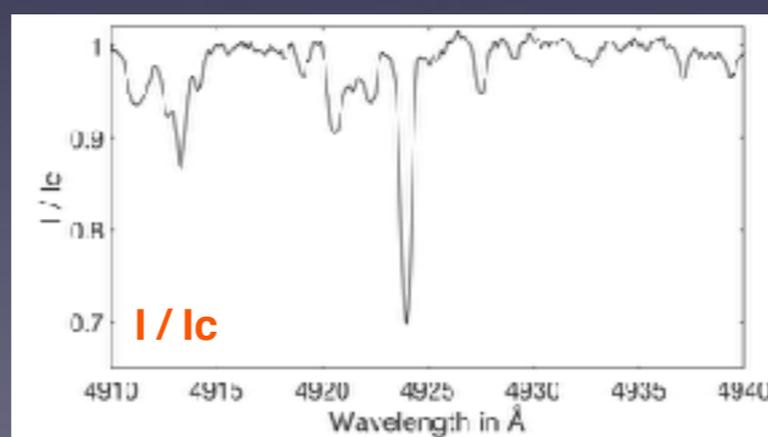
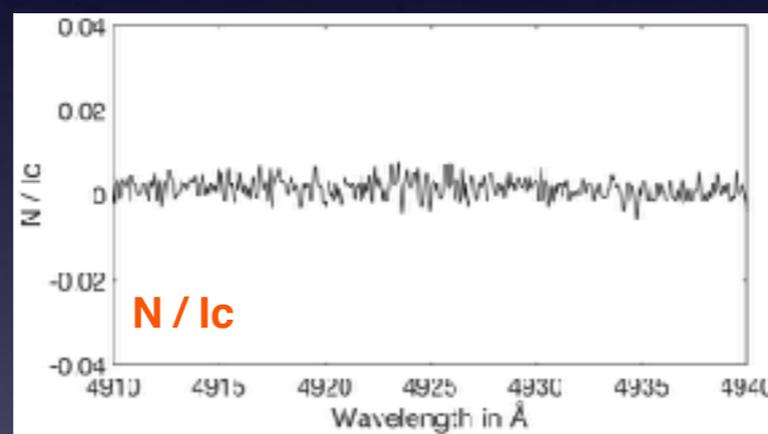
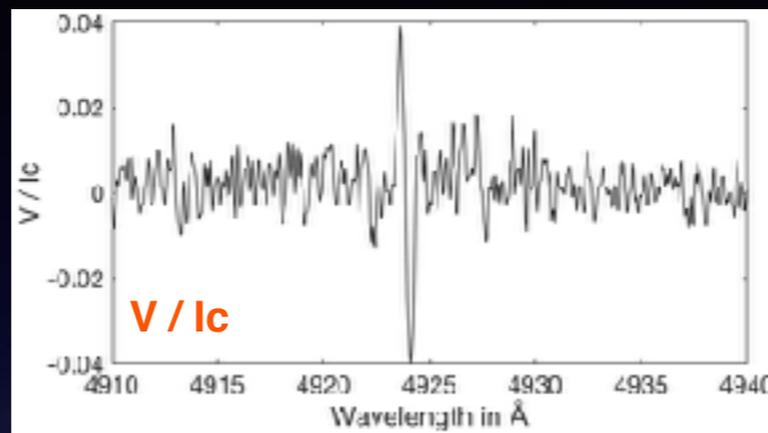
Raie Fe II à 4923,9 Å

Facteur de Landé = 1,690

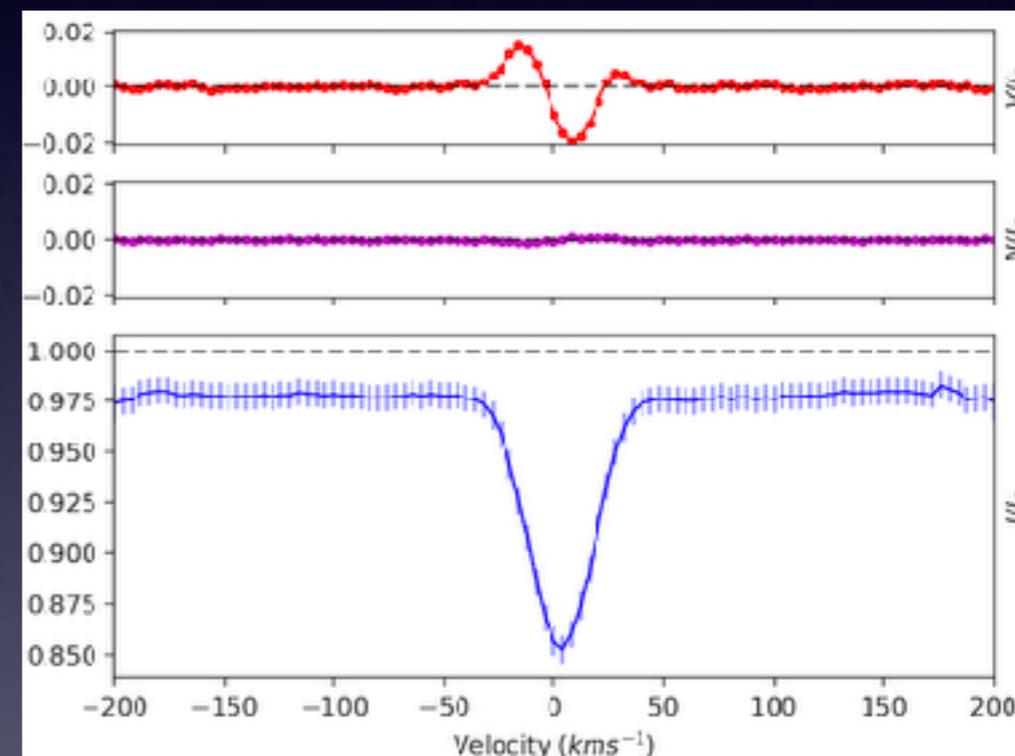
Résolution spectrale  $R = 11\ 000$



Décalage spectral entre le profil V- et le profil V+ de 0,03 Å environ (rappel : finesse spectrale = 0,44 Å)  
Difficile à mesurer !



Différence (V-) - (V+). Signature Zeeman directement détectable sur quelques raies particulières



Méthode LSD : profil de Stokes V observé avec un fort rapport signal sur bruit (bénéfice de la mesure sur plusieurs centaines de raies)

Paramètres de normalisation :  
Profondeur : 0,4  
Facteur de Landé : 1,2  
Longueur d'onde : 6000 Å

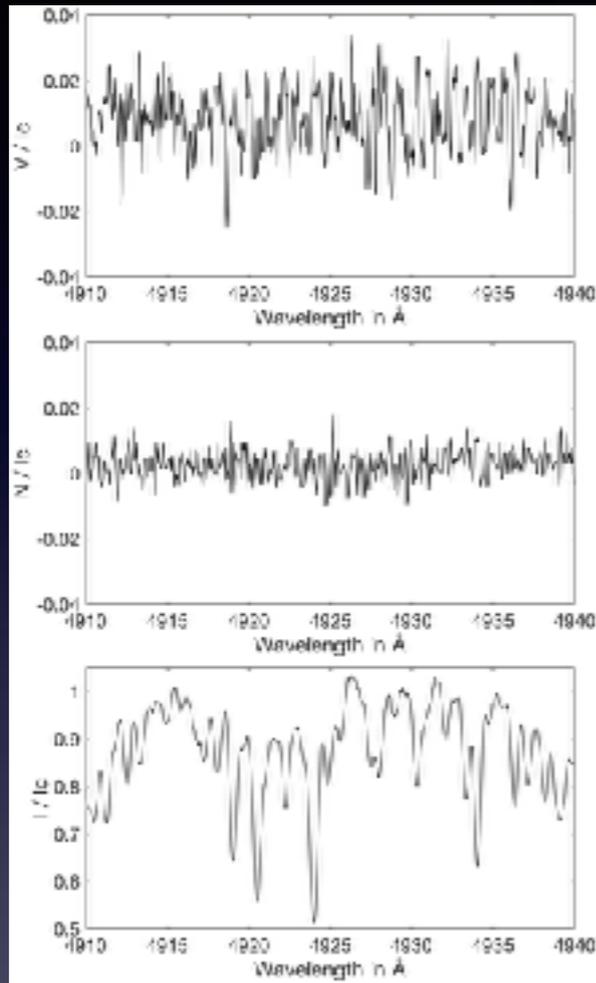
# Spectro-polarimétrie

## beta CrB

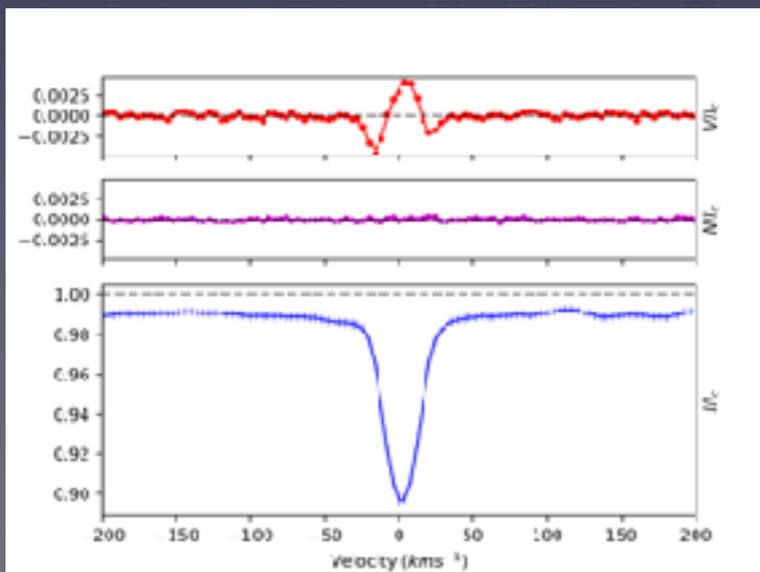
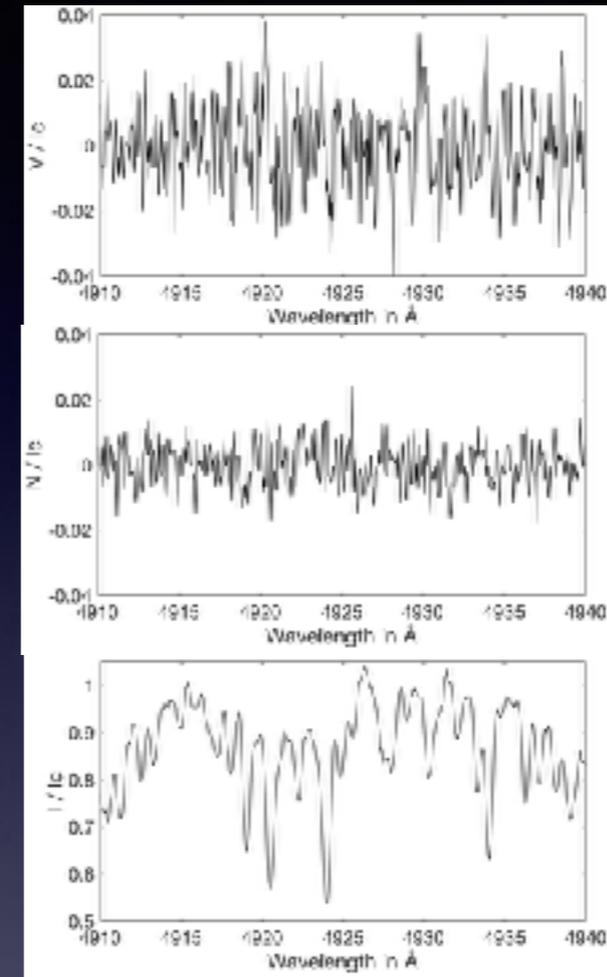
V = 3,9 - Période : 18,48 jours - B// = -1000 G, +800 G

Télescope RC10 (0.25 m) + spectrographe eShel (R=11000) - Exp. : 4 x 600 s

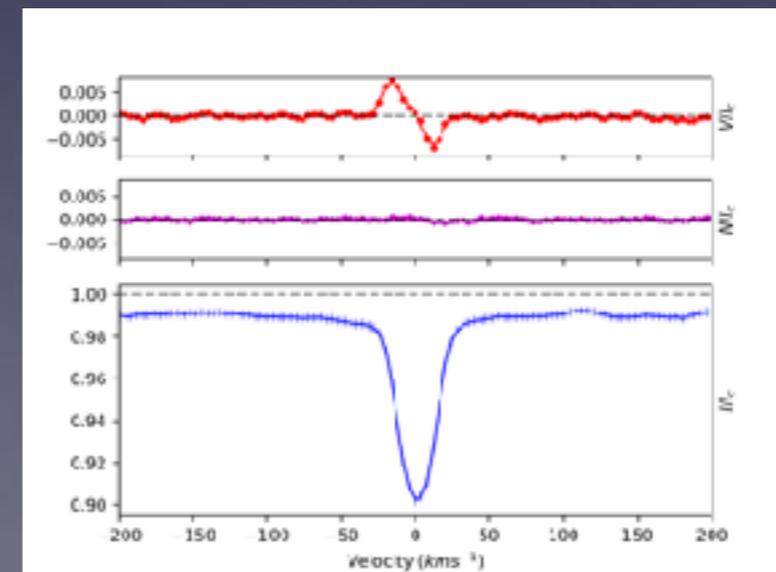
22/05/2018



08/07/2018



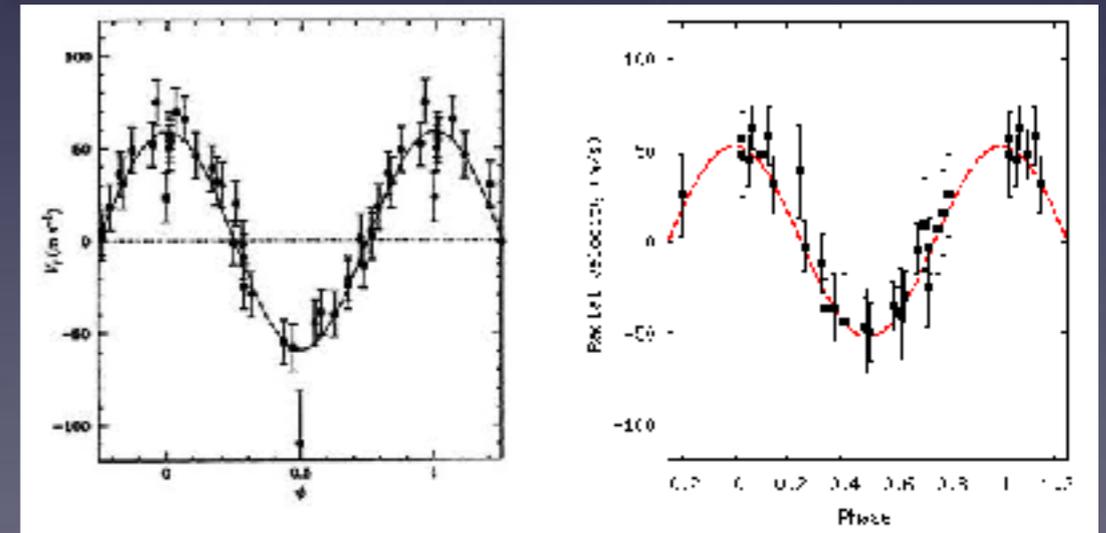
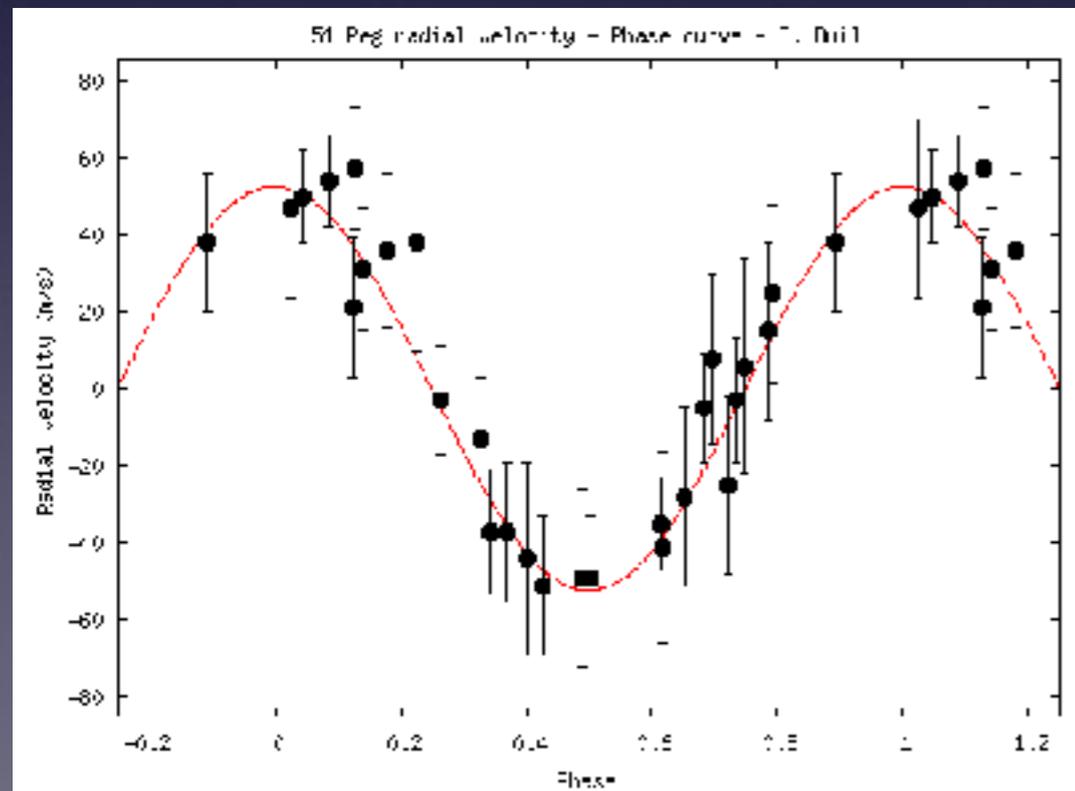
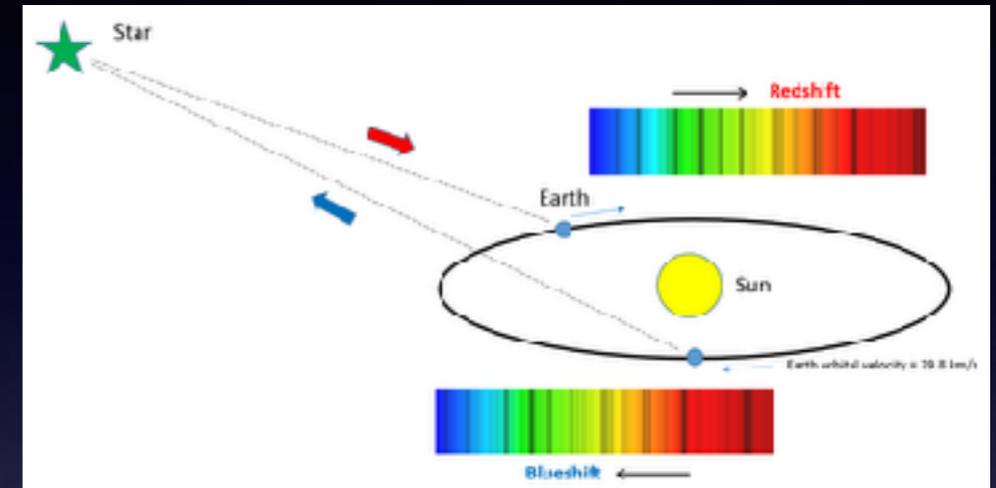
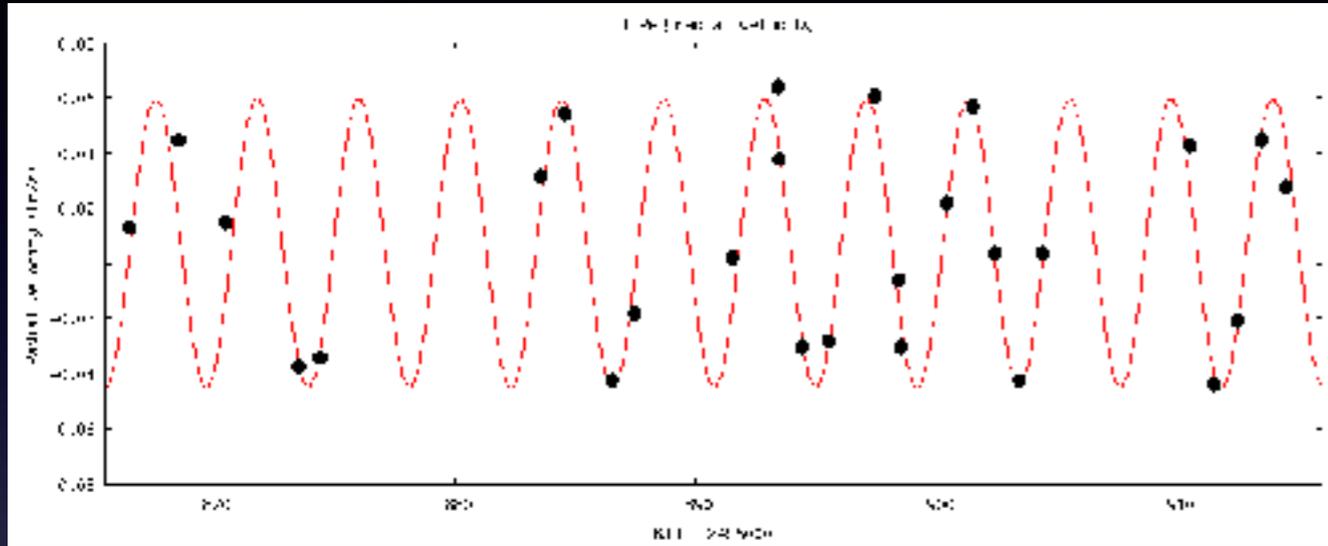
Profil Stokes LSD



Profil Stokes LSD

# Spectrographie extrême : observation des exoplanètes par la méthode des vitesses radiales

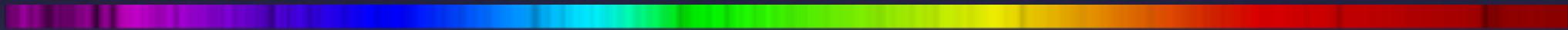
## Le cas 51 Peg



Spectrographe VHIRES-MO

A gauche, Mayor et Queloz, en 1995 sur le 1,93 m de l'OHP, à droite Buil, en 2014 sur un télescope de 0,25 m de l'observatoire Castanet-Tolosan

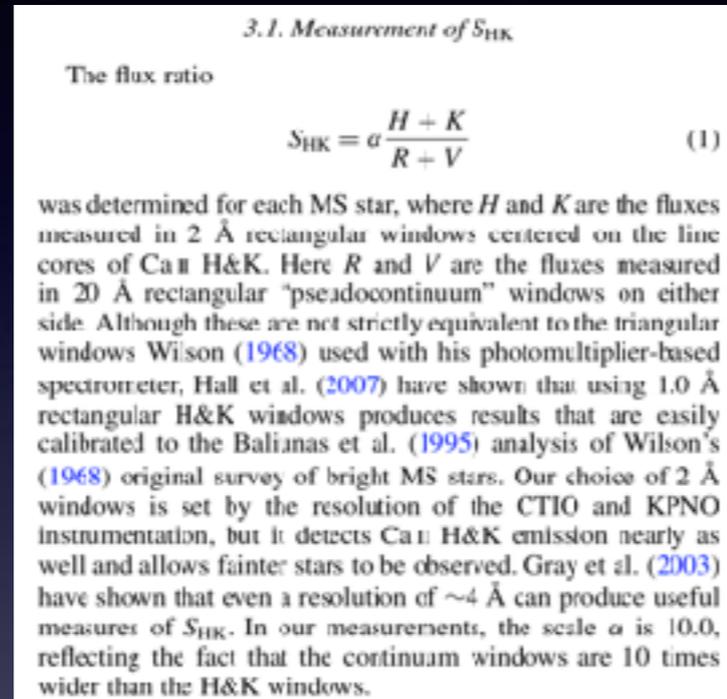
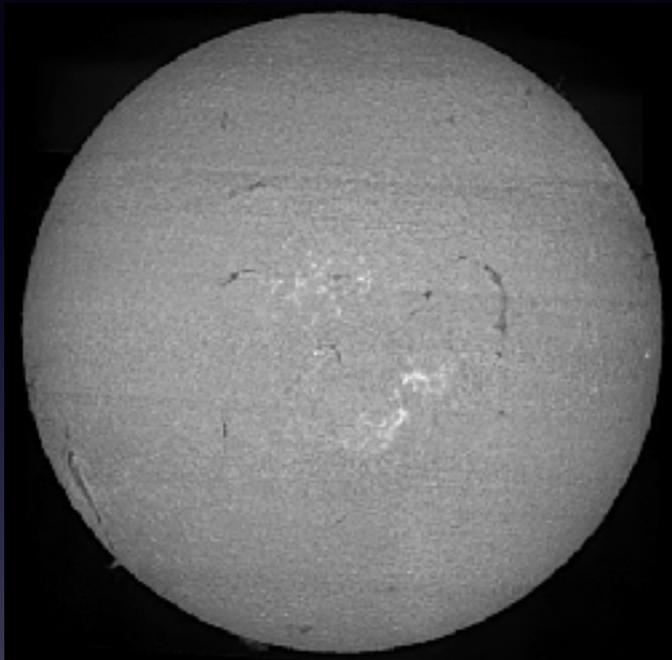
# Pourquoi et comment observer dans l'ultraviolet



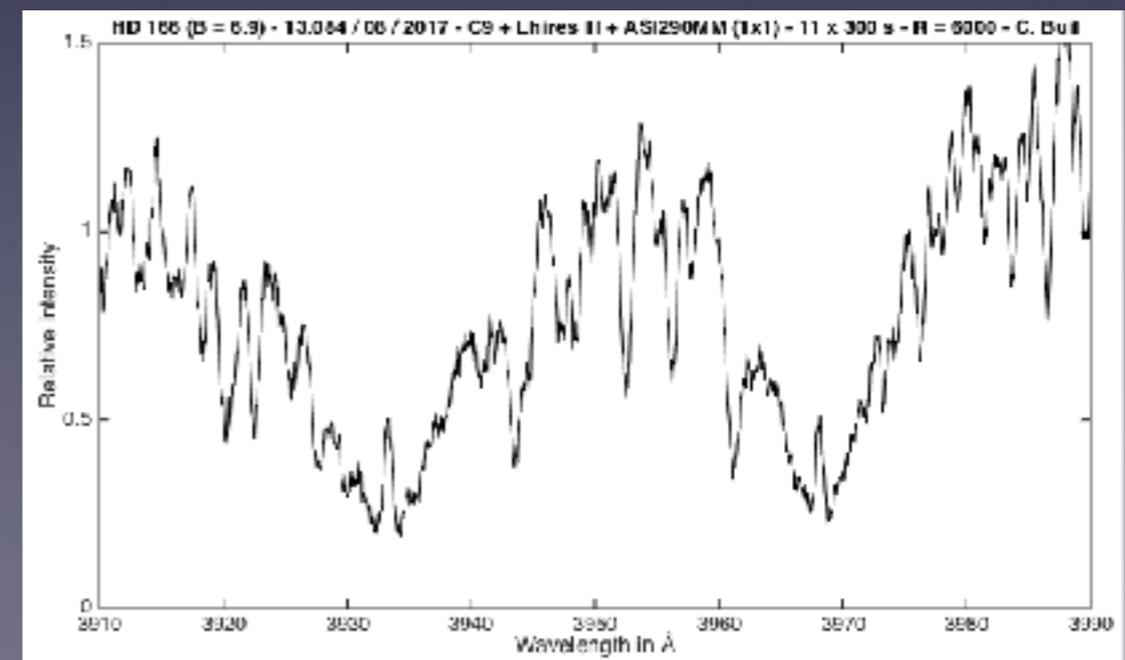
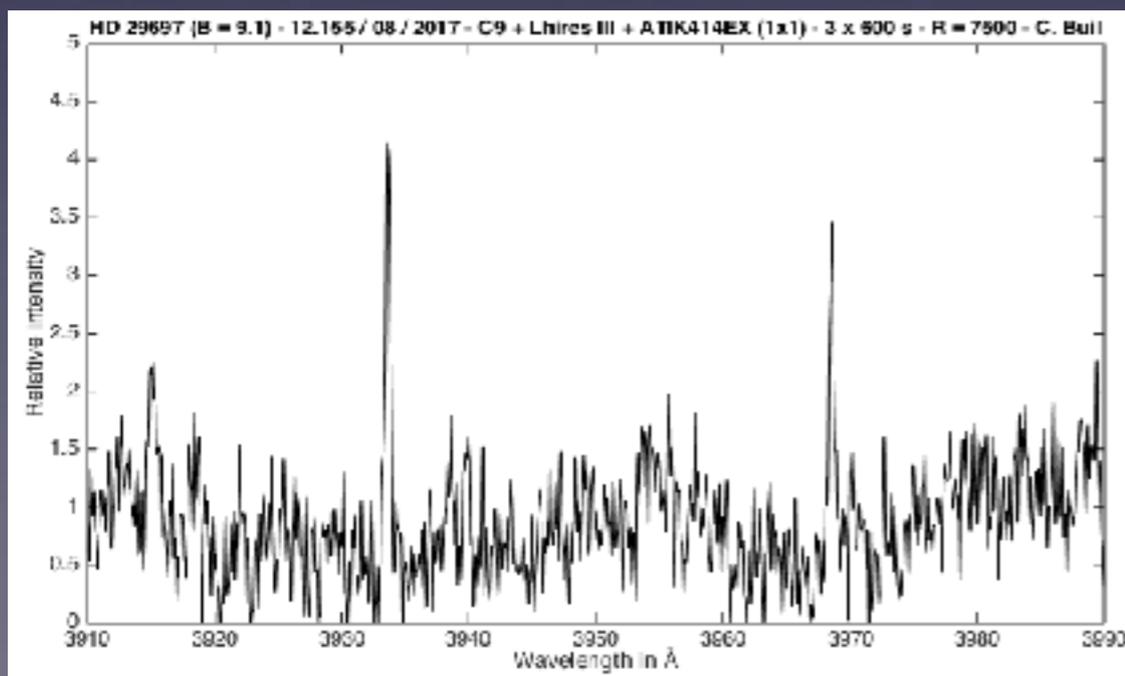
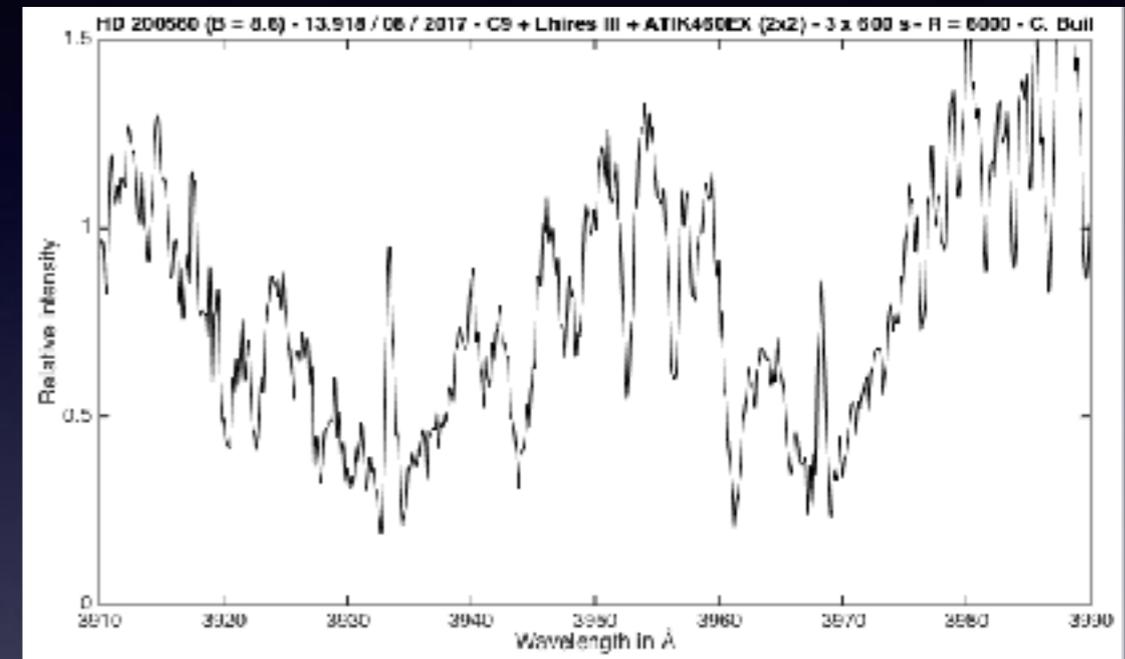
# Observation de l'activité chromosphérique

Survey de l'activité chromosphérique des étoiles type solaire par l'étude des raies H&K du Ca II dans le proche UV (Alexandre Santerne - Laboratoire Astrophysique de Marseille)

Programme à venir, bien adapté à l'usage d'un Lhires III ou d'un eShel optimisé



Zhao, AJ, 145, 140 (2013)



# Projet UVEX

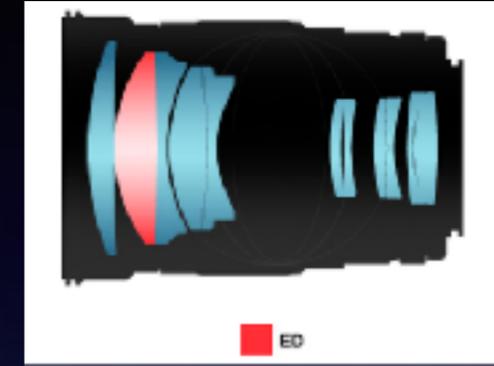
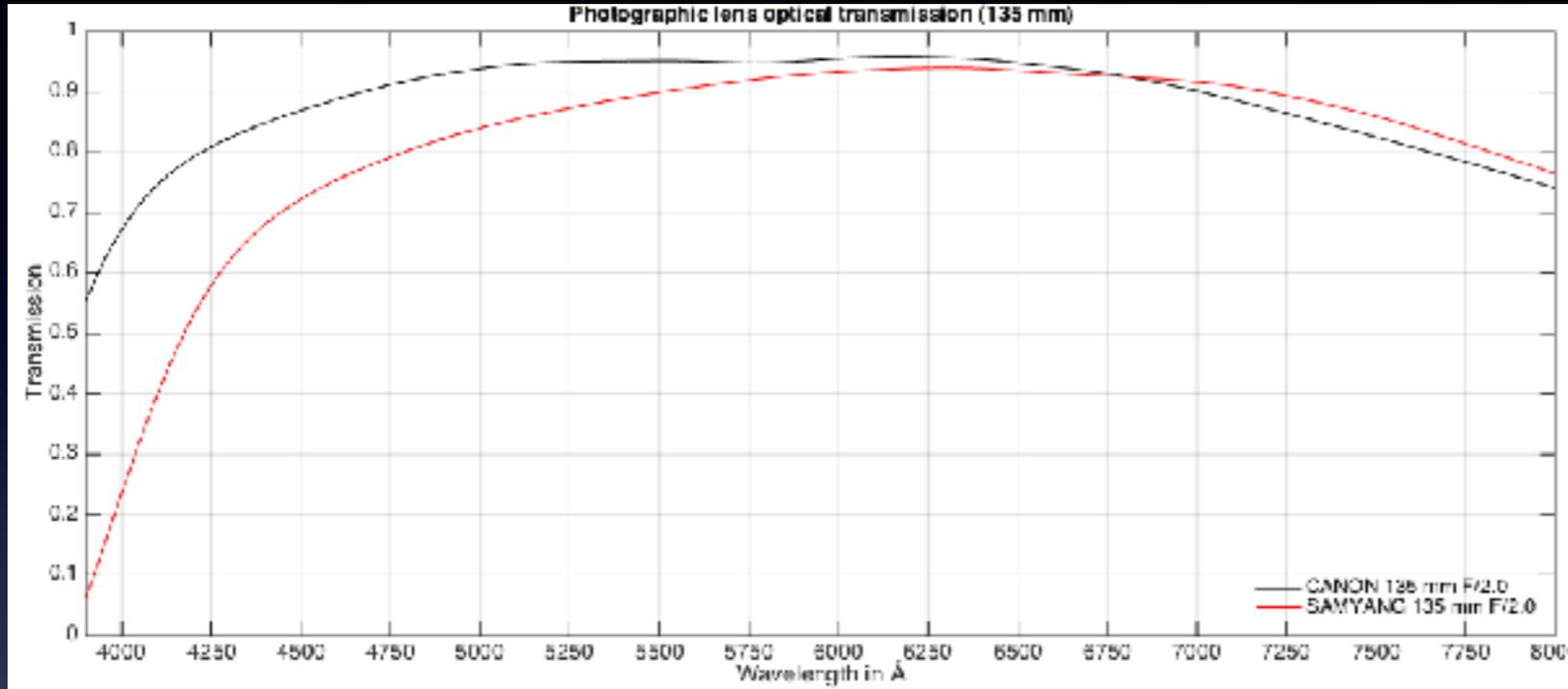
## UltraViolet EXplorer



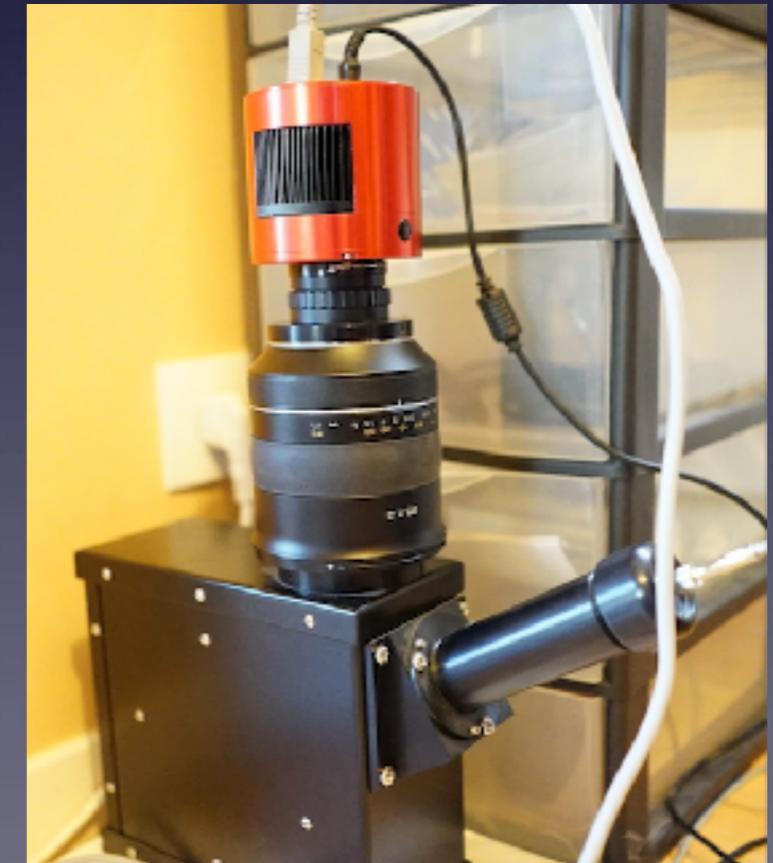
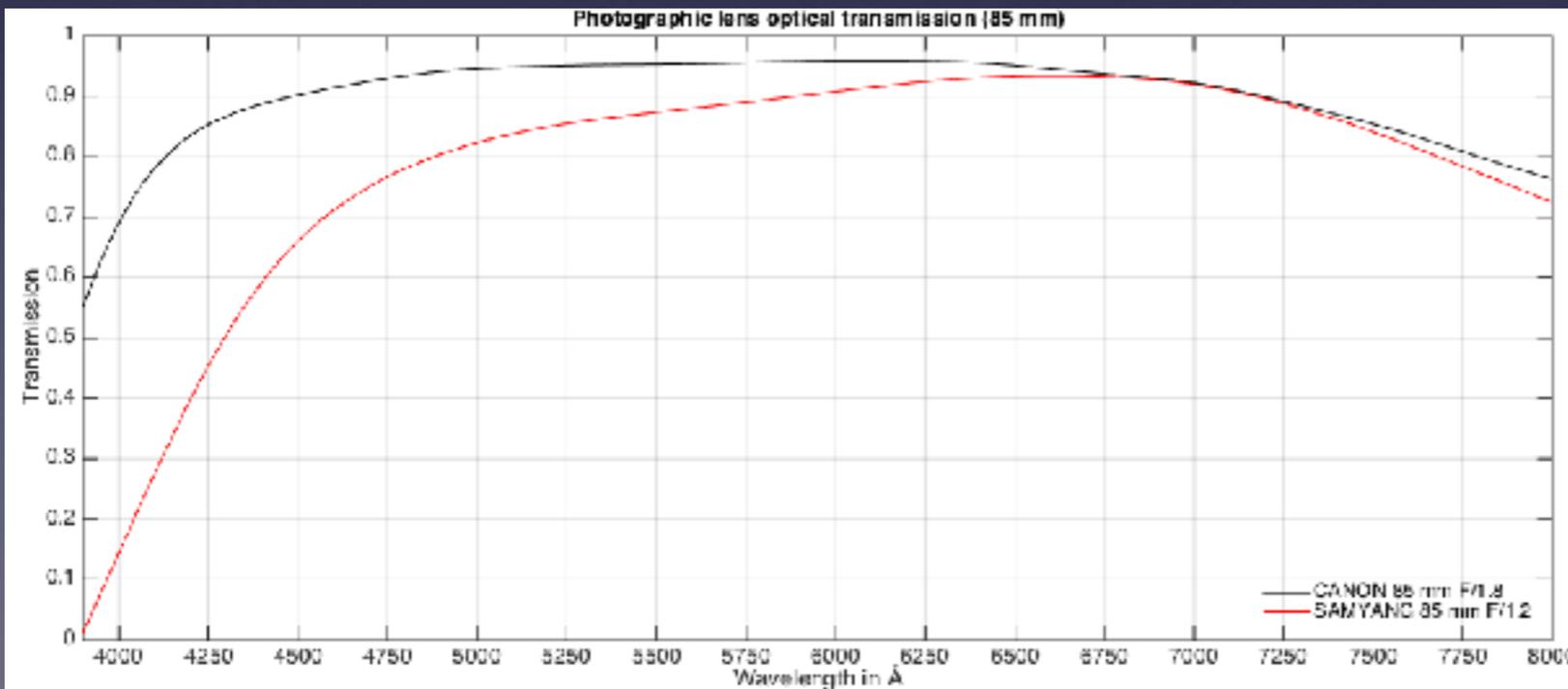
# Projet UVEX

## Accroissement du domaine spectral des spectrographes

**Problème** : chute dramatique de la transmission optique des objectifs photographiques et autres réducteurs de focale dans l'UV



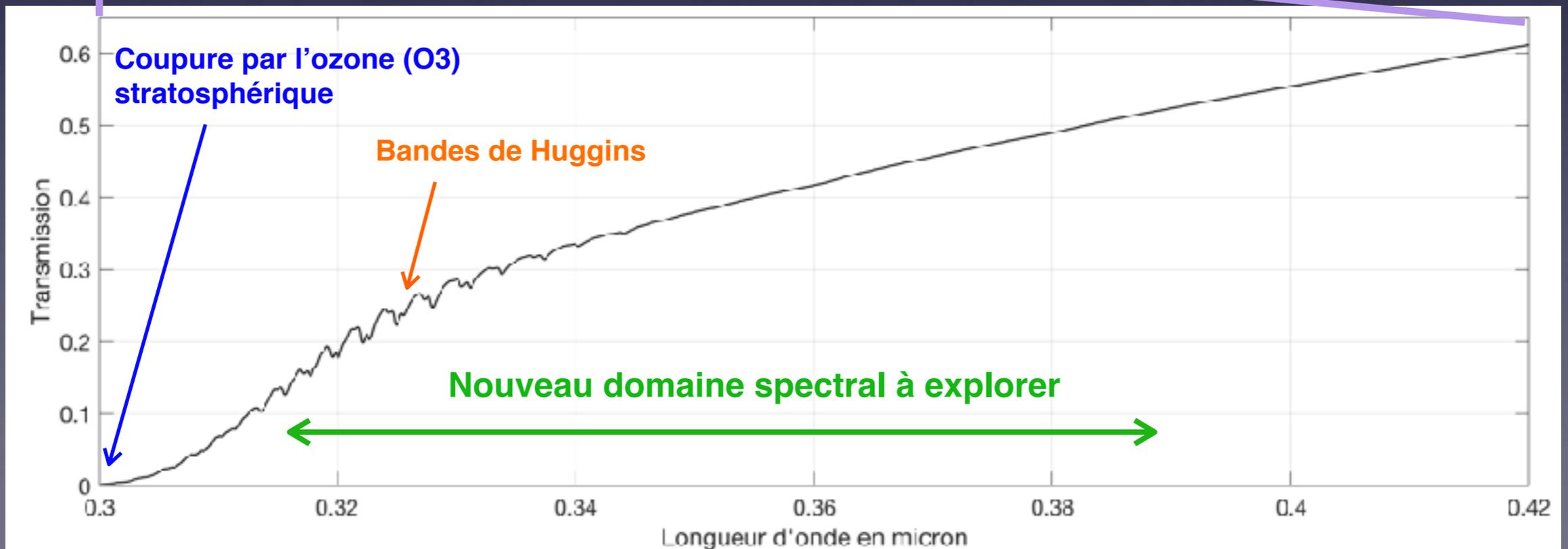
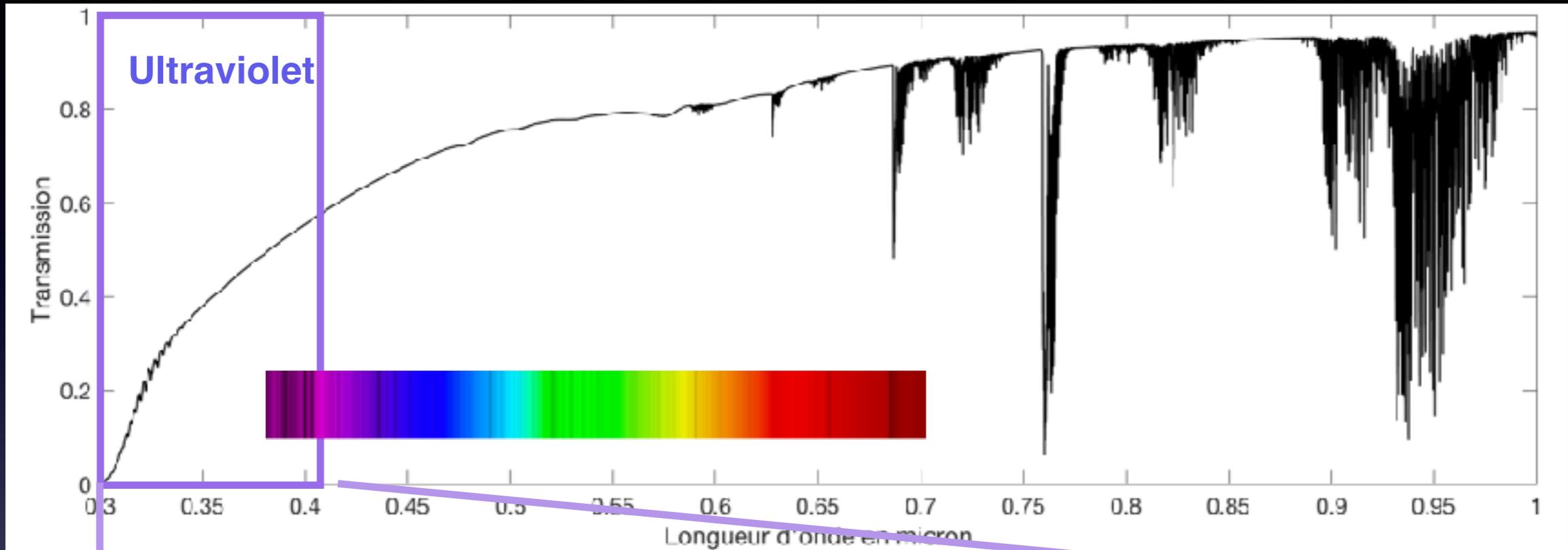
Samyang 135 mm



En même temps...

# Projet UVEX

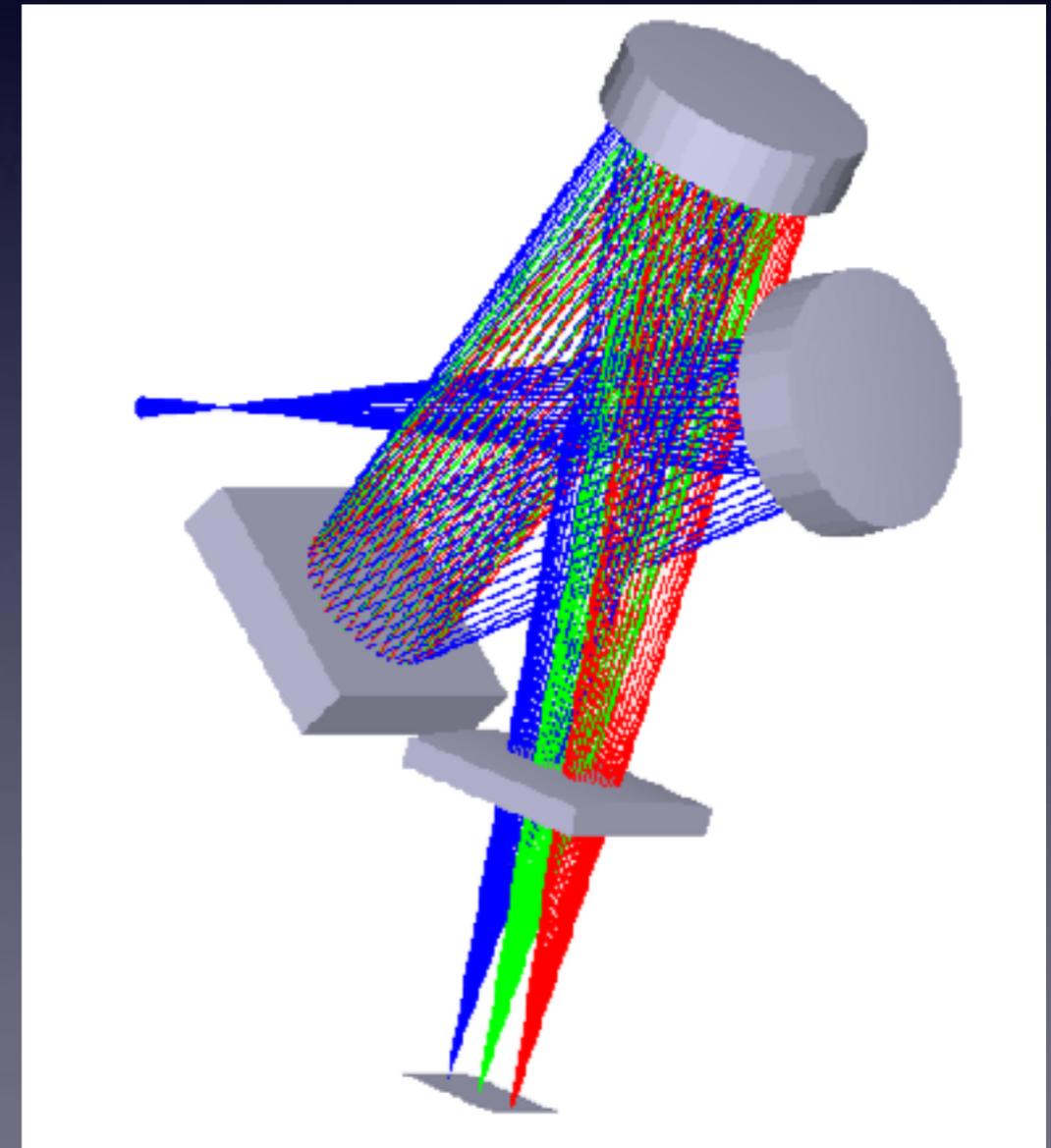
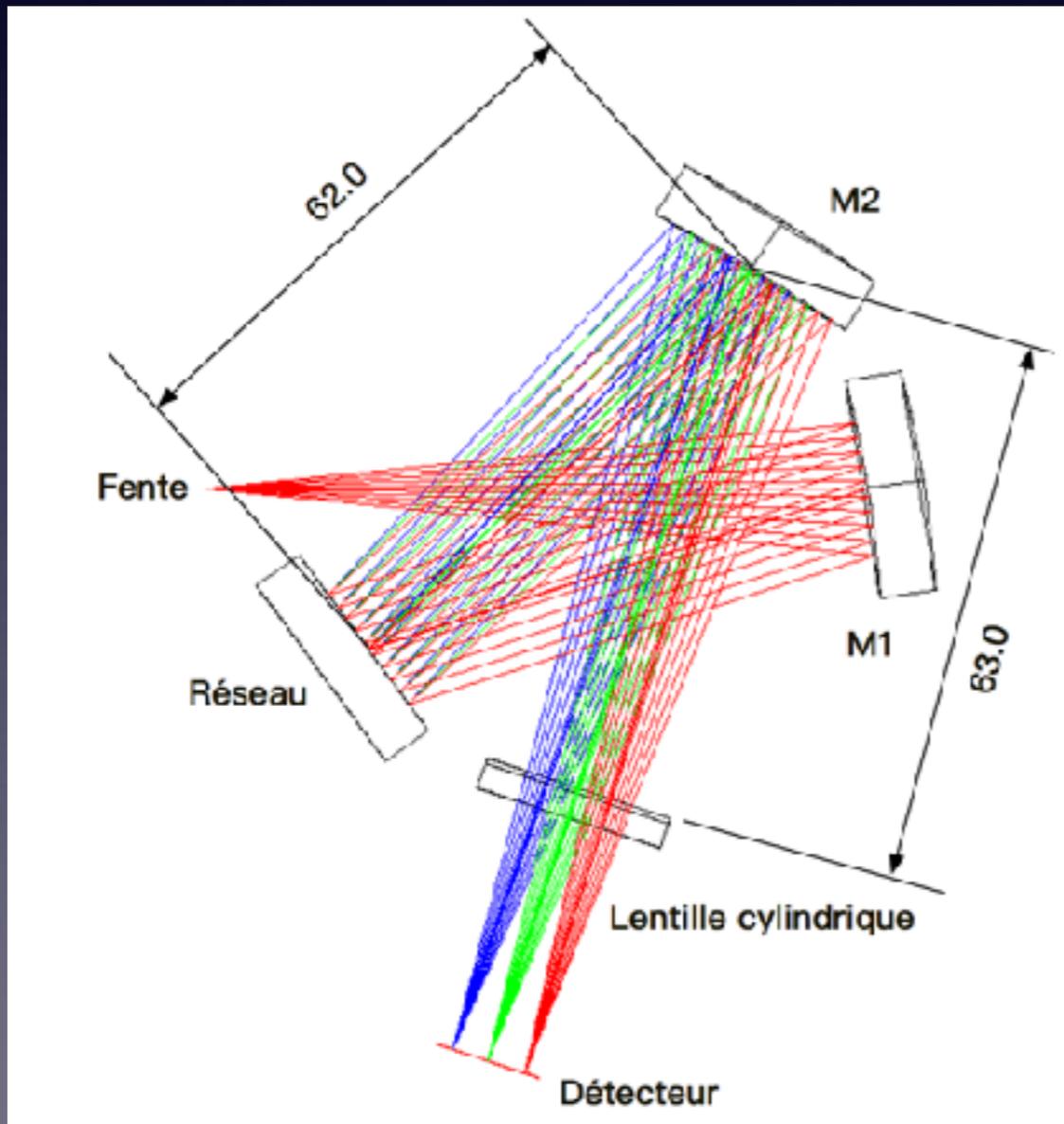
## La transmission optique de l'atmosphère terrestre Le domaine spectral du CCD/CMOS



# Projet UVEX - UltraViolet EXplorer

But visé pour l'instrument : transmission optique maximale dans l'UV et absence d'aberration chromatique

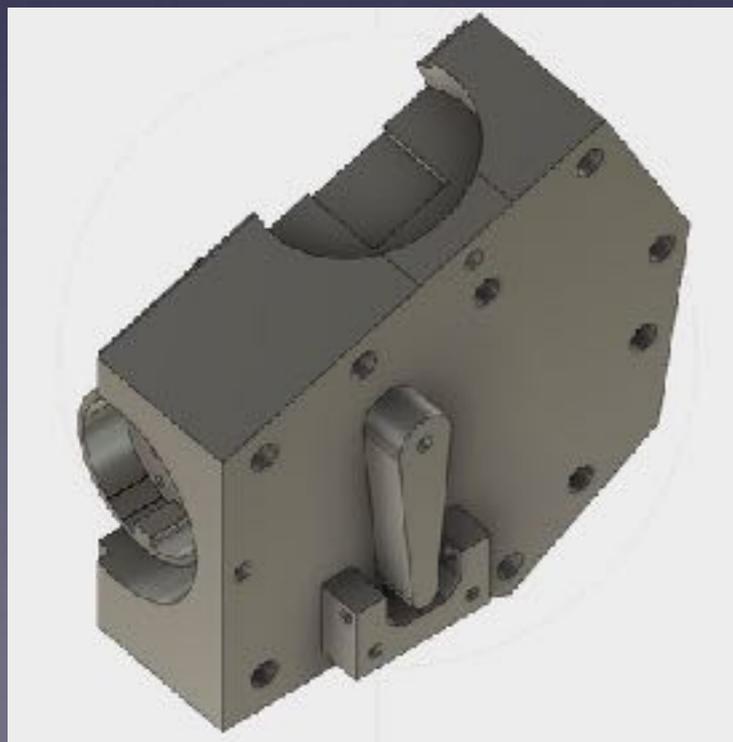
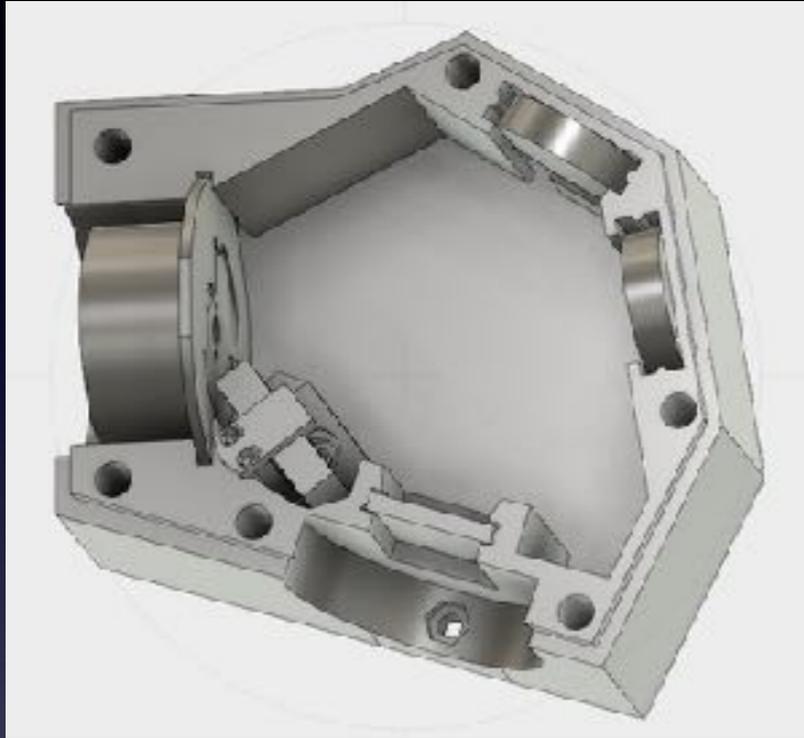
La solution : **formule Czerny-Turner** (une fente d'entrée, 2 miroirs concave sphériques, un réseau plan, une lentille cylindrique, un détecteur)



# Projet UVEX

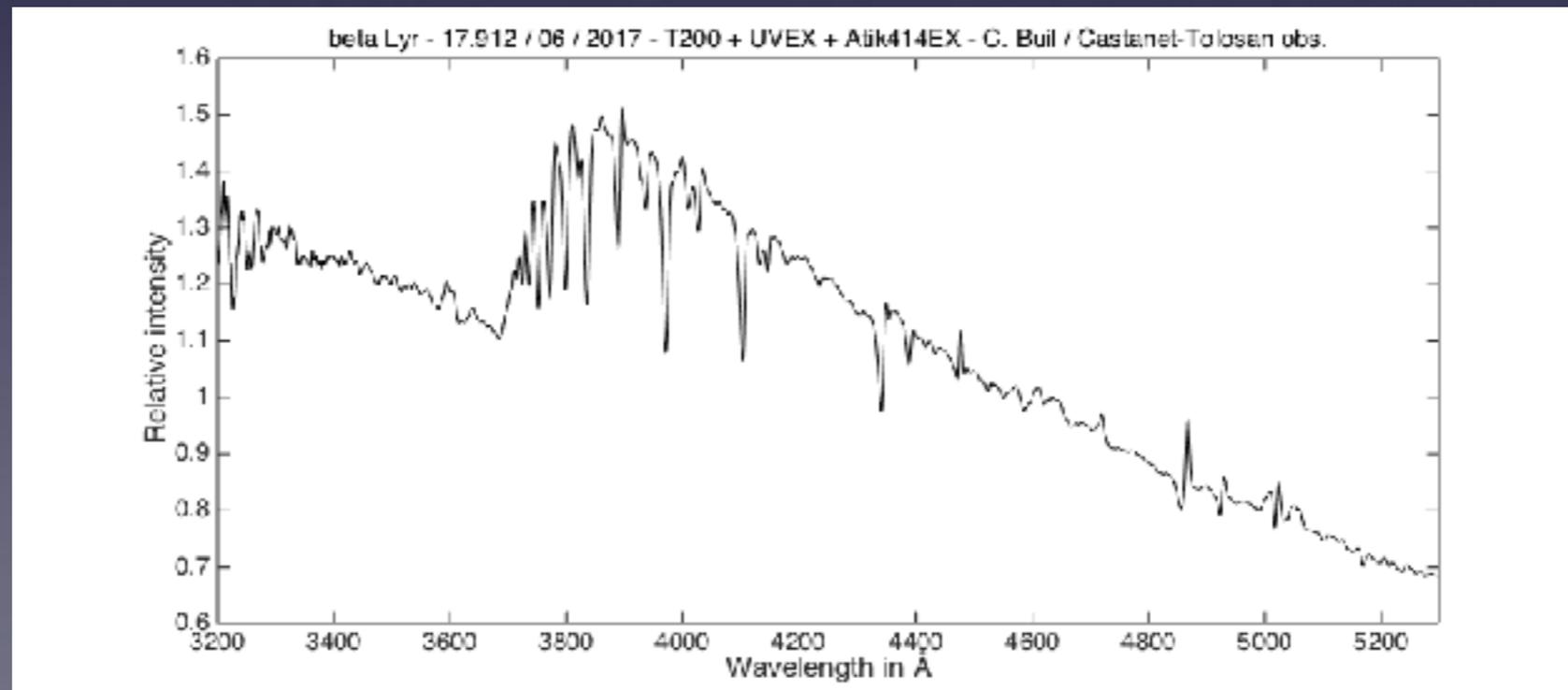
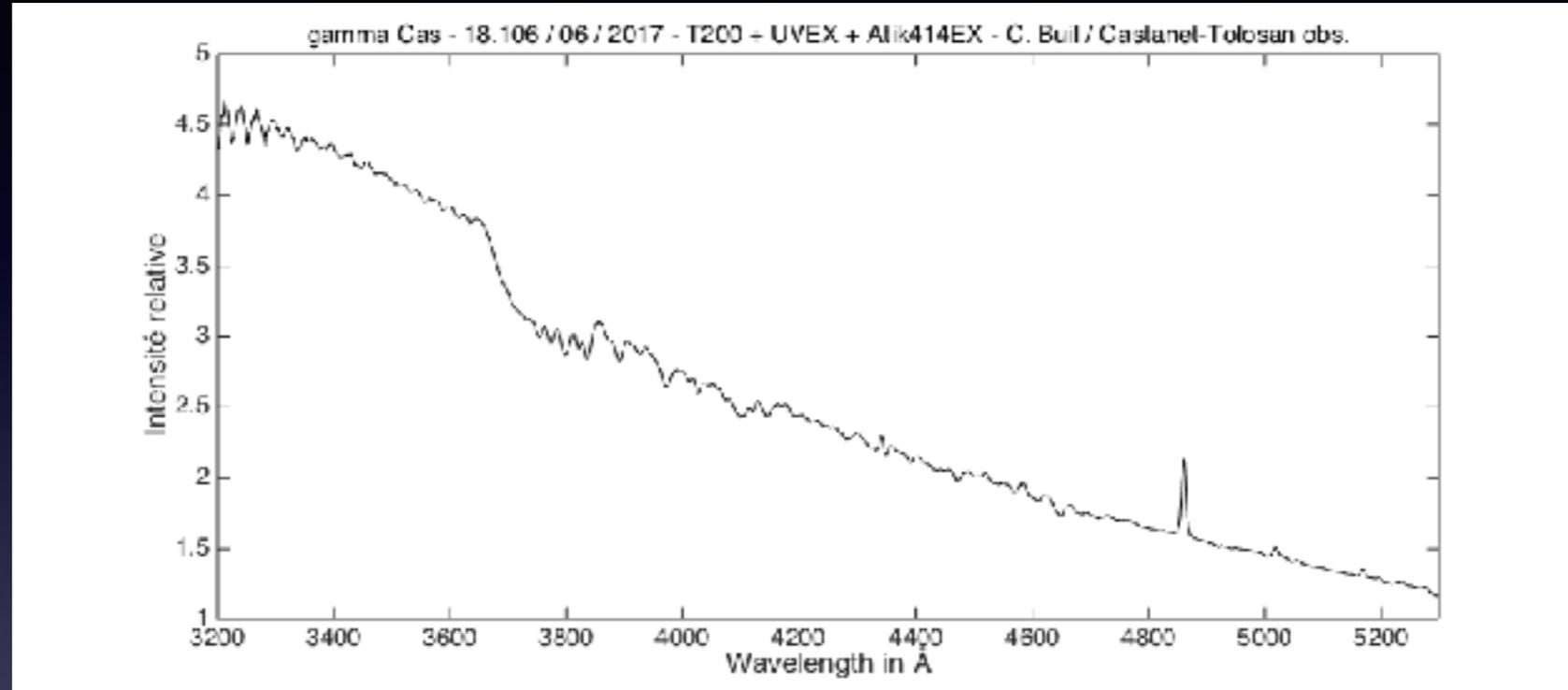
Prototypes réalisés en impression 3D  
Composants standards ThorLabs (300 euros)

UVEX 1 - été 2017



## Première lumière : juin 2017

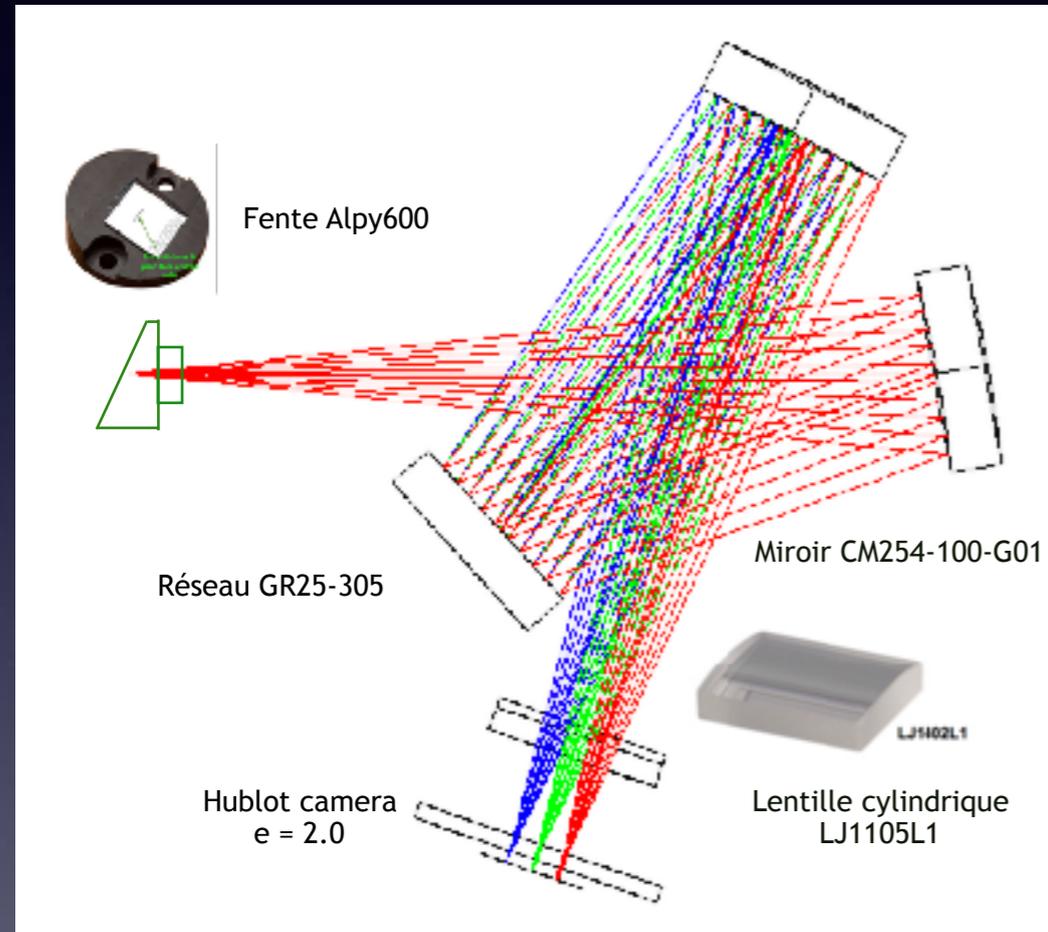
Cahier des charges respecté : détection des bandes de Huggins de l'ozone jusqu'à 320 nm, absence de chromatisme, performance ( $R=800$  avec réseau 300 t/mm et fente 23 microns), validation du schéma optique...



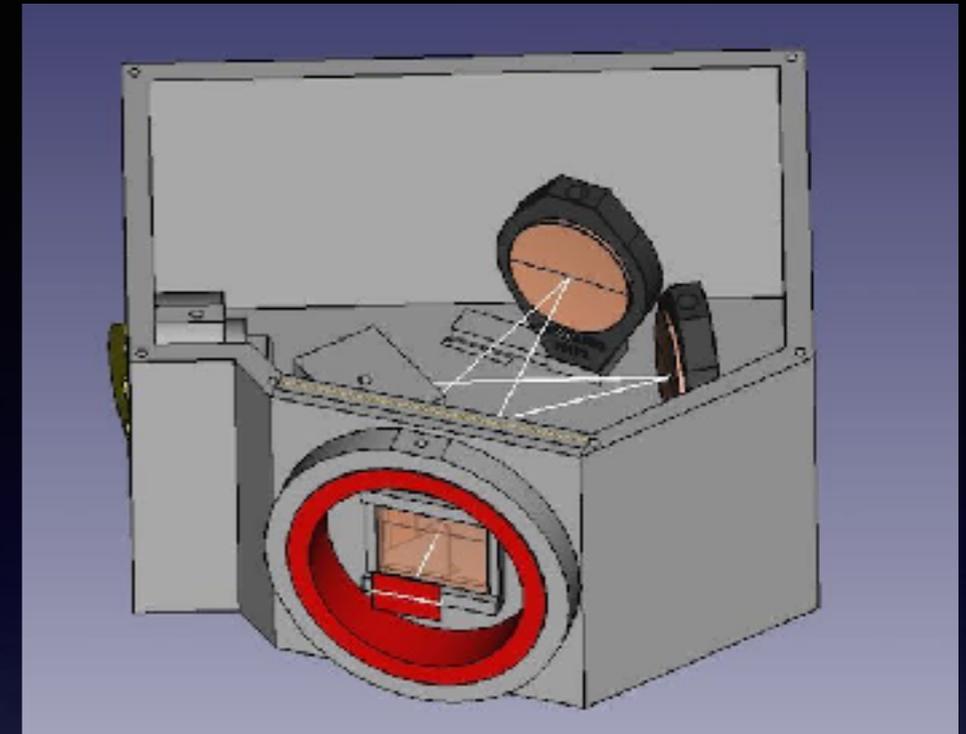
# Projet UVEX

## UVEX 2 - septembre 2018

Nouvelle optimisation optique  
Réglage simplifié et plus souple  
Ajout d'un système de guidage (celui du spectrographe Alpy 600 - Shelyak)

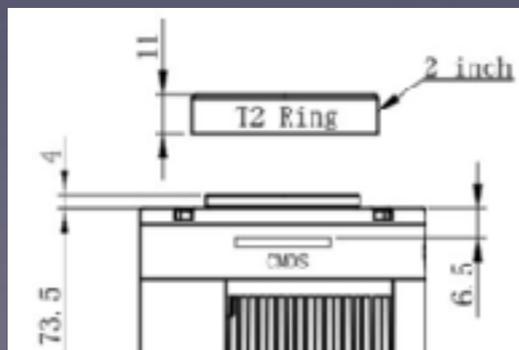


Supports miroir  
FMP1/M



UVEX2 au foyer f/8 d'un télescope RC10 (GSO)

Caméra ASI183MM



# Projet UVEX

Une contribution **déterminante** pour la CAO et le prototypage :  
Stéphane Ubaud, Pierre Dubreuil, Alain Lopez, Jean-Luc Martin  
(l'équipe « Brice's de Nice »)

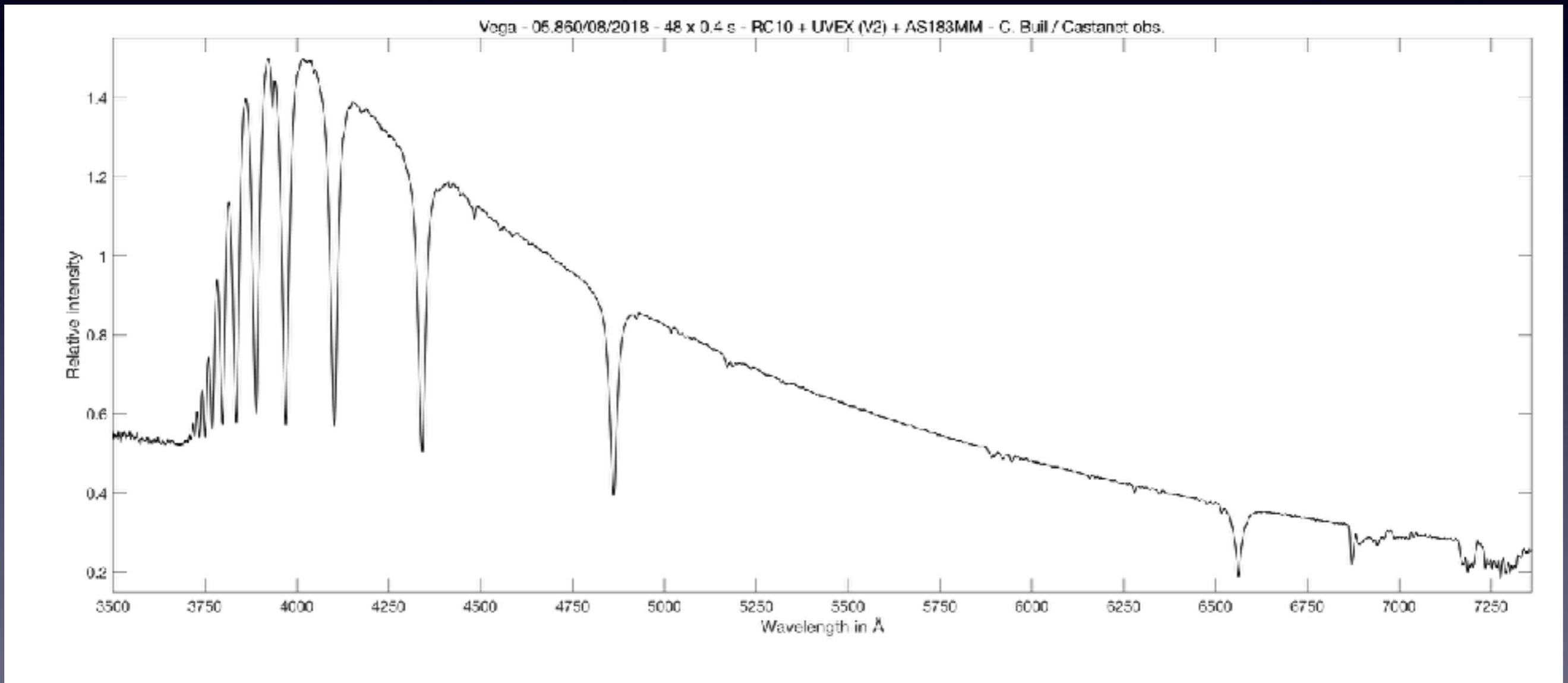


Séance de travail (août 2018)

# Projet UVEX

Poursuite de l'évaluation avec le prototype UVEX 2...

L'utilisation de UVEX ne se limite pas à l'ultraviolet. C'est aussi un explorateur de la partie visible (VISEX) et infrarouge (IREC) du spectre !



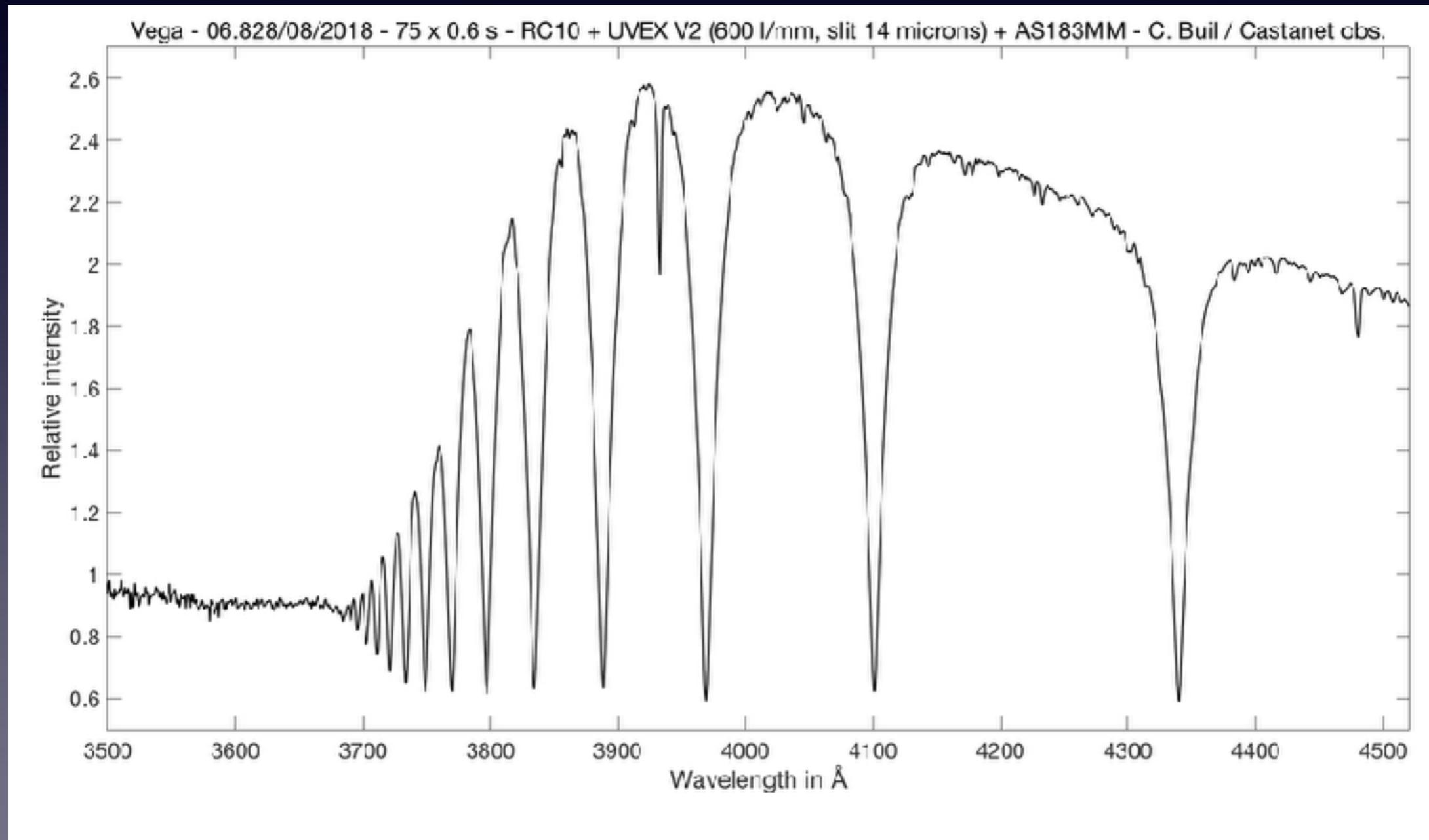
Spectre de l'étoile Véga allant de l'UV à l'IR obtenu en 3 parties (réseau 300 traits/mm). Aucune re-focalisation nécessaire entre ces 3 acquisitions (système effectivement achromatique)

# Projet UVEX

Le changement de réseau est une souplesse offerte par le concept UVEX

-> adaptation du pouvoir de résolution spectral...

Pour ce spectre de Véga, un réseau de 600 t/mm et une fente de 14 microns pour un pouvoir de résolution de  $R = 1800$



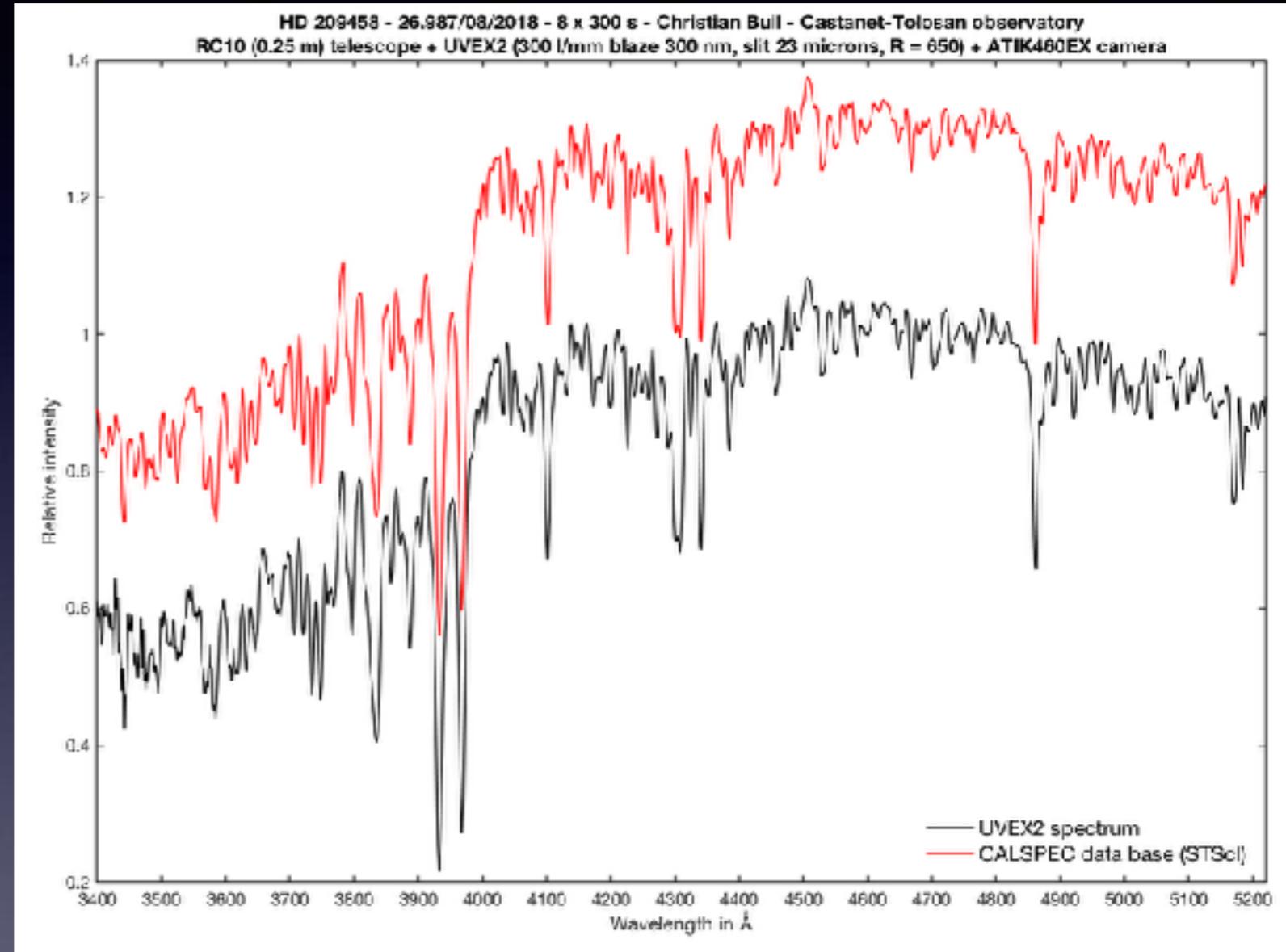
# Projet UVEX

## Faire de UVEX un outil :

- Pour la science (saut qualitatif, domaine spectral étendu)
- Accessible (faible coût, optique = 300 euros)
- Simple à utiliser (léger, rassurant, choix caméras,..)
- Souple (résolution de  $R=400$  à  $R=3000$  par changement du réseau).
- Facile à reproduire en version impression 3D

## Mais des limitations :

- Performance optimale sur des télescopes ouvert à  $f/8$ - $f/12$
- Performance optimale sur les petites diamètres ( $D < 300$  mm)
- L'utilisation optimale de UVEX n'a de sens que sur des télescopes achromatiques (Ritchey-Chrétien pur, Cassegrain)
- Formule optique simple mais pointue au réglage

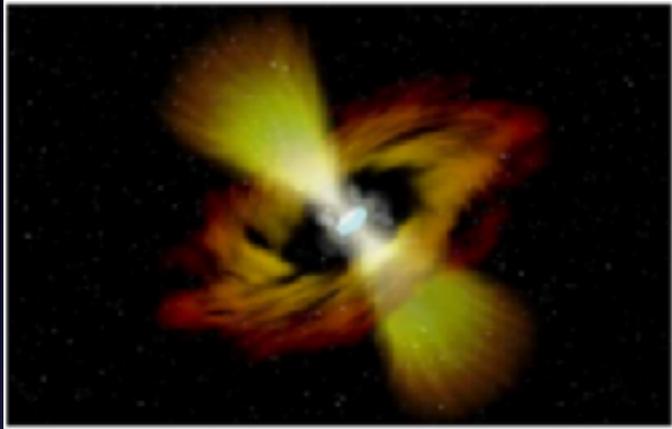


Test de justesse (confrontation avec standards STScI)

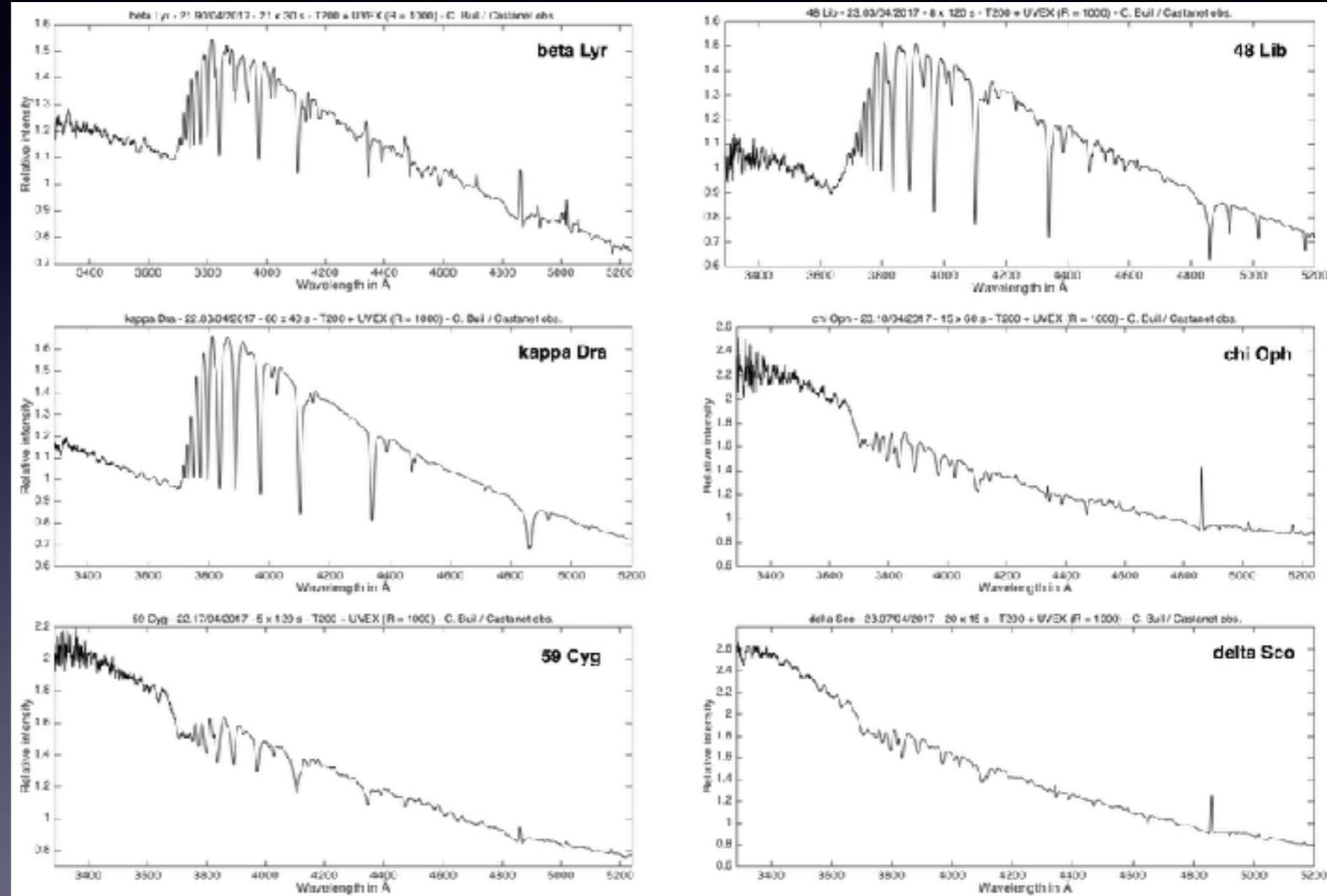
**Rappel de la règle: le spectrographe universel, utilisable sur tout et capable de tout, n'existe pas !**

# Projet UVEX

## Variété du saut de Balmer sur une collection d'étoiles Be



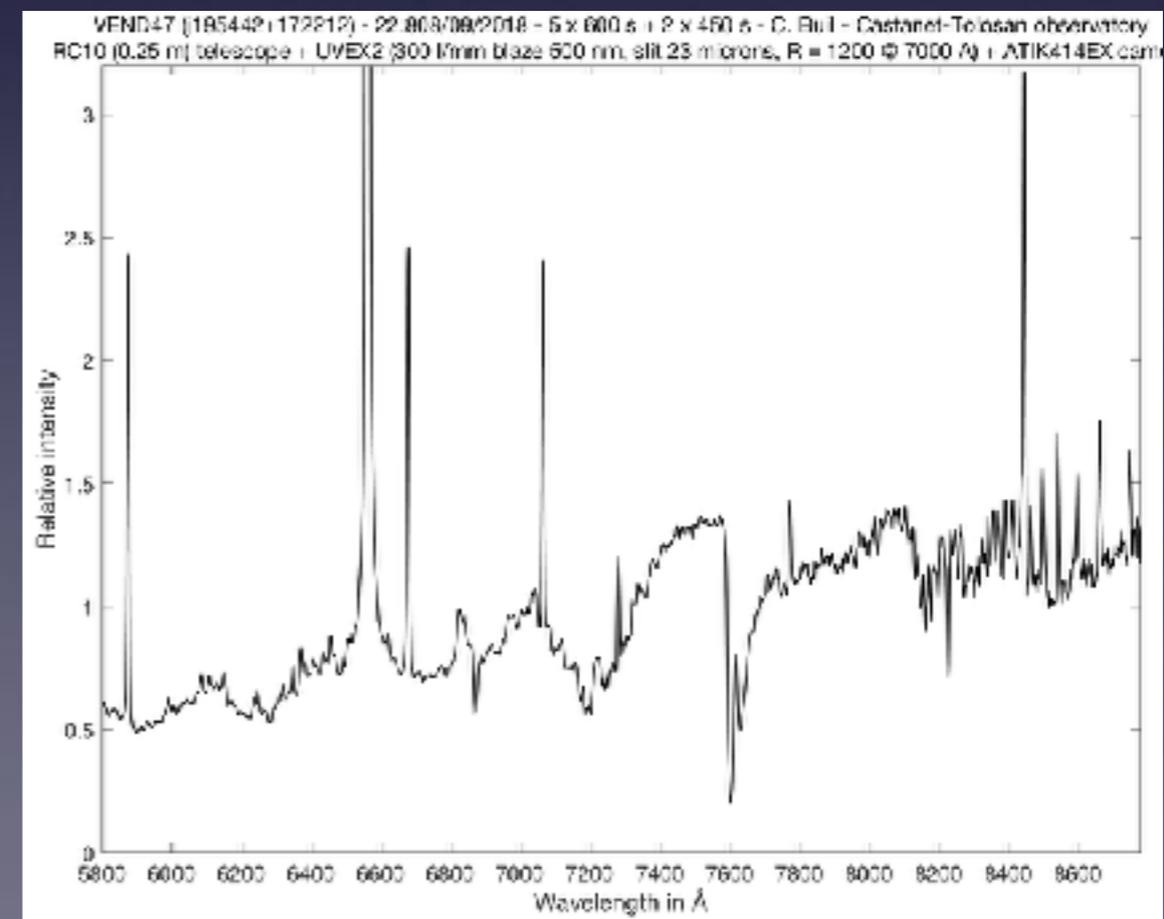
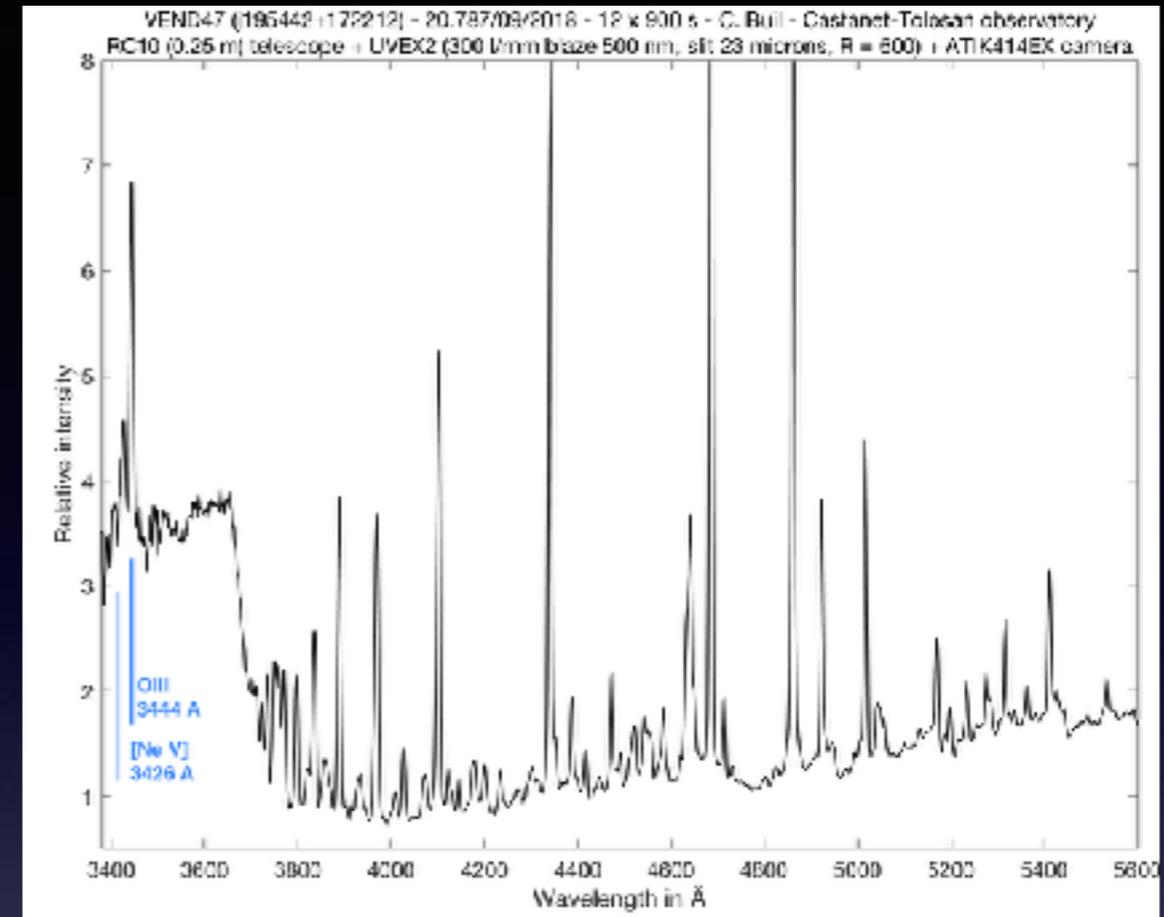
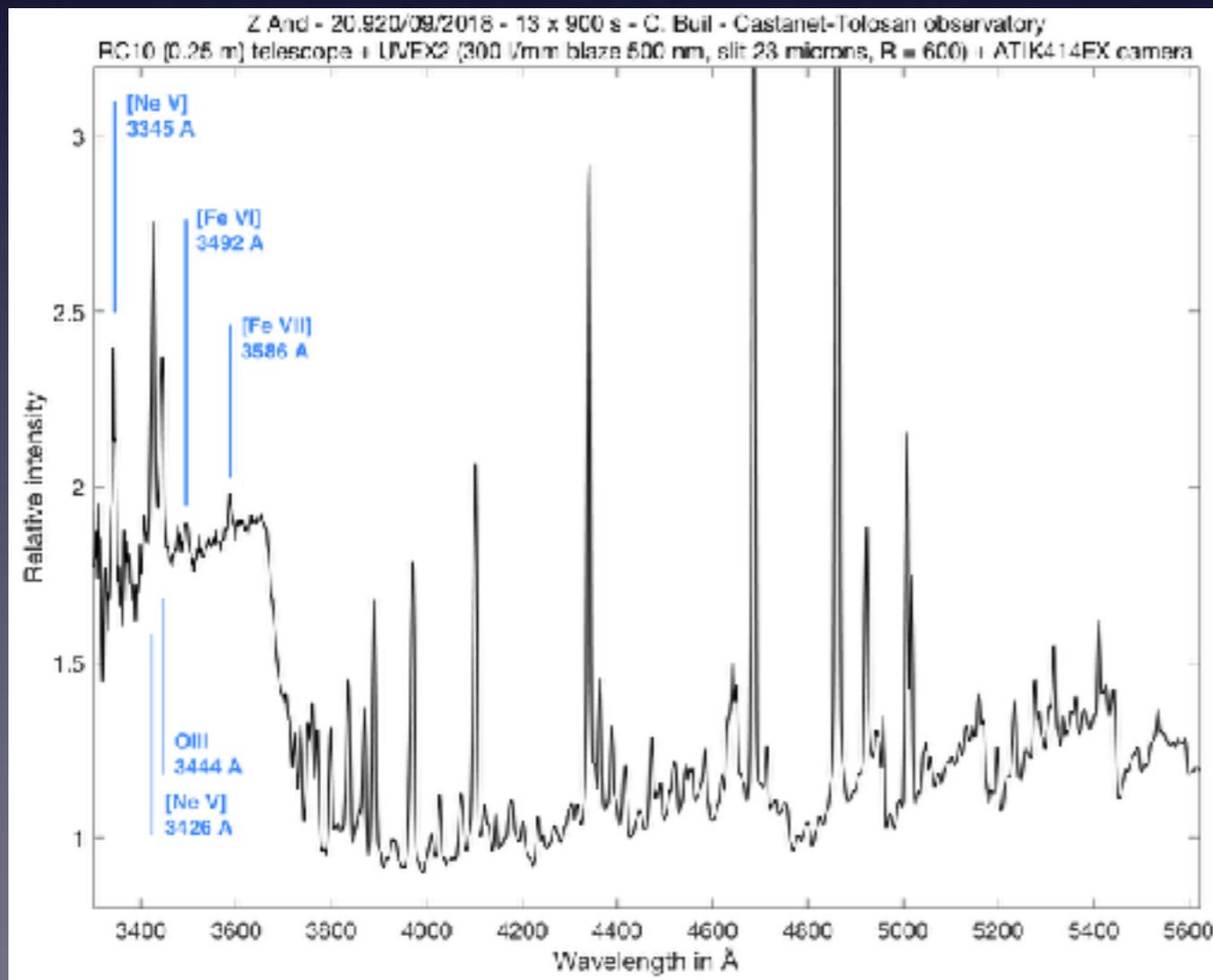
Vue d'artiste (Meilland 2007) d'une étoile Be : étoile en rotation rapide (vitesse critique), éjection intermittente de matière, disque circumstellaire...



Chez les amateurs, seul UVEX permet ce type d'observation actuellement

# Projet UVEX

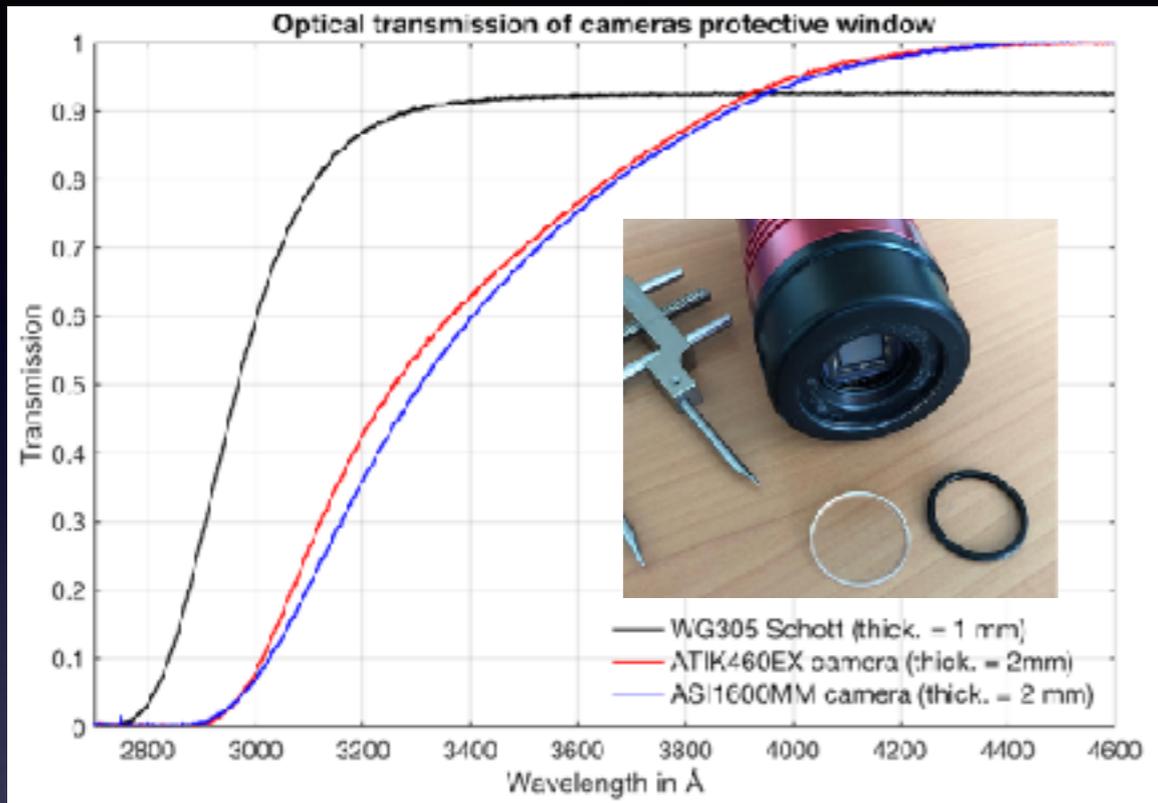
Observation UV et IR des étoiles symbiotiques



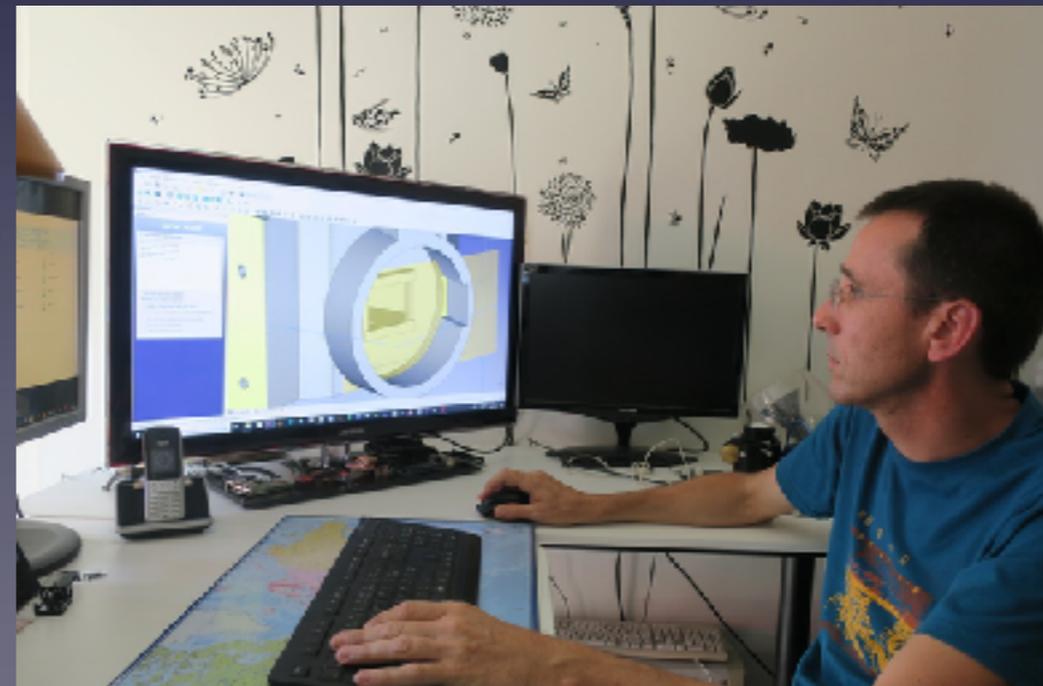
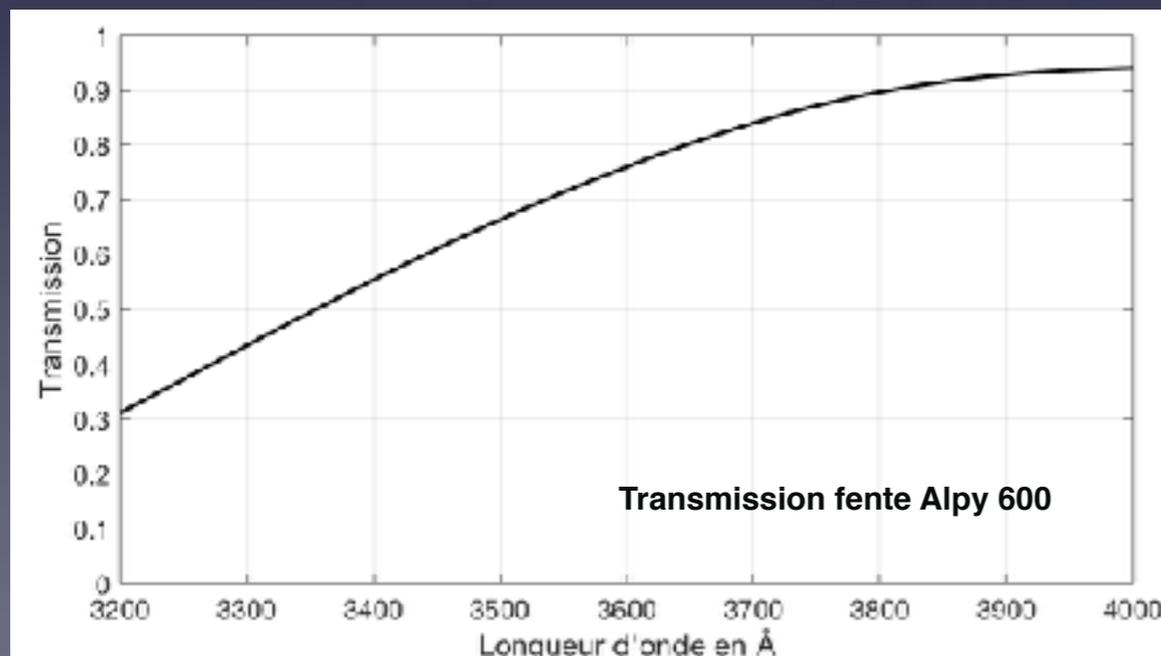
# Projet UVEX

## La chasse au gaspillage...

Rendement spectrographe



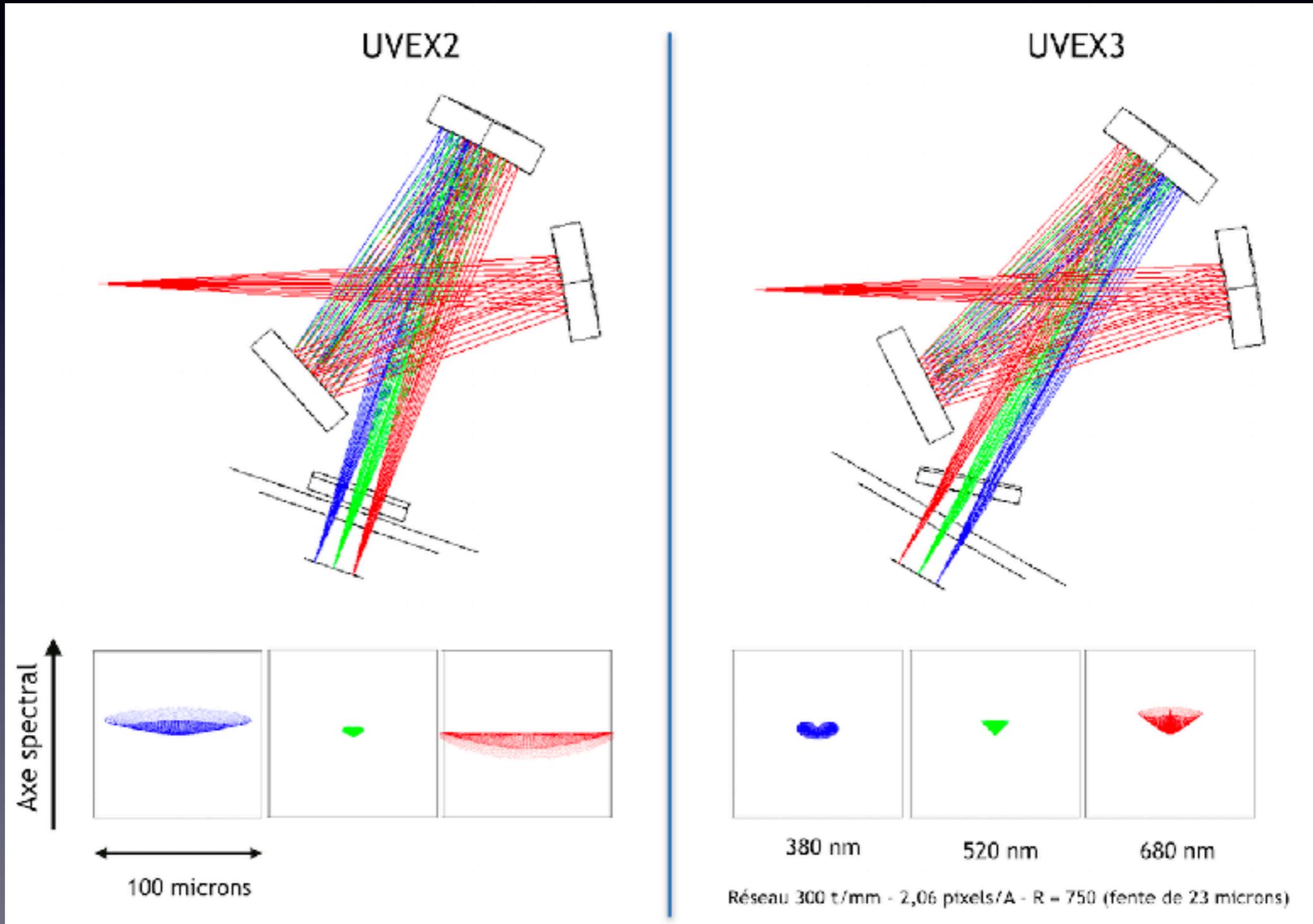
$\lambda$	LISA	ALPY 600	UVEX2	UVEX3
4500	31 %	29 %	36 %	36 %
4000	17 %	19 %	22 %	23 %
3800	8 %	9 %	16 %	19 %
3500	0 %	1 %	3 %	6 %



Lancement du prototype UVEX3...

# Projet UVEX

En marche vers UVEX3 !



Nouvelle formule optique optimisée : réduction de l'astigmatisme, augmentation tirage...



Merci pour votre attention !



<http://astrosurf.com/aras/>