

Percer les secrets
des étoiles avec
votre télescope

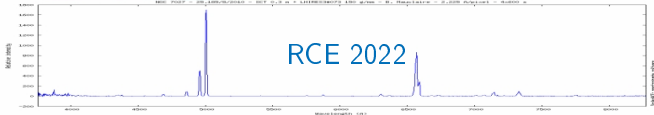
B. Mauclaire

La spectro,
késako ?

Pourquoi les
nébuleuses
planétaires sont
vertes ?

Presque tout
connaître des
étoiles binaires

Percer les secrets des étoiles avec votre télescope



1. La spectro, késako ?

Percer les secrets
des étoiles avec
votre télescope

B. Mauclaire

La spectro,
késako ?

Pourquoi les
nébuleuses
planétaires sont
vertes ?

Presque tout
connaître des
étoiles binaires

Décomposition la lumière blanche



Percer les secrets
des étoiles avec
votre télescope

B. Mauclaire

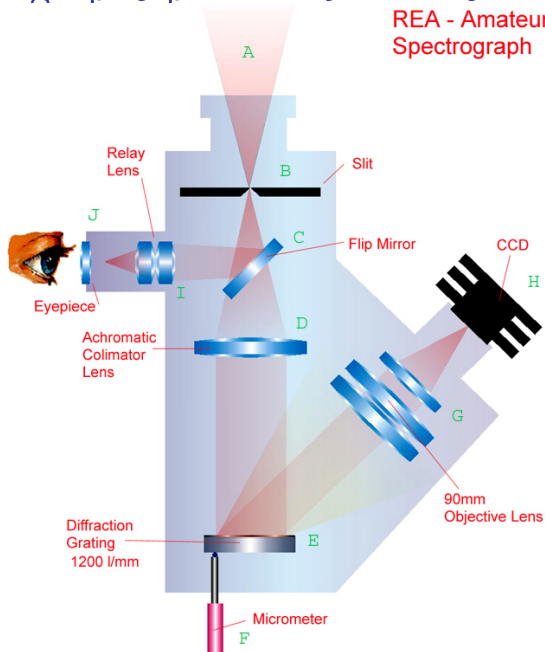
La spectro,
késako ?

Pourquoi les
nébuleuses
planétaires sont
vertes ?

Presque tout
connaître des
étoiles binaires

Spectrographe pour l'astronomie

REA - Amateur
Spectrograph



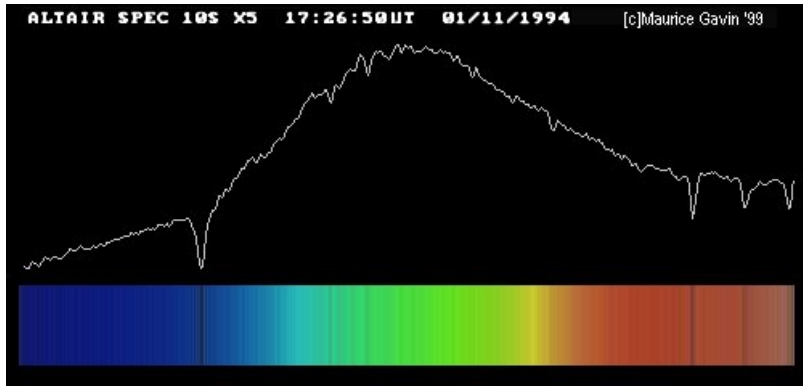
Cela marche aussi sur la lumière des étoiles

B. Mauclaire

La spectro,
késako ?

Pourquoi les
nébuleuses
planétaires sont
vertes ?

Presque tout
connaître des
étoiles binaires



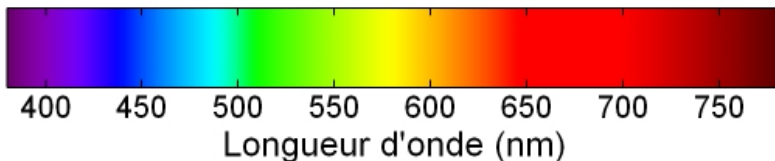
Percer les secrets des étoiles avec votre télescope

La spectro, késako ?

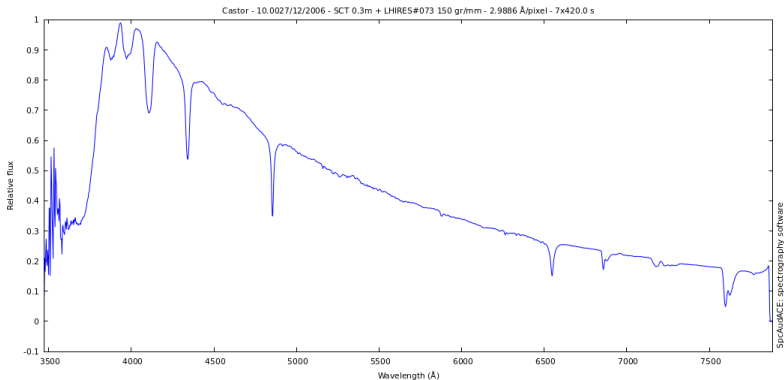
Pourquoi les nébuleuses planétaires sont vertes ?

Presque tout connaître des étoiles binaires

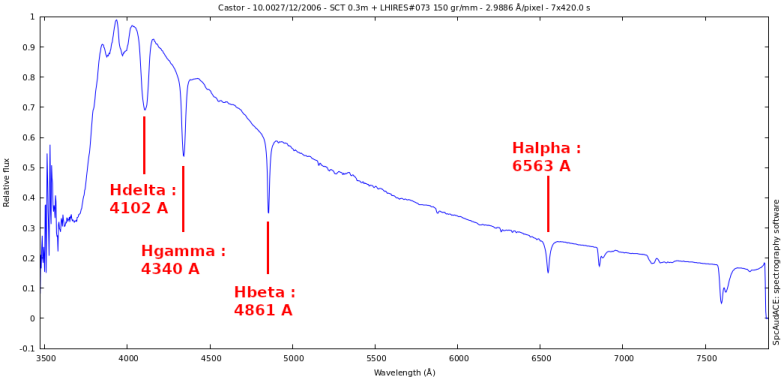
La longueur d'onde : repérage des couleurs



Profil de raies (spectre 1D)



Les raies de Balmer de l'hydrogène



2. Pourquoi les nébuleuses planétaires sont vertes ?

Percer les secrets
des étoiles avec
votre télescope

B. Mauclaire

La spectro,
késako ?

Pourquoi les
nébuleuses
planétaires sont
vertes ?

Presque tout
connaître des
étoiles binaires

Le vert des nébuleuses planétaires



NGC 6543 ; Julien QUIRIN ; 21 08 2018 ; Champ du feu

Percer les secrets
des étoiles avec
votre télescope

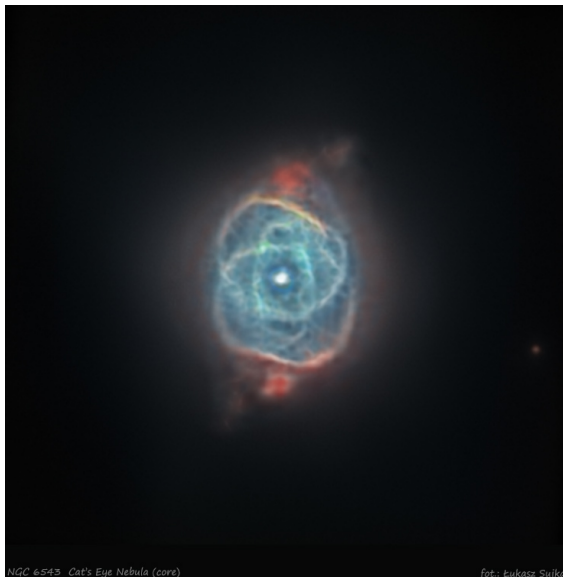
B. Mauclaire

La spectro,
késako ?

Pourquoi les
nébuleuses
planétaires sont
vertes ?

Presque tout
connaître des
étoiles binaires

Mais aussi du rouge



Percer les secrets
des étoiles avec
votre télescope

B. Mauclaire

La spectro,
késako ?

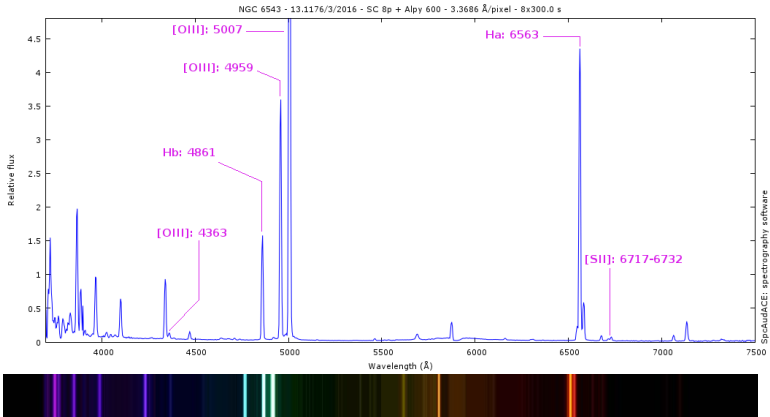
Pourquoi les
nébuleuses
planétaires sont
vertes ?

Presque tout
connaître des
étoiles binaires

Révélation par le spectre



Identification des raies



Température et densité électronique

- Les nébuleuses planétaires ainsi que les régions HII sont principalement constituées d'hydrogène, d'oxygène, d'azote et d'hélium.

Température et densité électronique

- Les nébuleuses planétaires ainsi que les régions HII sont principalement constituées d'hydrogène, d'oxygène, d'azote et d'hélium.
- Ensuite, les ions O^{++} , N^+ ... sont excités par le rayonnement UV de l'étoile centrale (de type spectral O ou WRC) et peuvent réémettre lors de leur désexcitation. Dans les nébuleuses possédant des raies [OIII], c'est une cascade d'excitation-désexcitation partant de l'hydrogène jusqu'au ions O^{++} qui s'opère via des collisions.

Température et densité électronique

- Les nébuleuses planétaires ainsi que les régions HII sont principalement constituées d'hydrogène, d'oxygène, d'azote et d'hélium.
- Ensuite, les ions O^{++} , N^+ ... sont excités par le rayonnement UV de l'étoile centrale (de type spectral O ou WRC) et peuvent réémettre lors de leur désexcitation. Dans les nébuleuses possédant des raies [OIII], c'est une cascade d'excitation-désexcitation partant de l'hydrogène jusqu'au ions O^{++} qui s'opère via des collisions.
- Si les ions O^{++} n'absorberaient pas des chocs et du rayonnement, la température "électronique" (agitation des électrons du plasma, le gaz ionisé) de la nébuleuse serait infinie. Ces ions sont des agents de refroidissement.

Température et densité électronique

- Raies de [OIII] et Te (Acker 2005) :

$$T_e \simeq \frac{3.29}{\ln \left(\frac{1}{3.32} \cdot \frac{I_{\lambda_{4959}} + I_{\lambda_{5007}}}{I_{\lambda_{4363}}} \right)}$$

Température et densité électronique

- Raies de [OIII] et Te (Acker 2005) :

$$Te \simeq \frac{3.29}{\ln \left(\frac{1}{3.32} \cdot \frac{I_{\lambda_{4959}} + I_{\lambda_{5007}}}{I_{\lambda_{4363}}} \right)}$$

- Raies de [SII] et Ne (Acker 2005) :

$$Ne = \frac{100 \cdot \sqrt{Te} \cdot \left(\frac{I_{6717}}{I_{6731}} - 1.49 \right)}{5.617 - 12.8 \cdot \frac{I_{6717}}{I_{6731}}}$$

Température et densité électronique (NP)

1. Déroutissement du spectre (extinction interstellaire du bleu) :

Température et densité électronique (NP)

1. Déroutissement du spectre (extinction interstellaire du bleu) :

▶ `spc_dereddening nom_spectre
largeur_Ha_Hb ?largeur_Hb?`

Température et densité électronique (NP)

1. Dérougisement du spectre (extinction interstellaire du bleu) :
 - ▶ `spc_dereddening nom_spectre`
`largeur_Ha_Hb ?largeur_Hb?`
 - ▶ La largeur est à mesurer sur la base de la raie.

Température et densité électronique (NP)

1. Déroutissement du spectre (extinction interstellaire du bleu) :
 - ▶ `spc_dereddening nom_spectre
largeur_Ha_Hb ?largeur_Hb?`
 - ▶ La largeur est à mesurer sur la base de la raie.
2. Mesure de Te et Ne sur le spectre dérougit :

Température et densité électronique (NP)

1. Déroutissement du spectre (extinction interstellaire du bleu) :
 - ▶ `spc_dereddening nom_spectre
largeur_Ha_Hb ?largeur_Hb?`
 - ▶ La largeur est à mesurer sur la base de la raie.
2. Mesure de Te et Ne sur le spectre dérougit :
 - ▶ `spc_tene spectre_derougit
largeur_raies_4959-5007
largeur_raies_4363 largeur_6717
largeur_6732`

Température et densité électronique (NP)

1. Dérougissement du spectre (extinction interstellaire du bleu) :
 - ▶ `spc_dereddening nom_spectre
largeur_Ha_Hb ?largeur_Hb?`
 - ▶ La largeur est à mesurer sur la base de la raie.
2. Mesure de Te et Ne sur le spectre dérougit :
 - ▶ `spc_tene spectre_derougite
largeur_raies_4959-5007
largeur_raies_4363 largeur_6717
largeur_6732`
3. Comparer les valeurs à celles de la littérature en tenant compte de l'incertitude obtenue.

Température et densité électronique (NP)

- 1) `spc_dereddening ngc_6543_20160313_1176.fit`
22 15

Température et densité électronique (NP)

- 1) `spc_dereddening ngc_6543_20160313_1176.fit`
`22 15`
- # Initials flux: Ha=527.67 ADU.A ; Hb=151.68 ADU.A ;
Ha/Hb=3.48
Dereddaded flux: Ha=432.37 ADU.A ; Hb=151.68 ADU.A
Balmer decrement: Ha/Hb=2.85 ; d34_theoric=2.85
Interstellar extinction coefficient: c=0.261622830469 ;
E(B-V)=0.179193719499 (*c_{litterature} = 0.3 ± 0.1*)
Dereddened spectrum: `ngc_6543_20160313_1176_dered.fit`

Température et densité électronique (NP)

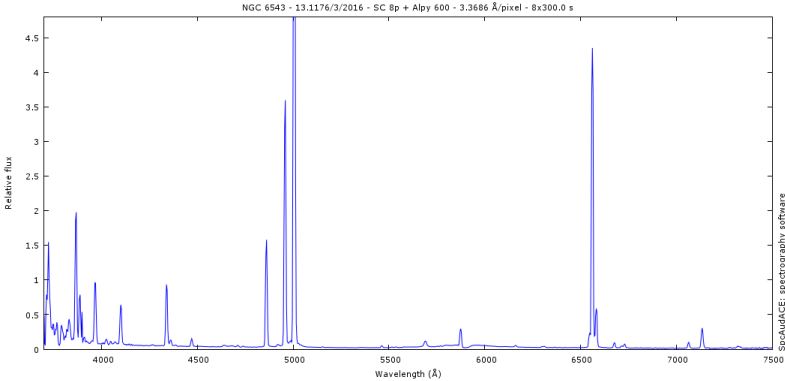
- 1) `spc_dereddening ngc_6543_20160313_1176.fit`
`22 15`
- # Initials flux: Ha=527.67 ADU.A ; Hb=151.68 ADU.A ;
Ha/Hb=3.48
Dereddaded flux: Ha=432.37 ADU.A ; Hb=151.68 ADU.A
Balmer decrement: Ha/Hb=2.85 ; d34_theoric=2.85
Interstellar extinction coefficient: $c=0.261622830469$;
 $E(B-V)=0.179193719499$ (*clitterature* = 0.3 ± 0.1)
Dereddened spectrum: `ngc_6543_20160313_1176_dered.fit`
- Les recherches bibliographiques (notamment S. Hyung et al. - 2000) donnent $c=0.3 \pm 0.1$.

La spectro,
c'est quoi ?

Pourquoi les
nébuleuses
planétaires sont
vertes ?

Presque tout
connaître des
étoiles binaires

Spectre traité

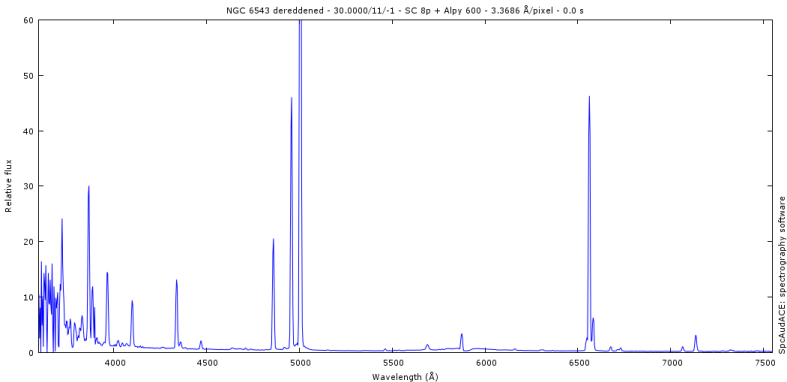


La spectro,
c'est quoi ?

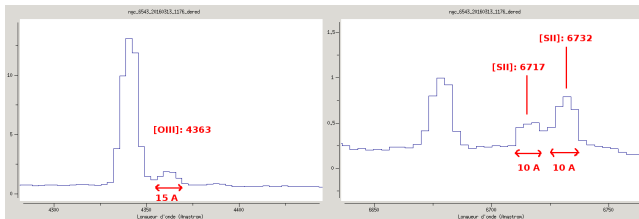
Pourquoi les
nébuleuses
planétaires sont
vertes ?

Presque tout
connaître des
étoiles binaires

Spectre traité et dérougi

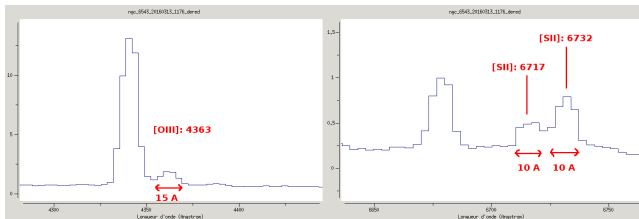


Température et densité électronique (NP)



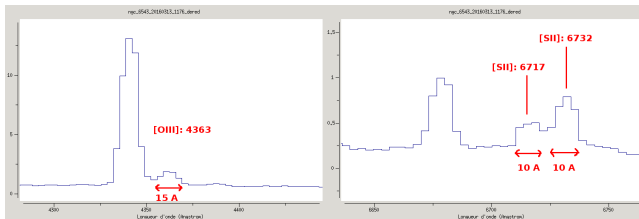
- 2a) `spc_tene ngc_6543_20160313_1176_dered.fit`
17 15 12 12

Température et densité électronique (NP)



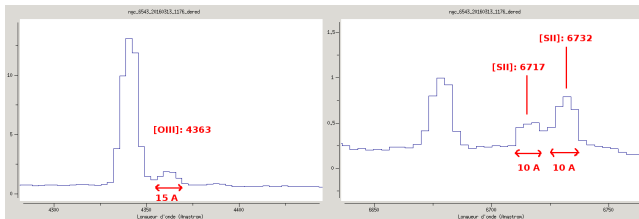
- 2a) `spc_tene ngc_6543_20160313_1176_dered.fit`
17 15 12 12
- # $R(\text{OIII})=236.809862552$; $T_e=9825 \pm 436$ K
$R(\text{SII})=0.53595464573$; $N_e=7625 \pm 2905 \text{ cm}^{-3}$

Température et densité électronique (NP)



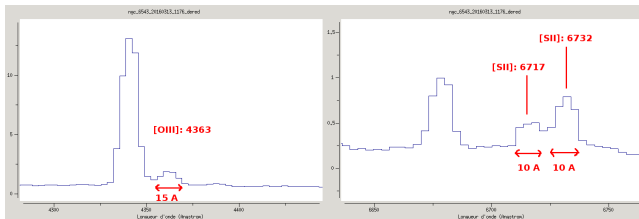
- 2a) `spc_tene ngc_6543_20160313_1176_dered.fit`
17 15 12 12
- # R(OIII)=236.809862552 ; $T_e=9825 \pm 436$ K
R(SII)=0.53595464573 ; $N_e=7625 \pm 2905 \text{ cm}^{-3}$
- 2b) `spc_tene ngc_6543_20160313_1176_dered.fit`
17 15 10 10

Température et densité électronique (NP)



- 2a) `spc_tene ngc_6543_20160313_1176_dered.fit`
17 15 12 12
- # R(OIII)=236.809862552 ; $T_e=9825 \pm 436$ K
R(SII)=0.53595464573 ; $N_e=7625 \pm 2905 \text{ cm}^{-3}$
- 2b) `spc_tene ngc_6543_20160313_1176_dered.fit`
17 15 10 10
- # R(OIII)=236.809862552 ; $T_e=9825 \pm 436$ K
R(SII)=0.53595464573 ; $N_e=7625 \pm 1610 \text{ cm}^{-3}$

Température et densité électronique (NP)



- 2a) `spc_tene ngc_6543_20160313_1176_dered.fit`
17 15 12 12
- # R(OIII)=236.809862552 ; $T_e=9825 \pm 436$ K
R(SII)=0.53595464573 ; $N_e=7625 \pm 2905 \text{ cm}^{-3}$
- 2b) `spc_tene ngc_6543_20160313_1176_dered.fit`
17 15 10 10
- # R(OIII)=236.809862552 ; $T_e=9825 \pm 436$ K
R(SII)=0.53595464573 ; $N_e=7625 \pm 1610 \text{ cm}^{-3}$
- 3) $T_{\text{litterature}} = 9600 \text{ K}$; $N_{\text{litterature}} = (5 \pm 3) \cdot 10^3 \text{ cm}^{-3}$

3. Presque tout connaître des étoiles binaires

Percer les secrets
des étoiles avec
votre télescope

B. Mauclaire

La spectro,
késako ?

Pourquoi les
nébuleuses
planétaires sont
vertes ?

Presque tout
connaître des
étoiles binaires

Les étoiles binaires



Les types d'étoiles binaires

- Les étoiles binaires sont des systèmes d'étoiles serrées

Les types d'étoiles binaires

- Les étoiles binaires sont des systèmes d'étoiles serrées
- Lorsqu'on ne peut les distinguer visuellement (binaires spectroscopiques), seul l'étude du spectre permet d'obtenir des informations

Les types d'étoiles binaires

- Les étoiles binaires sont des systèmes d'étoiles serrées
- Lorsqu'on ne peut les distinguer visuellement (binaires spectroscopiques), seul l'étude du spectre permet d'obtenir des informations
- SB1=binaires à 1 spectre : seul le mouvement des raies de l'étoile la plus brillante peut être mesuré (étoiles hôtes d'exoplanètes)

Les types d'étoiles binaires

- Les étoiles binaires sont des systèmes d'étoiles serrées
- Lorsqu'on ne peut les distinguer visuellement (binaires spectroscopiques), seul l'étude du spectre permet d'obtenir des informations
- SB1=binaires à 1 spectre : seul le mouvement des raies de l'étoile la plus brillante peut être mesuré (étoiles hôtes d'exoplanètes)
- SB2=binaires à 2 spectres : les raies des deux composantes sont vues.

Les types d'étoiles binaires

- Les étoiles binaires sont des systèmes d'étoiles serrées
- Lorsqu'on ne peut les distinguer visuellement (binaires spectroscopiques), seul l'étude du spectre permet d'obtenir des informations
- SB1=binaires à 1 spectre : seul le mouvement des raies de l'étoile la plus brillante peut être mesuré (étoiles hôtes d'exoplanètes)
- SB2=binaires à 2 spectres : les raies des deux composantes sont vues.
- SB3=systèmes à 3 composantes stellaires (rares)

Les types d'étoiles binaires

- Les étoiles binaires sont des systèmes d'étoiles serrées
- Lorsqu'on ne peut les distinguer visuellement (binaires spectroscopiques), seul l'étude du spectre permet d'obtenir des informations
- SB1=binaires à 1 spectre : seul le mouvement des raies de l'étoile la plus brillante peut être mesuré (étoiles hôtes d'exoplanètes)
- SB2=binaires à 2 spectres : les raies des deux composantes sont vues.
- SB3=systèmes à 3 composantes stellaires (rares)
- Nous étudierons les SB2 car le spectre contient les informations spectrales de deux étoiles

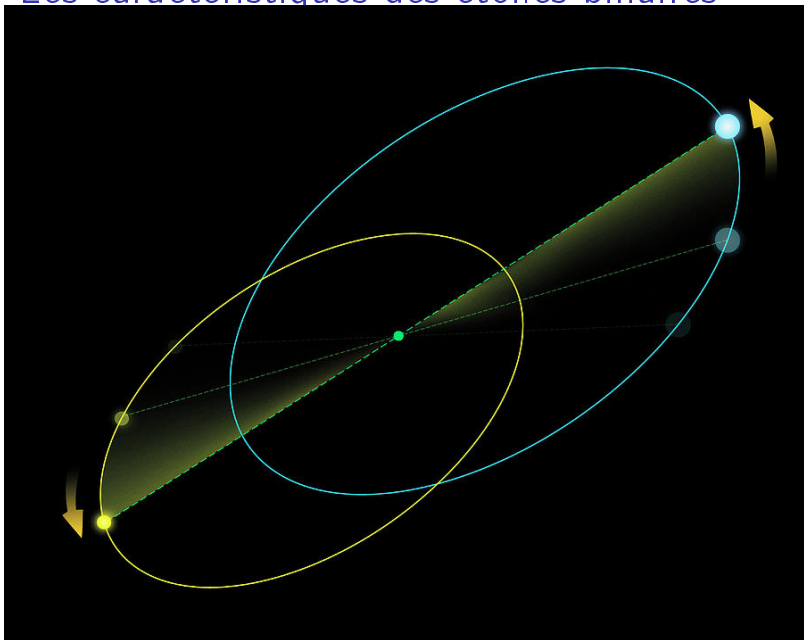
Les caractéristiques des étoiles binaires

B. Mauclaire

La spectro,
késako?

Pourquoi les
nébuleuses
planétaires sont
vertes?

Presque tout
connaître des
étoiles binaires



Les caractéristiques des étoiles binaires

- On mesure les vitesses radiales dans une raie pour les 2 composantes.

Les caractéristiques des étoiles binaires

- On mesure les vitesses radiales dans une raie pour les 2 composantes.
- On trace les 2 courbes $V = f(t)$ et l'on mesure leur amplitude K_A et K_B

Les caractéristiques des étoiles binaires

- On mesure les vitesses radiales dans une raie pour les 2 composantes.
- On trace les 2 courbes $V = f(t)$ et l'on mesure leur amplitude K_A et K_B
- Masse des 2 étoiles (composantes) :

$$M_A \sin^3 i = (K_A + K_B)^2 K_B \frac{(1 - e^2)^{\frac{3}{2}}}{2\pi G}$$

Les caractéristiques des étoiles binaires

- On mesure les vitesses radiales dans une raie pour les 2 composantes.
- On trace les 2 courbes $V = f(t)$ et l'on mesure leur amplitude K_A et K_B
- Masse des 2 étoiles (composantes) :

$$M_A \sin^3 i = (K_A + K_B)^2 K_B \frac{(1 - e^2)^{\frac{3}{2}}}{2\pi G}$$

- Demi-grand axe a des 2 ellipses :

$$a_A \sin i = \frac{T}{2\pi} \sqrt{1 - e^2} K_A$$

Les caractéristiques des étoiles binaires

- On mesure les vitesses radiales dans une raie pour les 2 composantes.
- On trace les 2 courbes $V = f(t)$ et l'on mesure leur amplitude K_A et K_B
- Masse des 2 étoiles (composantes) :

$$M_A \sin^3 i = (K_A + K_B)^2 K_B \frac{(1 - e^2)^{\frac{3}{2}}}{2\pi G}$$

- Demi-grand axe a des 2 ellipses :

$$a_A \sin i = \frac{T}{2\pi} \sqrt{1 - e^2} K_A$$

- 4 équations et 4 inconnues.

Les caractéristiques des étoiles binaires

- On mesure les vitesses radiales dans une raie pour les 2 composantes.
- On trace les 2 courbes $V = f(t)$ et l'on mesure leur amplitude K_A et K_B
- Masse des 2 étoiles (composantes) :

$$M_A \sin^3 i = (K_A + K_B)^2 K_B \frac{(1 - e^2)^{\frac{3}{2}}}{2\pi G}$$

- Demi-grand axe a des 2 ellipses :

$$a_A \sin i = \frac{T}{2\pi} \sqrt{1 - e^2} K_A$$

- 4 équations et 4 inconnues.
- Excentricité e et inclinaison i : par ajustement de $V = f(t)$ + hypothèse sur i

Les caractéristiques des étoiles binaires

- On mesure les vitesses radiales dans une raie pour les 2 composantes.
- On trace les 2 courbes $V = f(t)$ et l'on mesure leur amplitude K_A et K_B
- Masse des 2 étoiles (composantes) :

$$M_A \sin^3 i = (K_A + K_B)^2 K_B \frac{(1 - e^2)^{\frac{3}{2}}}{2\pi G}$$

- Demi-grand axe a des 2 ellipses :

$$a_A \sin i = \frac{T}{2\pi} \sqrt{1 - e^2} K_A$$

- 4 équations et 4 inconnues.
- Excentricité e et inclinaison i : par ajustement de $V = f(t)$ + hypothèse sur i
- Rayons et luminosités : par photométrie.

Percer les secrets
des étoiles avec
votre télescope

B. Mauclaire

La spectro,
c'est quoi ?

Pourquoi les
nébuleuses
planétaires sont
vertes ?

Presque tout
connaître des
étoiles binaires

Évolution des raies spectrales

Crédit : <http://www.odysseespace.fr/>

Percer les secrets
des étoiles avec
votre télescope

B. Mauclaire

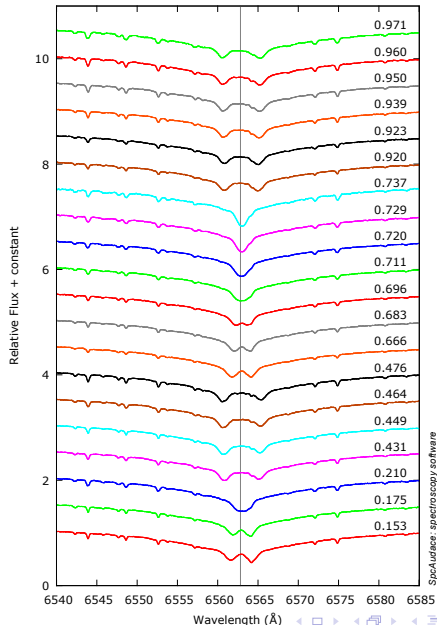
La spectro,
c'est quoi ?

Pourquoi les
nébuleuses
planétaires sont
vertes ?

Presque tout
connaître des
étoiles binaires

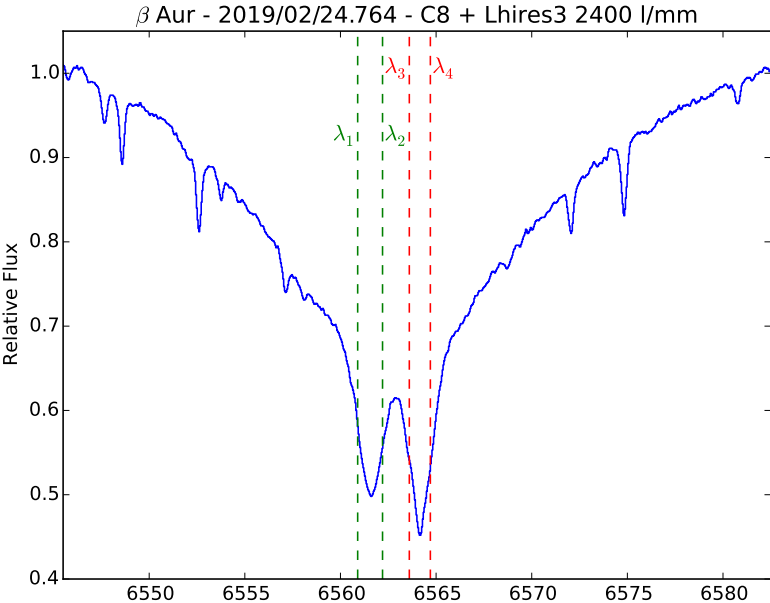
Évolution des raies spectrales

Time evolution of menkalinan1 from 2458539.2645 to 2458542.5037

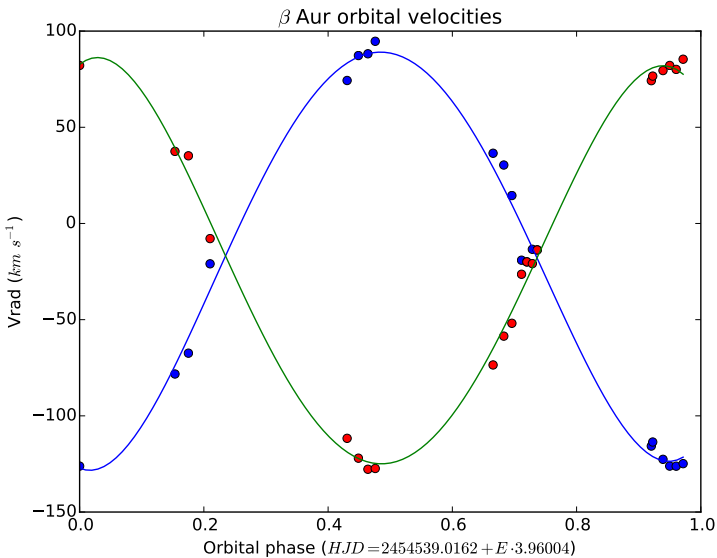


SpcAurace - spectroscopy software

Mesure des vitesses des 2 composantes



Tracé de la vitesse des 2 étoiles



Calcul des masses et rayons orbitaux

```
./rv_analysis.py bet_aur_date_phase_vr.csv 4
```

```
**** Binary spectroscopic stars Analyser (B. Mauclaire - 2019) ****
```

```
Vr1 half amplitude : 106.609232936 km/s
```

```
Vr2 half amplitude : 103.084453756 km/s
```

```
Vrad mean (binary system) : -14.3660026545 km/s
```

```
Period = 3.89926080184 d.
```

```
*** Case of circular orbits with  $i \sim 90^\circ$ :
```

```
M1 = 1.8314070425  $M_\odot$  ;  $r_1 = 0.0382107502172$  a.u. = 8.216539989  $R_\odot$ 
```

```
M2 = 1.89402856474  $M_\odot$  ;  $r_2 = 0.0369474031964$  a.u. = 7.94487975576  $R_\odot$ 
```

```
R =  $r_1 + r_2 = 11243499.7164$  km = 0.0751581534137 a.u. = 16.1614197448  $R_\odot$ 
```

```
M2/M1 = 1.0341931208 ; M1/M2 = 0.966937392916
```

```
*** Case of elliptic orbit with given excentricity e:
```

```
Excentricity used for computation: 0
```

```
M1sini3 = 1.8314070425  $M_\odot$ 
```

```
a1sini = 5716246.87035 km = 0.0382107502172 a.u. = 8.216539989  $R_\odot$ 
```

```
M2sini3 = 1.89402856474  $M_\odot$ 
```

```
a2sini = 5527252.84608 km = 0.0369474031964 a.u. = 7.94487975576  $R_\odot$ 
```

```
M2/M1 = 1.0341931208 ; M1/M2 = 0.966937392916
```

Conclusion

- Toutes les tâches de réduction spectrale doivent être réalisées par un pipeline

Conclusion

- Toutes les tâches de réduction spectrale doivent être réalisées par un pipeline
- Éviter les interventions de l'opérateur : gain de temps et de fiabilité.

Conclusion

- Toutes les tâches de réduction spectrale doivent être réalisées par un pipeline
- Éviter les interventions de l'opérateur : gain de temps et de fiabilité.
- Le contrôle de la qualité : résultats intermédiaires et mots clé ou log.

Conclusion

- Toutes les tâches de réduction spectrale doivent être réalisées par un pipeline
- Éviter les interventions de l'opérateur : gain de temps et de fiabilité.
- Le contrôle de la qualité : résultats intermédiaires et mots clé ou log.
- Les outils de mesure doivent produire **une estimation de son erreur.**

Conclusion

- Toutes les tâches de réduction spectrale doivent être réalisées par un pipeline
- Éviter les interventions de l'opérateur : gain de temps et de fiabilité.
- Le contrôle de la qualité : résultats intermédiaires et mots clé ou log.
- Les outils de mesure doivent produire **une estimation de son erreur.**
- Lire des publications sur la cible étudiée pour connaître la signification des grandeurs mesurées.

Conclusion

- Toutes les tâches de réduction spectrale doivent être réalisées par un pipeline
- Éviter les interventions de l'opérateur : gain de temps et de fiabilité.
- Le contrôle de la qualité : résultats intermédiaires et mots clé ou log.
- Les outils de mesure doivent produire **une estimation de son erreur.**
- Lire des publications sur la cible étudiée pour connaître la signification des grandeurs mesurées.
- Se concentrer sur un logiciel de manipulation de spectres pour le connaître à fond.

Conclusion

- Toutes les tâches de réduction spectrale doivent être réalisées par un pipeline
- Éviter les interventions de l'opérateur : gain de temps et de fiabilité.
- Le contrôle de la qualité : résultats intermédiaires et mots clé ou log.
- Les outils de mesure doivent produire **une estimation de son erreur.**
- Lire des publications sur la cible étudiée pour connaître la signification des grandeurs mesurées.
- Se concentrer sur un logiciel de manipulation de spectres pour le connaître à fond.
- Connaître quelques langages de scripting : Gnuplot, Python, ...

Conclusion

- Toutes les tâches de réduction spectrale doivent être réalisées par un pipeline
- Éviter les interventions de l'opérateur : gain de temps et de fiabilité.
- Le contrôle de la qualité : résultats intermédiaires et mots clé ou log.
- Les outils de mesure doivent produire **une estimation de son erreur.**
- Lire des publications sur la cible étudiée pour connaître la signification des grandeurs mesurées.
- Se concentrer sur un logiciel de manipulation de spectres pour le connaître à fond.
- Connaître quelques langages de scripting : Gnuplot, Python, ...
- À vous de jouer !