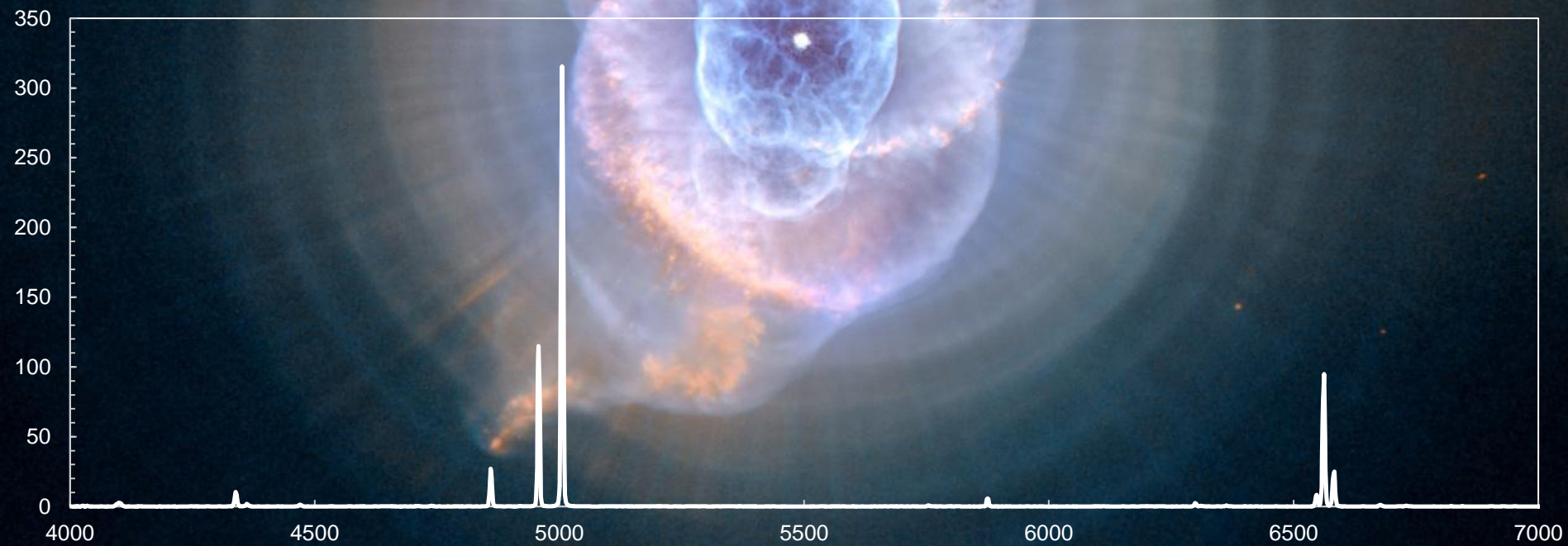


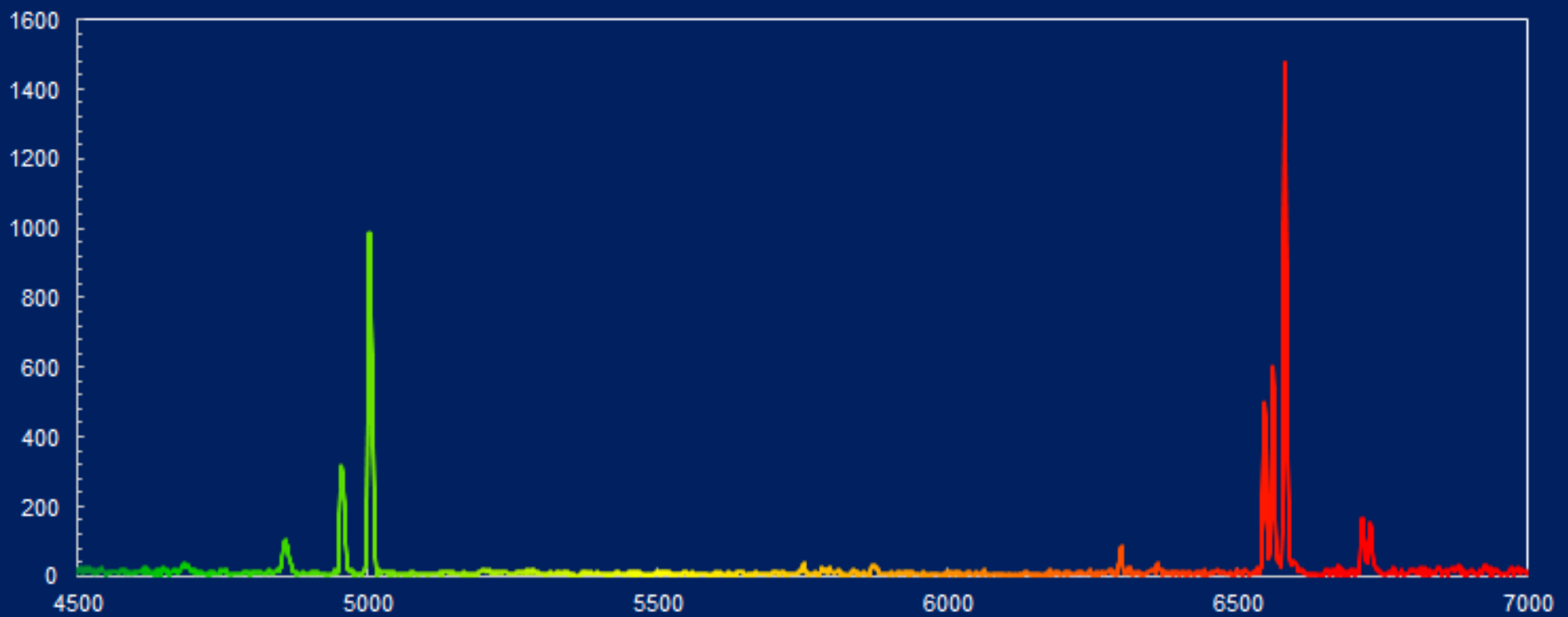
Spectroscopie des Nébuleuses Planétaires



The Cat's Eye Nebula — NGC 6543  HUBBLESITE.org

M76

« Little Dumbbell »



Spectroscopie des Nébuleuses Planétaires

1. Identification et formation des raies
2. Mesure des paramètres physiques
3. Diversité des nébuleuses planétaires – Classe d'excitation
4. Nébuleuse planétaire : une phase de la vie des étoiles $M < 8 M_{\odot}$
5. Discriminer les NP des autres objets à spectre d'émission
6. Intérêt de l'observation des NP en spectroscopie amateur
7. Références et annexes



1 Continuum absent ou très faible

2 Raies

- en émission Milieu chaud et dilué
- étroites Vitesse faible

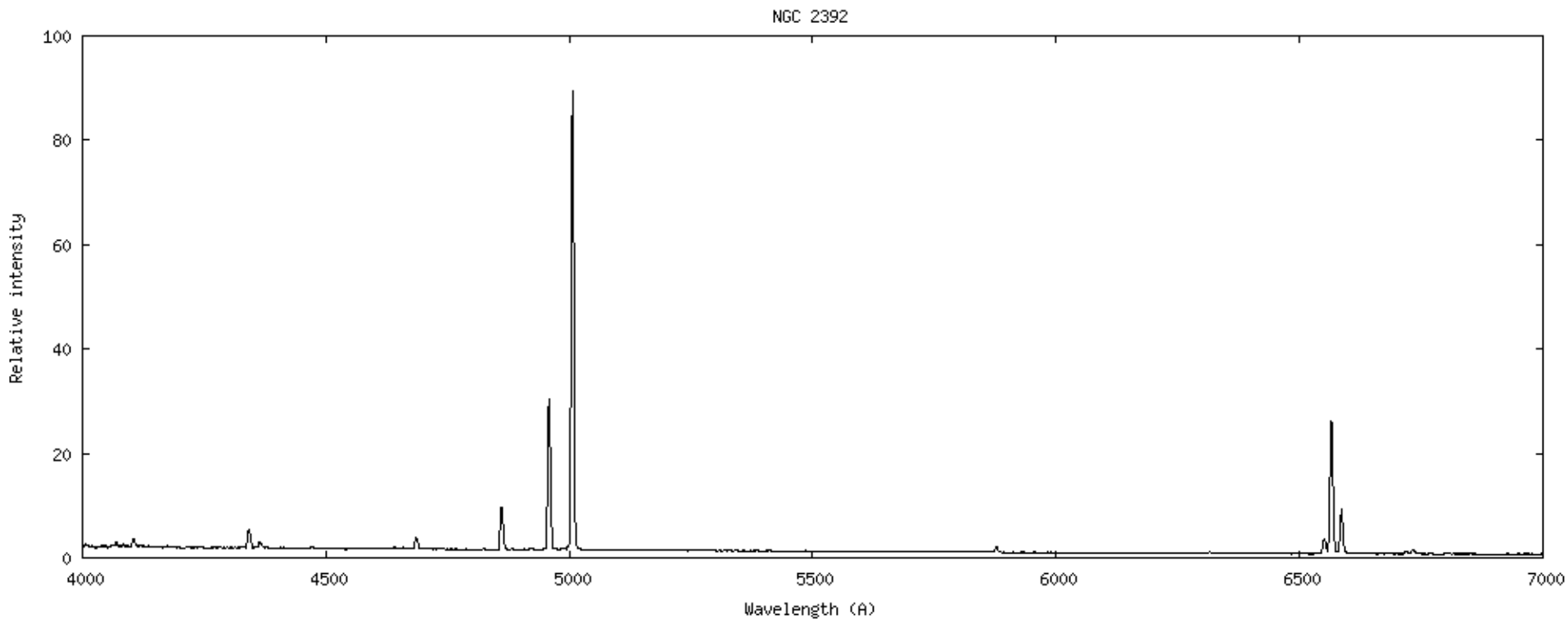
Longueur d'onde → Identification des éléments/ions

Intensités → Détermination des conditions physiques

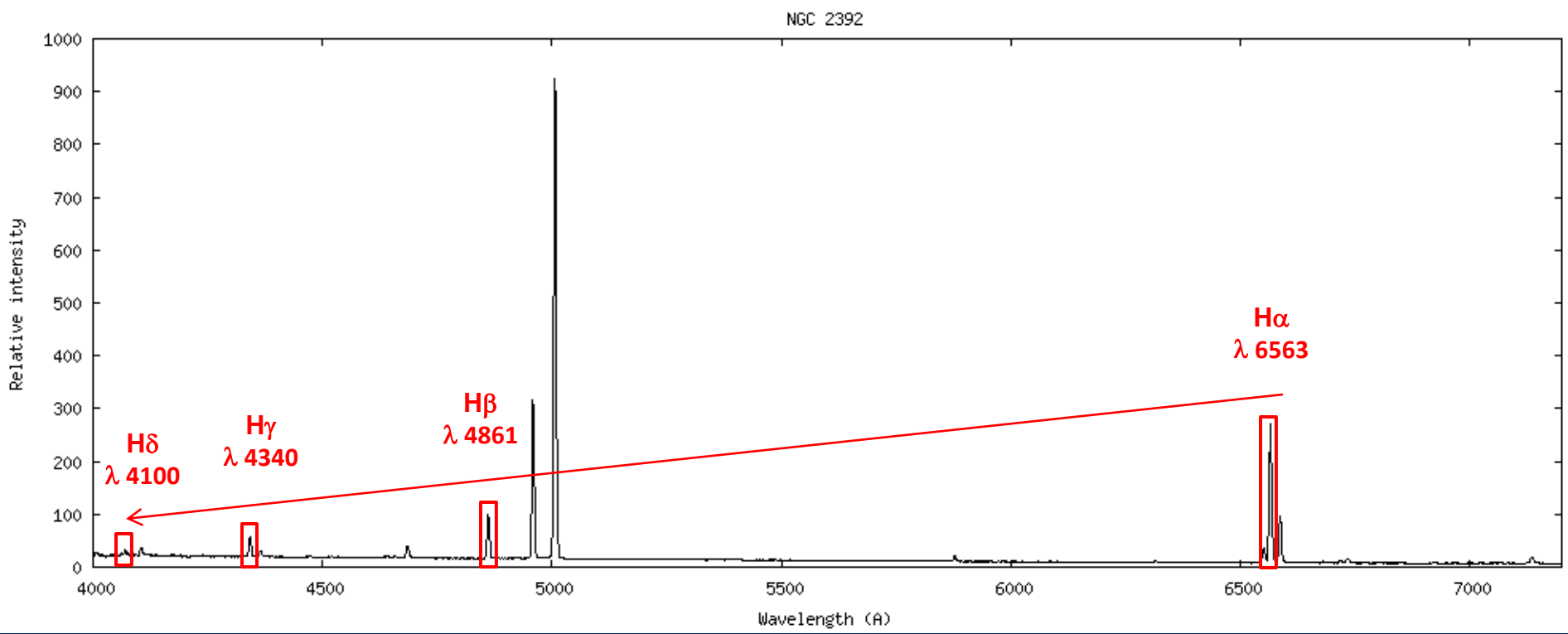
- Température

- Densité

NGC 2392



Série de Balmer



$I(H\alpha) > I(H\beta) > I(H\gamma) \dots$
= Décrément de Balmer

$I(H\alpha) / I(H\beta) \sim 2.87$

« Case B » :
Nébuleuse opaque aux rayons UV,
Transparente pour le rayonnement émis dans le visible ($4000 \text{ \AA} < \lambda < 7000 \text{ \AA}$)

H

I.P. = 13.6 eV

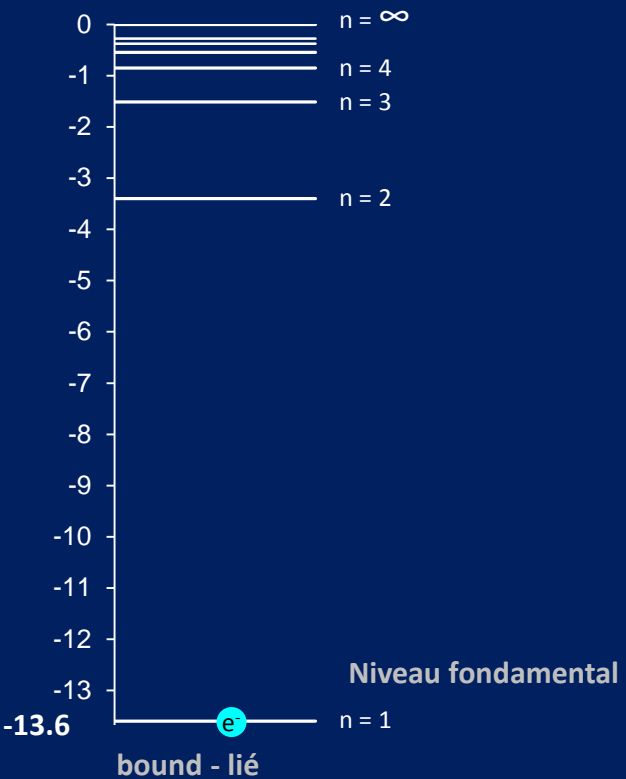
Recombinaison

Etat fondamental

$$E_n = - 13.6 \text{ eV} / n^2$$

E.I. = 13.6 eV

E [eV]



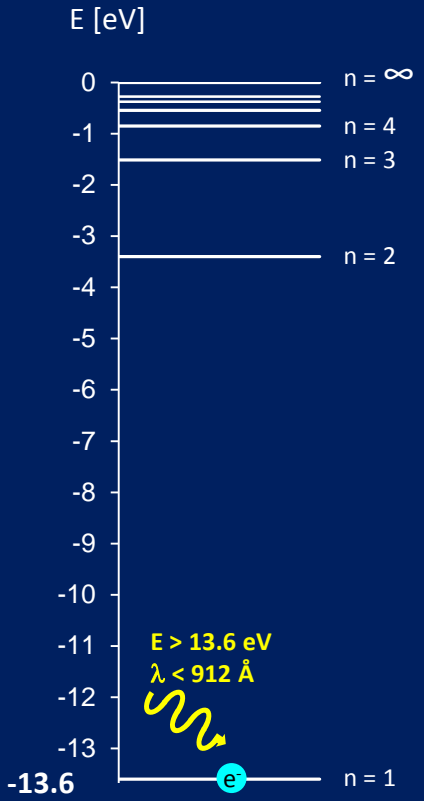
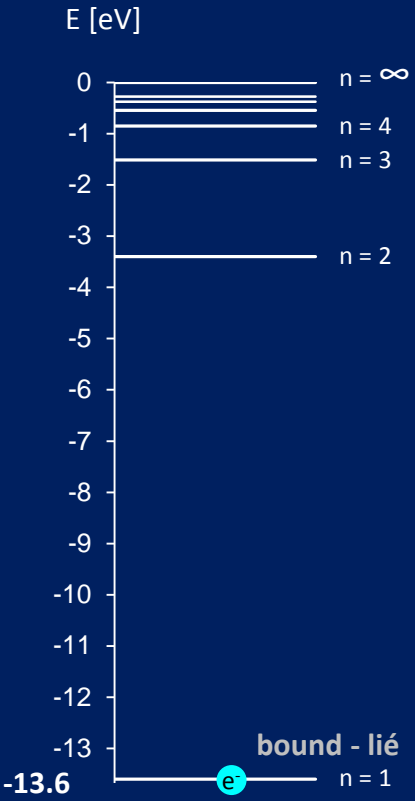
Cas B
Nébuleuse opaque aux UV
Interaction Photons UV/matière

Etat fondamental

$$E_n = -13.6 \text{ eV} / n^2$$

Ionisation $H \rightarrow H^+ + e^-$


free - libre

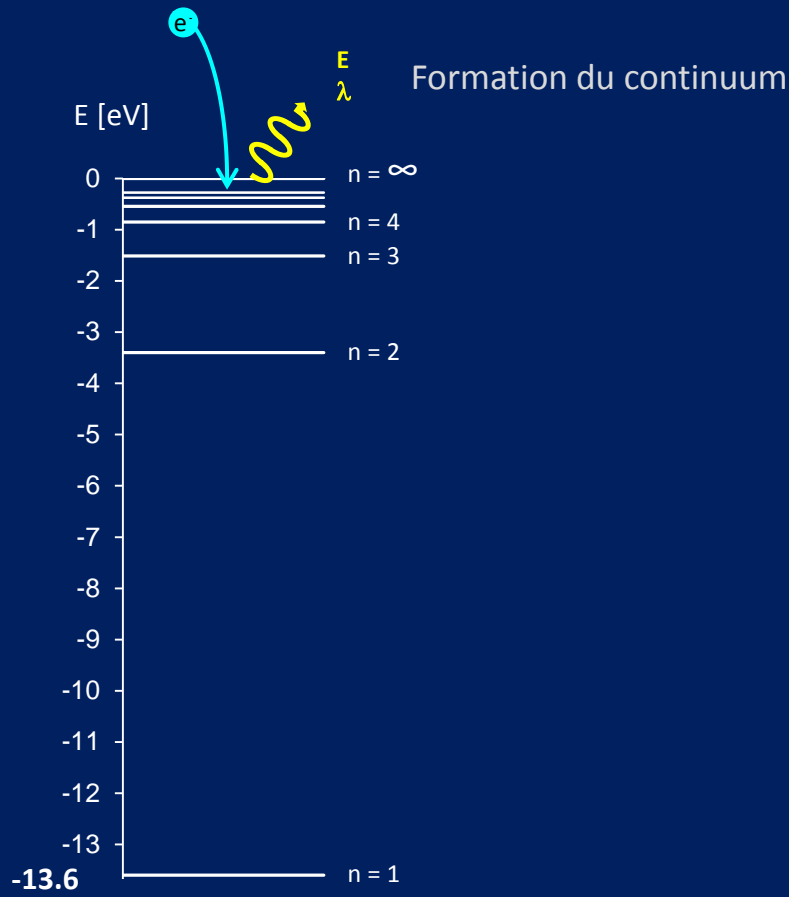
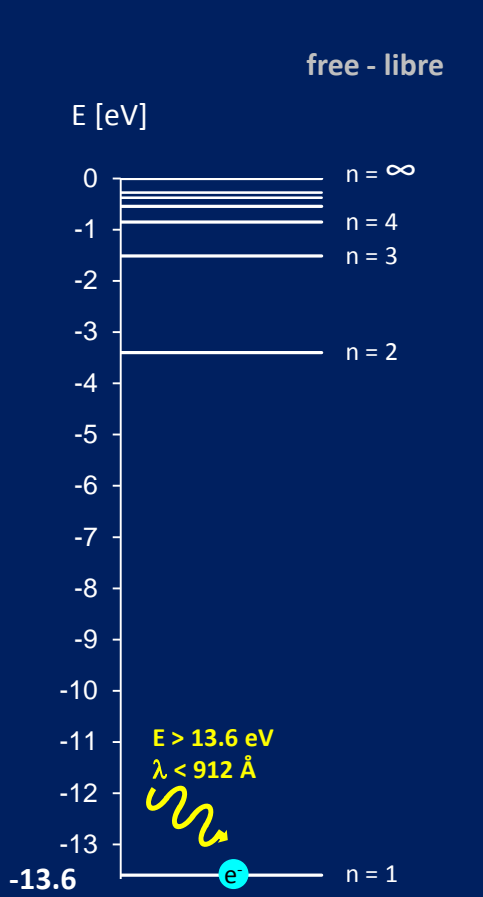
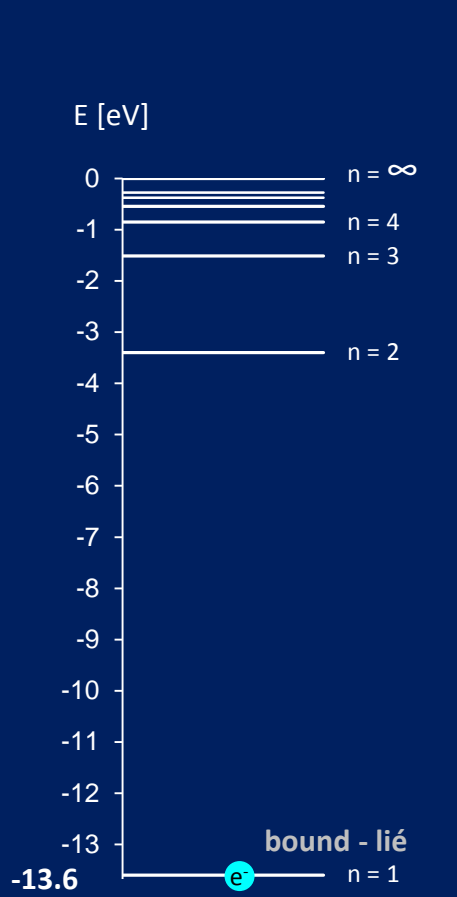


Etat fondamental

$$E_n = -13.6 \text{ eV} / n^2$$

Ionisation $H \rightarrow H^+ + e^-$

Recombinaison $H^+ + e^- \rightarrow H$



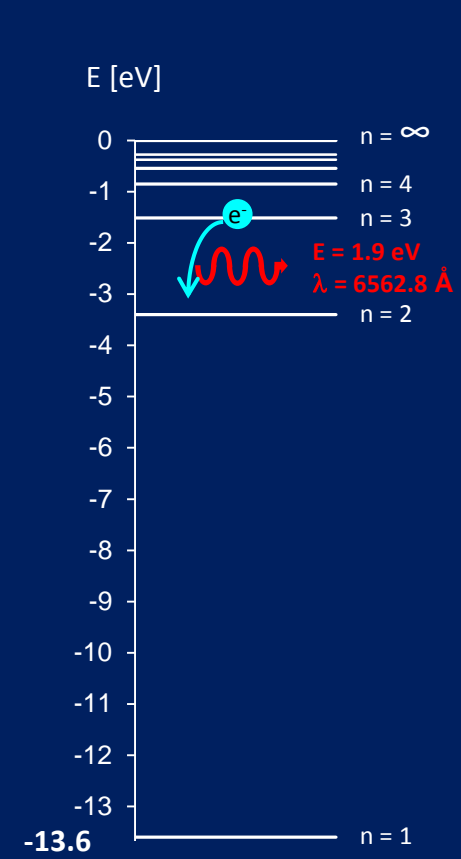
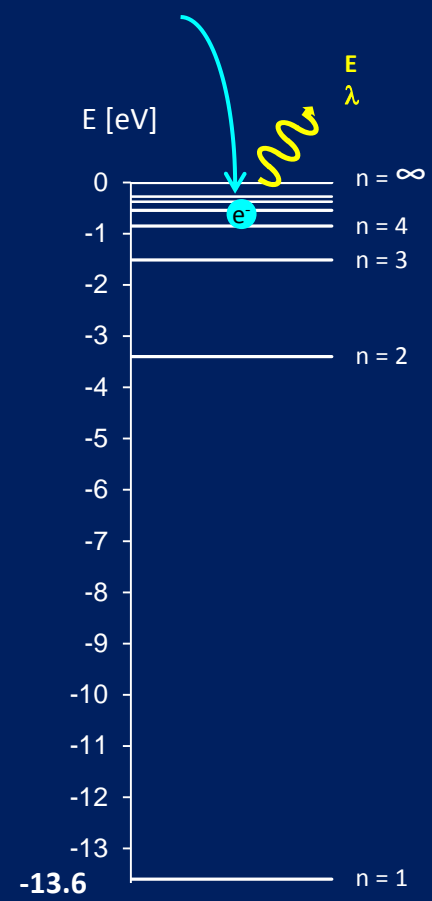
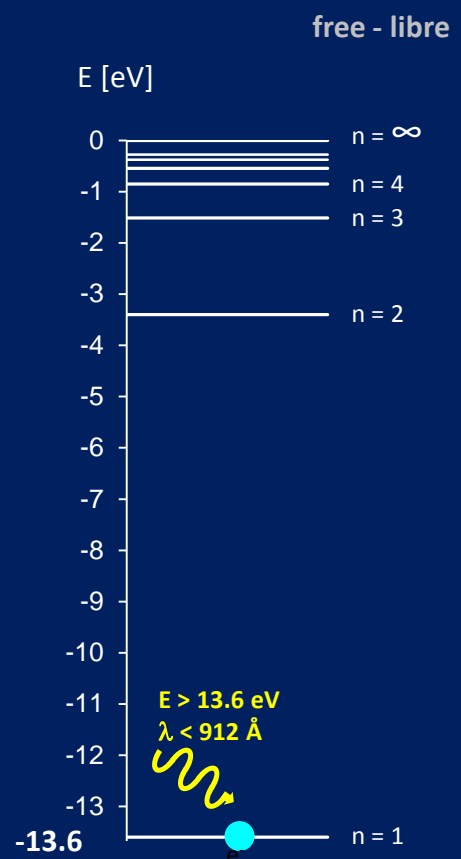
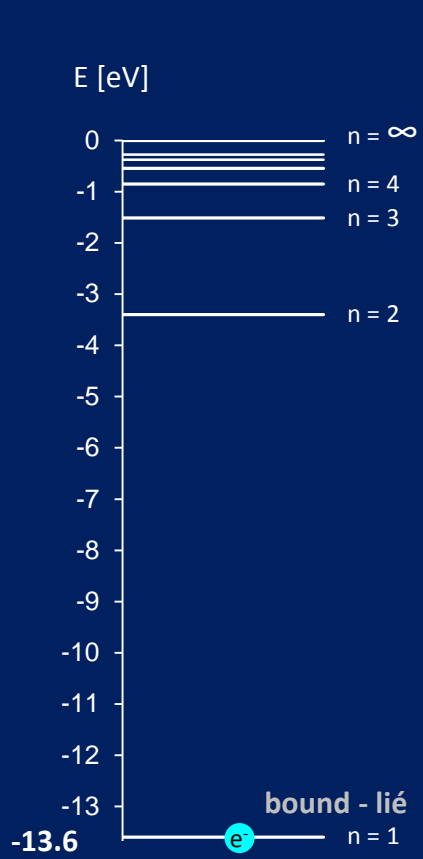
Etat fondamental

$$E_n = -13.6 \text{ eV} / n^2$$

Ionisation $H \rightarrow H^+ + e^-$

Recombinaison $H^+ + e^- \rightarrow H$

Cascade

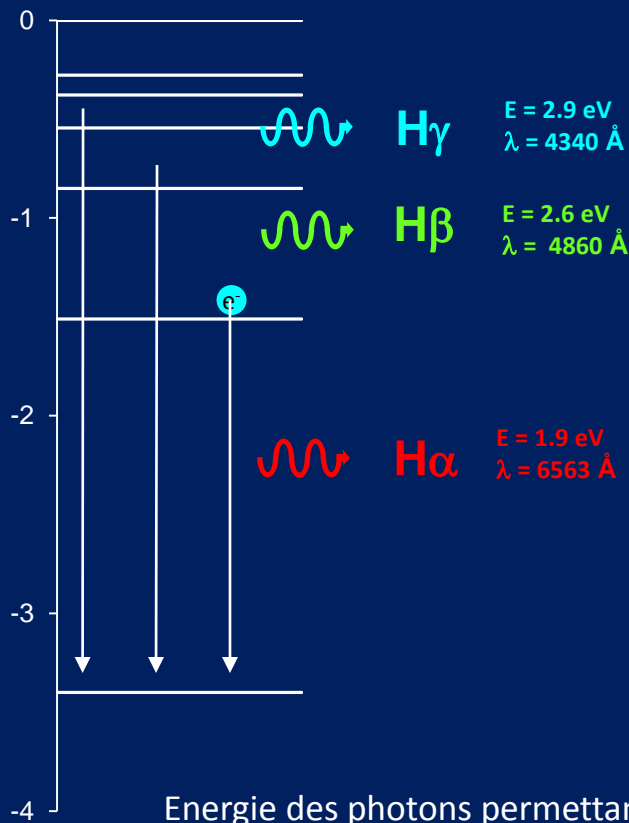
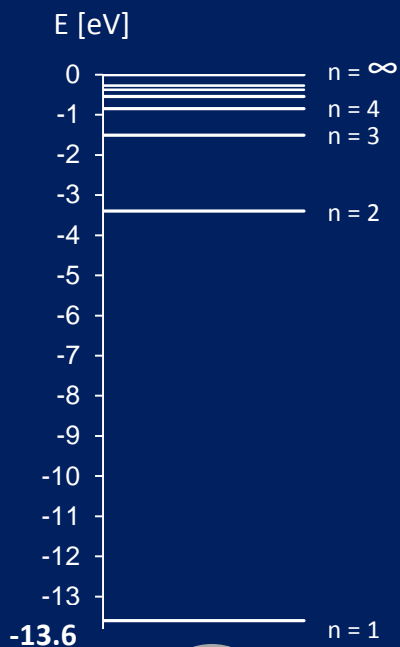


Durée très courte de présence sur chaque niveau excité (10^{-8} s)
Cascade de transitions produisant chacune un photon

Les photons émis dans le domaine « visible » du spectre
sont ceux qui arrivent sur le niveau 2
= Série de Balmer (6563 \AA à 3 \AA)

Energie ionisation = 13.6 eV

$$E_n = -13.6 \text{ eV} / n^2$$



Energie des photons permettant d'ioniser H

$$\lambda [\text{\AA}] = 12403 / E.I. [\text{eV}]$$

$$\lambda = 912 \text{ \AA}$$

Température correspondante

$$T [\text{K}] = 28\,978\,200 / \lambda [\text{\AA}]$$

$$T = 32000 \text{ K}$$

He I **He** I.P. = 24.6 eV

He II **He⁺** I.P. = 54.4 eV

Autres raies formées par Ionisation/Recombinaison

+ Carbone CIII, Azote NIII

Energie des photons permettant d'ioniser He 2 fois

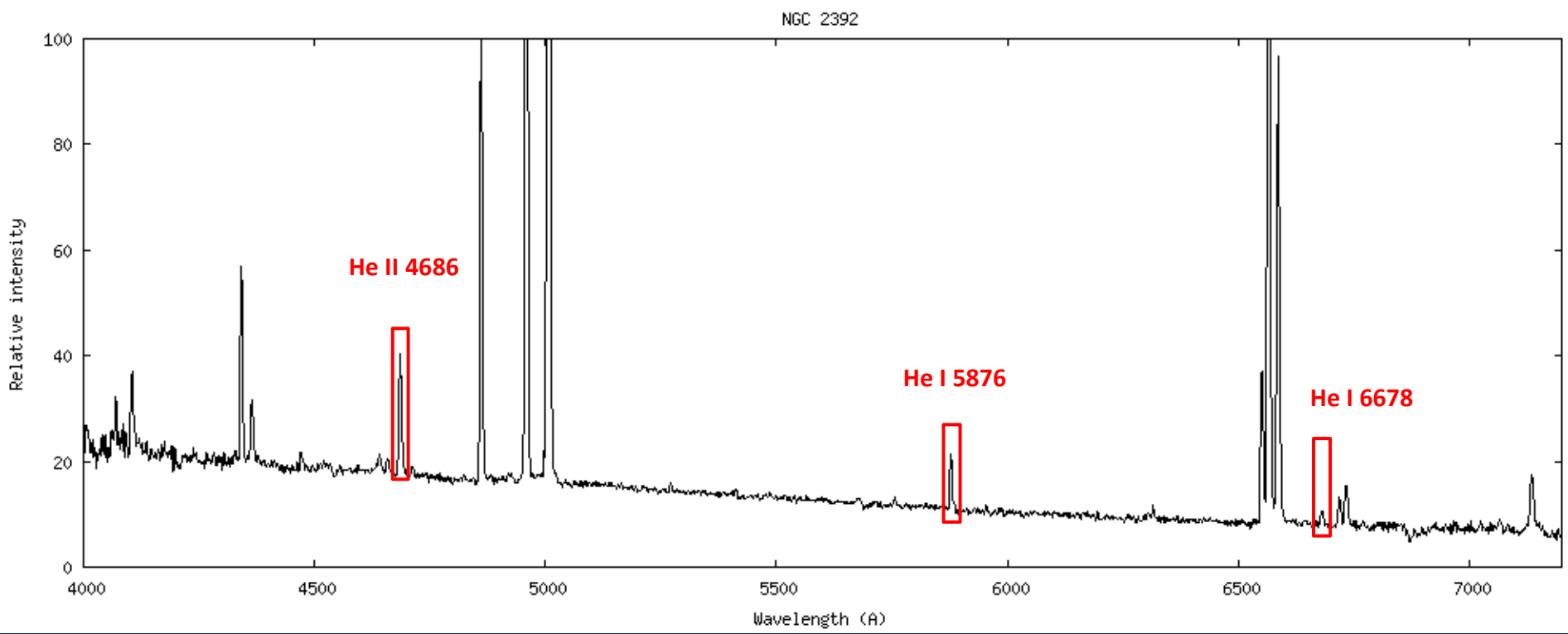
$$\lambda [\text{\AA}] = 12403 / \text{E.I. [eV]}$$

$$\lambda = 227 \text{\AA}$$

Température correspondante

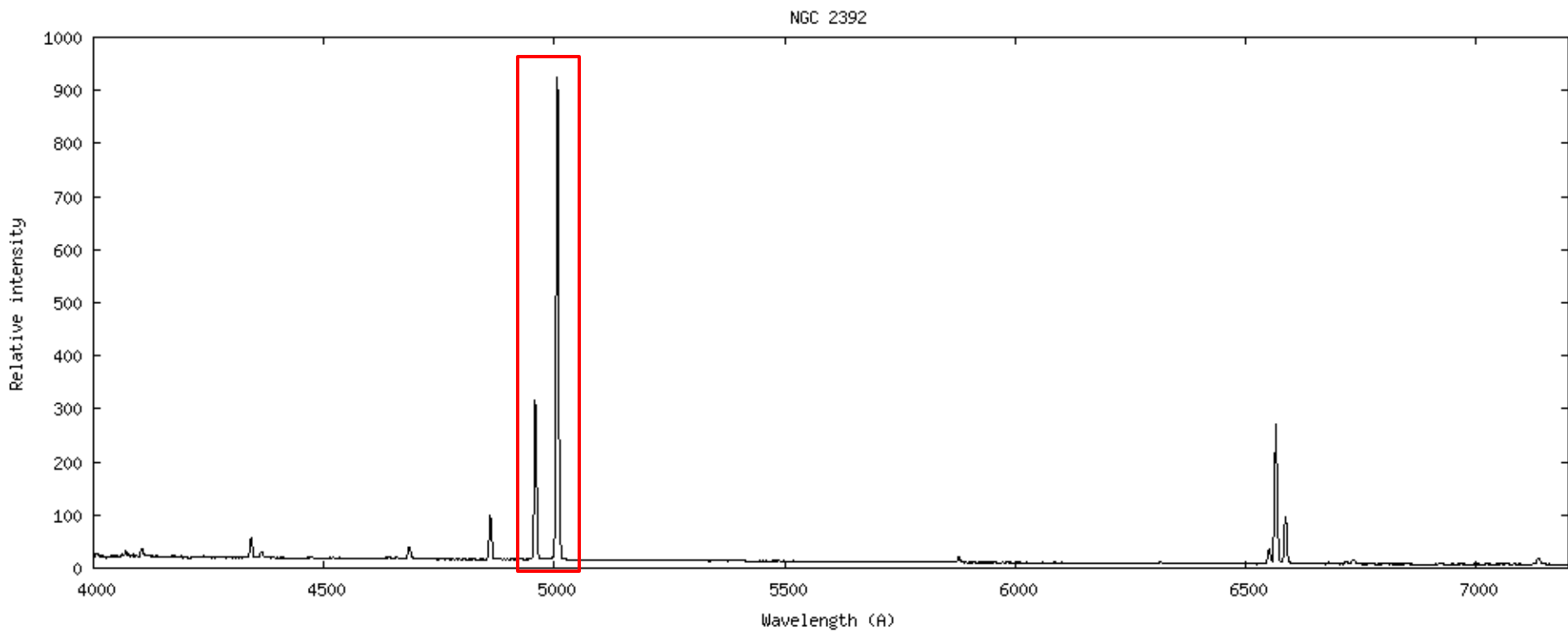
$$T [\text{K}] = 28\,978\,200 / \lambda [\text{\AA}]$$

$$T = 128\,000 \text{ K}$$

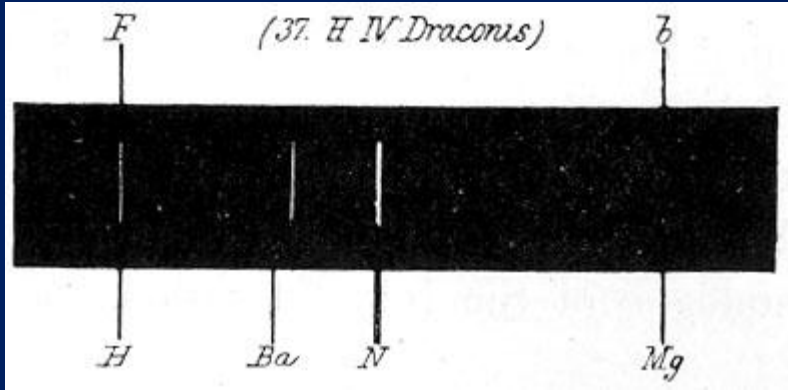


Les « raies interdites » - Le « Nébulium »

Les autres raies sont formées par un processus différent

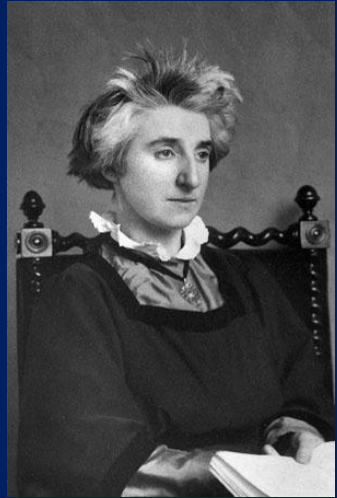


Les « raies interdites » - Le « Nébulium »



Sir William Huggins: "On the evening of the 29th of August, 1864, I directed the telescope for the first time to a planetary nebula in Draco (NGC 6543). ... I looked into the spectroscope.

No spectrum such as I expected ! A single bright line only !"



1864
Premier spectre
d'une nébuleuse planétaire



NGC 6543

MINOR CONTRIBUTIONS AND NOTES.

“. . . . TEACH ME HOW TO NAME THE LIGHT.”

It would be a convenience if a name were chosen for the as yet undiscovered gas, which is suggested by the typical bright nebular lines, as a principal constituent of the nebulae. Sir William Huggins has used occasionally the term *nebulum*. Independently, Miss Agnes Clerke has made the suggestion to me of *nebulium* as an appropriate

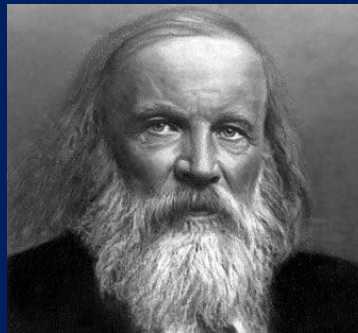
MARGARET L. HUGGINS.

Astrophysical Journal, vol. 8, p.54-54

Les « raies interdites » - Le « Nébulium »

PERIODIC TABLE OF THE ELEMENTS

1	H																	He	
2	Li	Be											B	C	N	O	F	Ne	
3	Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar	
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
6	Cs	Ba			Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
7	Fr	Ra			Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rn	Cn	Uu	Uuq	Uup	Uuq	Uuo	Uuo
			La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu		
			Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr		



Début du XIX^{ème} Siècle
Tableau de Mendeleïev rempli
→ pas de place pour le Nébulium

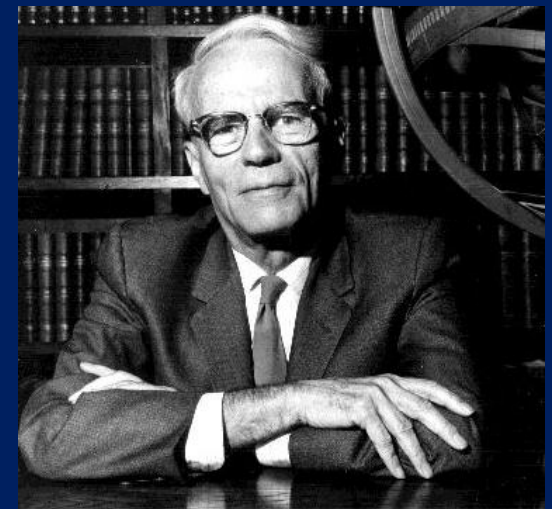
Bowen (1928)

Transitions de l'ion O⁺⁺

Ne pouvant se produire que dans les milieux très dilués

Donc impossible à détecter sur Terre

→ « raies interdites » notées [] Ex. : [O III] pour le « nébulium »

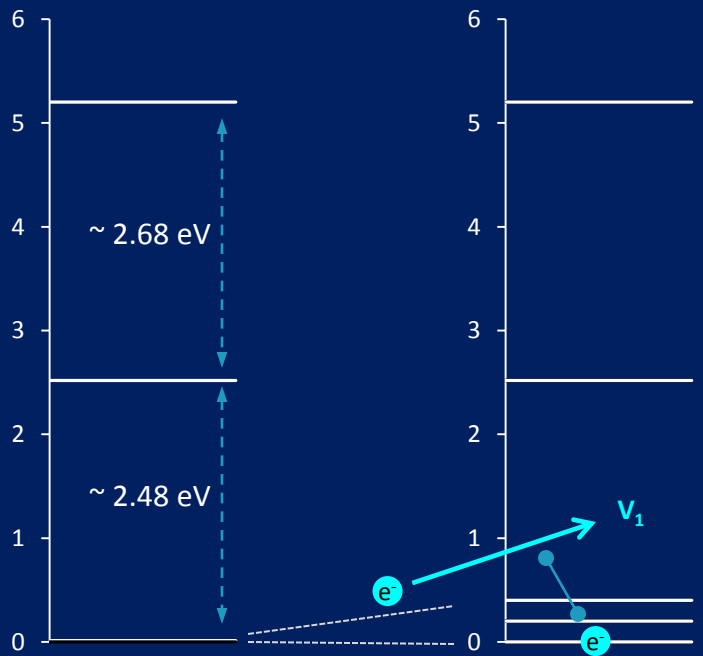


« Raies interdites » = raies excitées par collision

Niveaux métastables

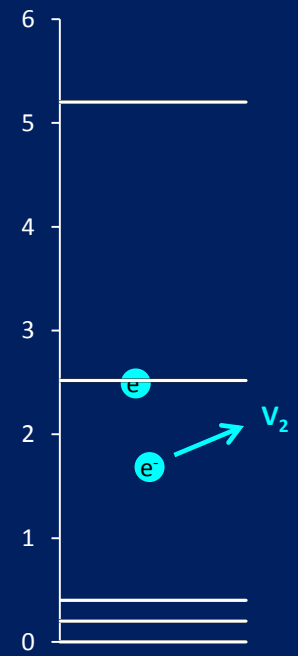
Probabilité de transition
 $A_{21} = 0.02 \text{ s}^{-1}$
 Durée = 50 s

Collision



$$E1 = \frac{1}{2} m v_1^2$$

Transfert d'énergie
Excitation

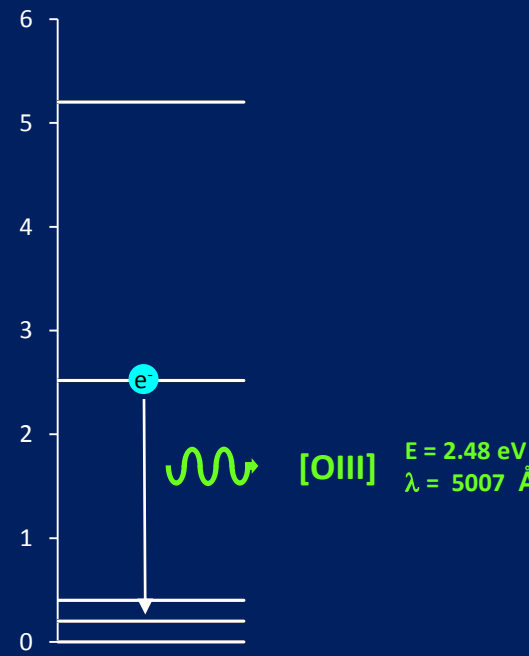


$$E2 = \frac{1}{2} m v_2^2$$

$$E1 - E2 = \frac{1}{2} m (v_1^2 - v_2^2)$$

$$E1 - E2 = 2.48 \text{ eV}$$

Déexcitation
Emission photon



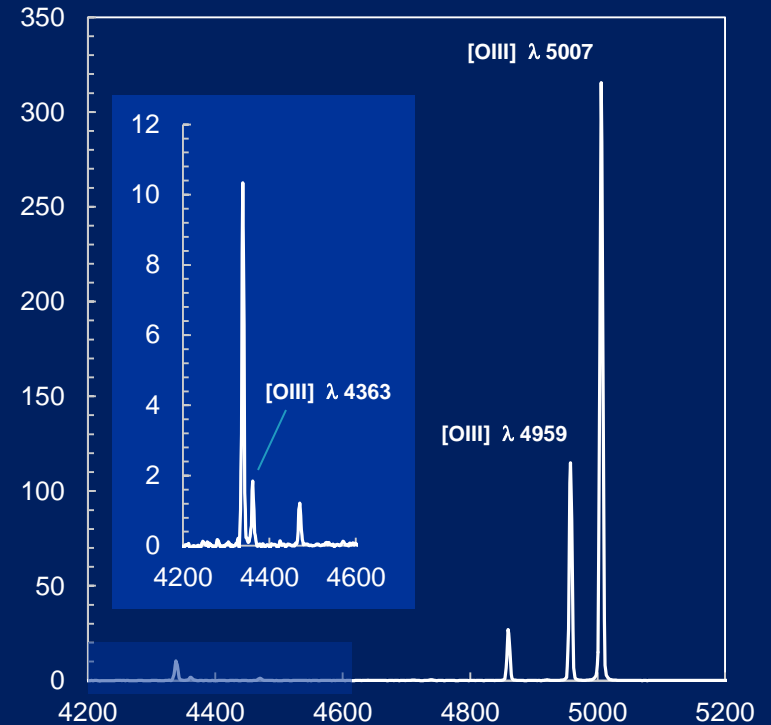
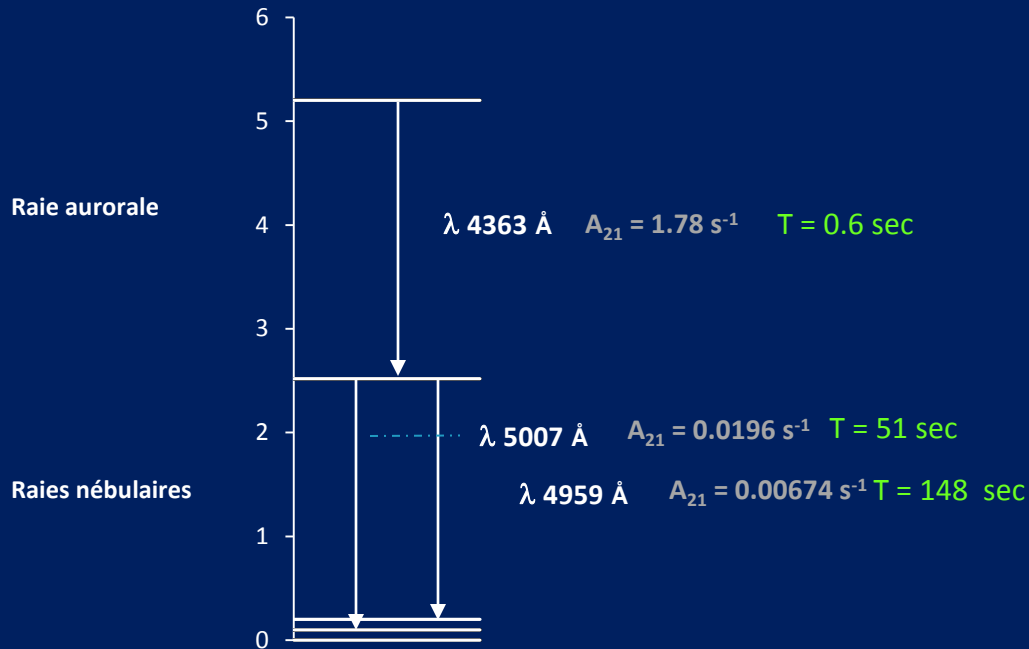
Présence très longue de l'électron sur le niveau métastable
 Dans les conditions habituelles de densités connues sur Terre, un électron occupant ce niveau est très rapidement arraché de ce niveau par interaction avec les autres constituants
 → **Transition impossible « Raie interdite »**

« Raies interdites » = raies excitées par collision

[O III]

O²⁺

NGC 6572



A_{21} = probabilité de transition

1. Faible intensité [OIII] 4363
2. Rapport [OIII] 5007 / [OIII] 4659 ≈ 3
Car $A_{21}(5007) \approx A_{21}(4659) \times 3$

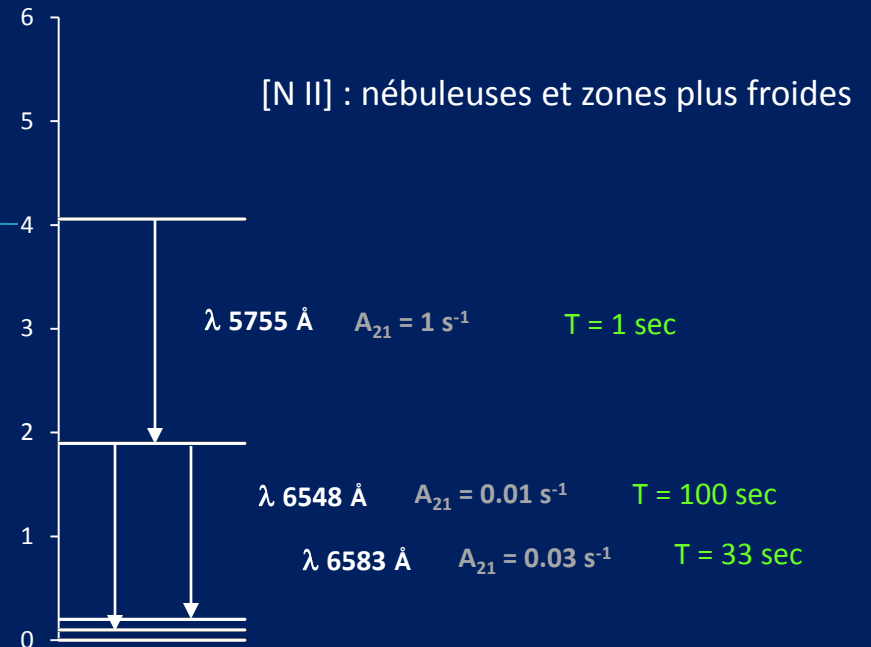
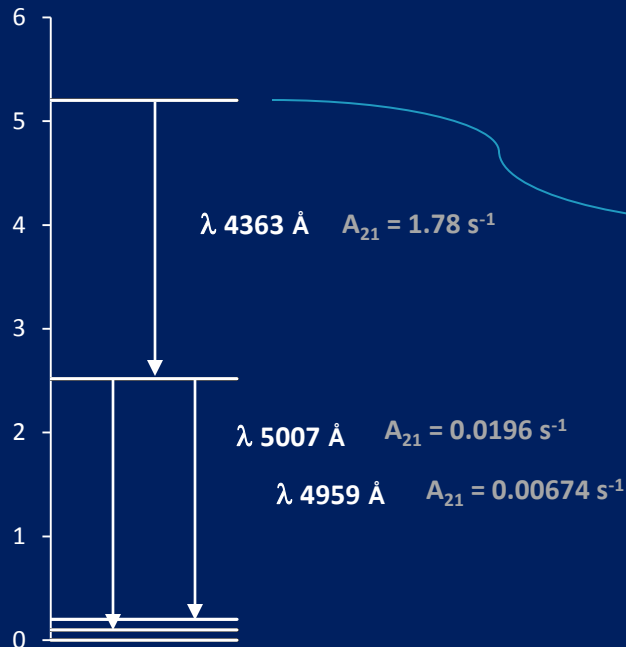
« Raies interdites » = raies excitées par collision

[O III]

O²⁺

[N II]

N⁺



	Ratio théorique	Ratio observé *
I(5007) / I(4959)	2.88	3.01 +/- 0.23
I(6548) / I(6583)	2.95	2.92 +/- 0.32

* Acker & al.

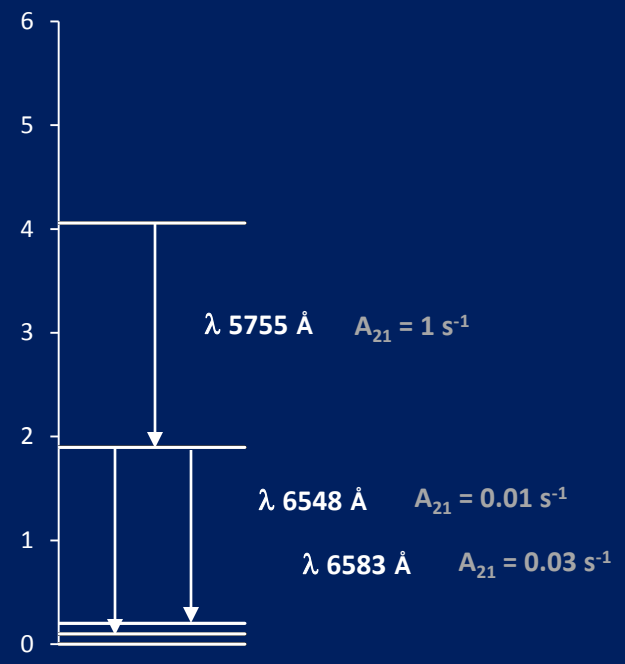
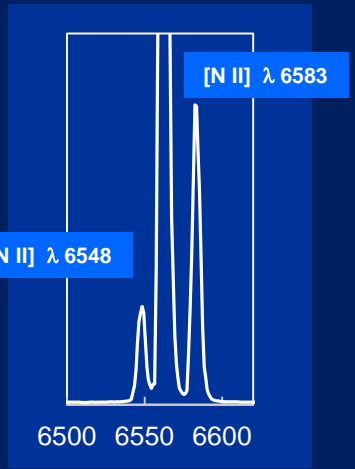
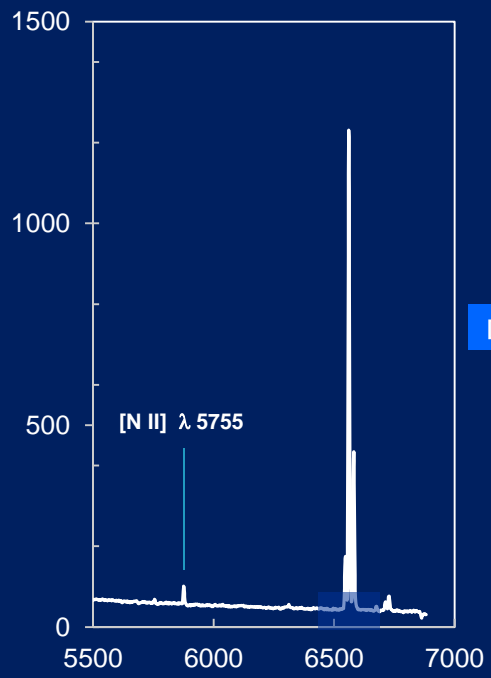
Différence entre ratio théorique et ratio observé pour [OIII]

Si la mesure du ratio diffère sensiblement de la plage des ratios observés
Problème à résoudre (acquisition-traitement-mesures)

« Raies interdites » = raies excitées par collision

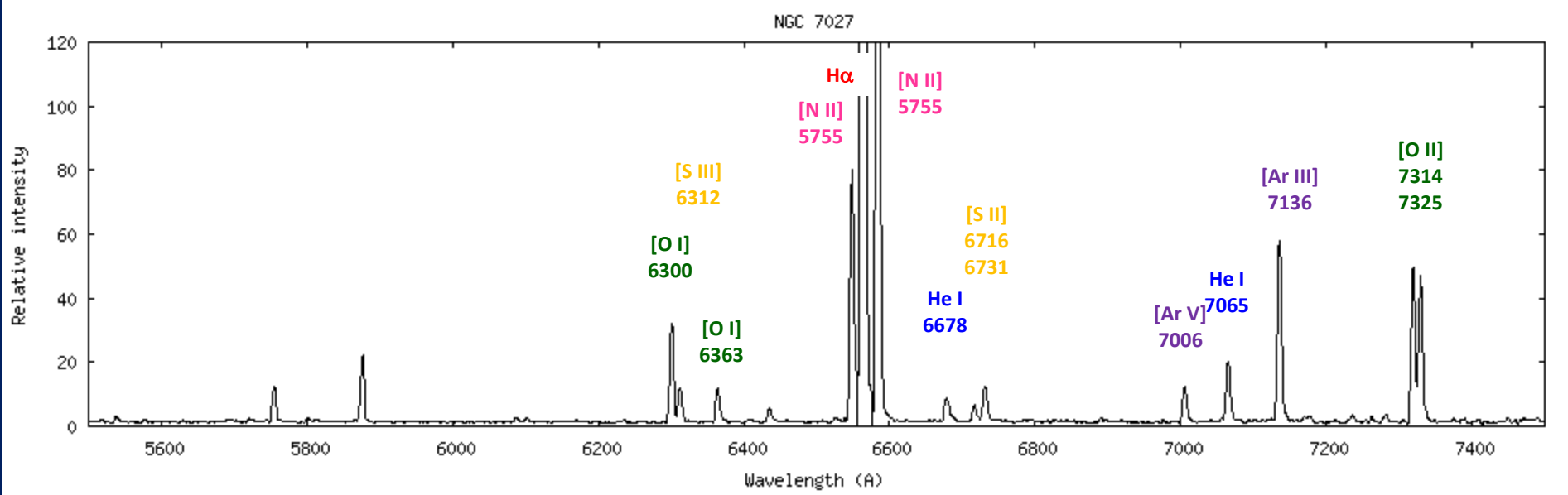
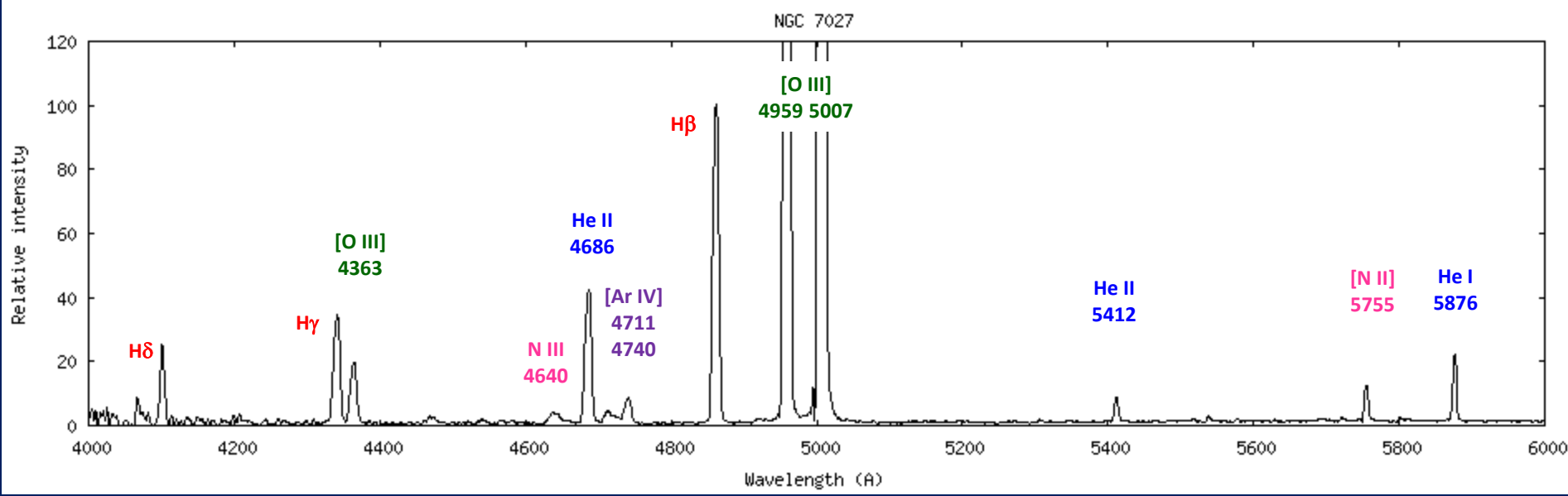
[N II] N+

NGC 6572



Identification des raies

NGC 7027

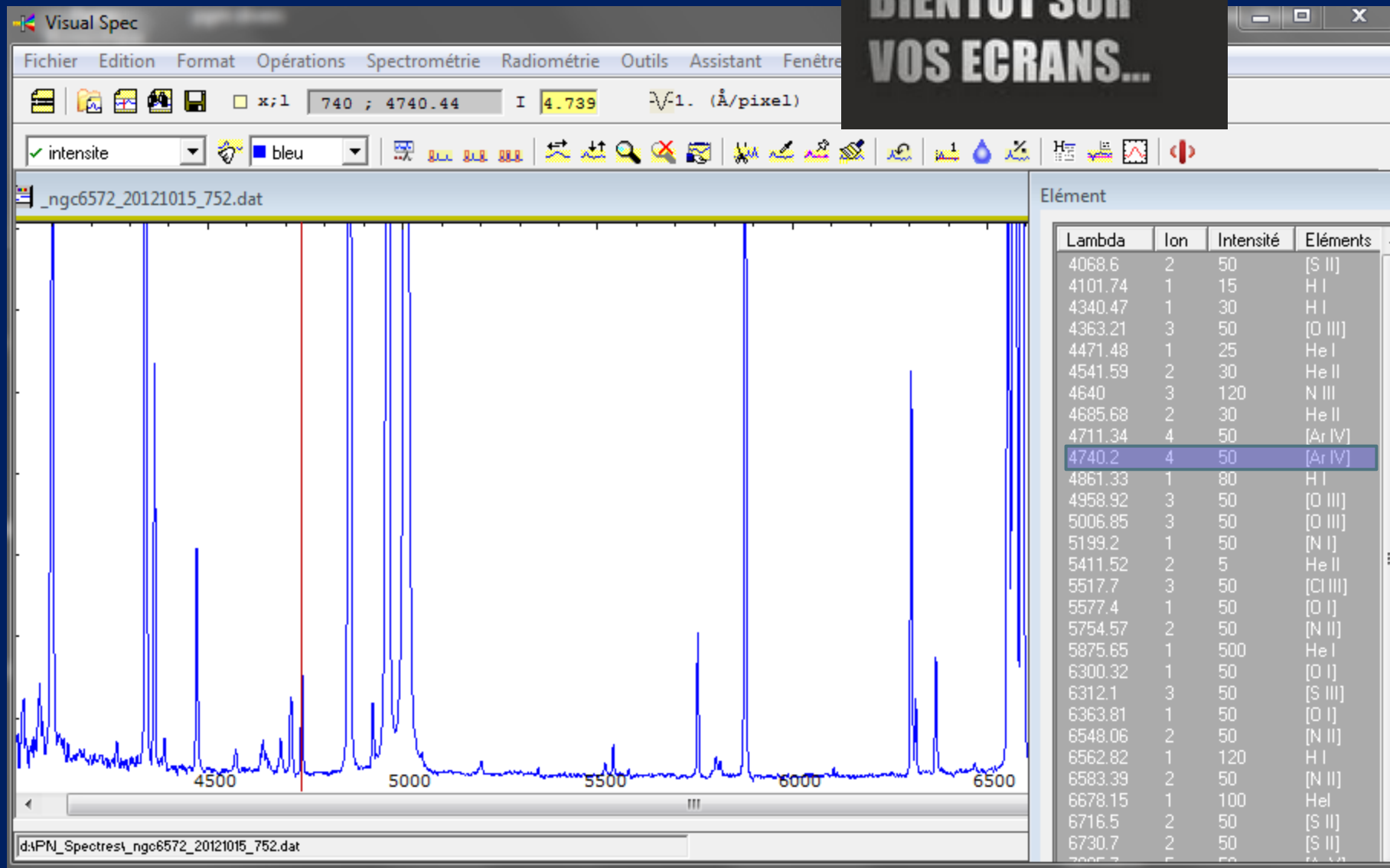


Identification des raies

Liste des raies les plus intenses

Raie	Ion/él.	I.P. [eV]	Longueur d'onde des principales raies						
H I	H	13.6	3835.39	3889.05	3970.07	4101.74	4340.47	4861.33	6562.82
He I	He	24.6	4471.48	5875.65	6678.15	7065.3			
He II	He ⁺	54.4	4541.59	4685.68	5411.52				
[N II]	N ⁺	29.6	5754.57	6548.06	6583.39				
N III	N ²⁺	47.4	4640						
[O I]	O	13.6	5577.4	6300.32	6363.81				
[O II]	O ⁺	35.1	7319.92	7325					
[O III]	O ²⁺	54.9	4363.21	4958.92	5006.85				
[Ne III]	Ne ²⁺	63.4	3868.76	3967.47					
[S II]	S ⁺	23.3	6716.5	6730.7					
[S III]	S ²⁺	34.9	6012.1						
[Ar III]	Ar ²⁺	40.7	7135.8						
[Ar IV]	Ar ³⁺	59.6	4711.34	4740.2					
[Ar V]	Ar ⁴⁺	74.8	7005.7						

Identification des raies



BIENTÔT SUR
VOS ECRANS...

Spectroscopie des Nébuleuses Planétaires

1. Identification et formation des raies
2. **Mesure des paramètres physiques**
3. Diversité des nébuleuses planétaires – Classe d'excitation
4. Nébuleuse planétaire : une phase de la vie des étoiles $M < 8 M_{\odot}$
5. Discriminer les NP des autres objets à spectre d'émission
6. Intérêt de l'observation des NP en spectroscopie amateur
7. Références et annexes



Acquisition

Date : 06-04-2011

Exposure time : 2400 sec (8 x 300 sec)

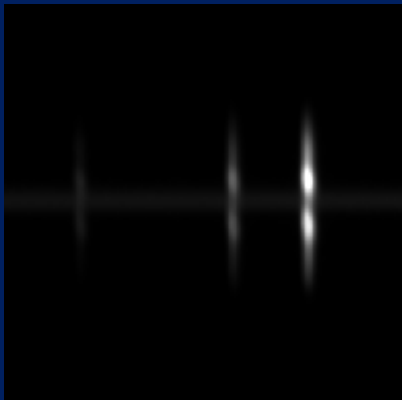
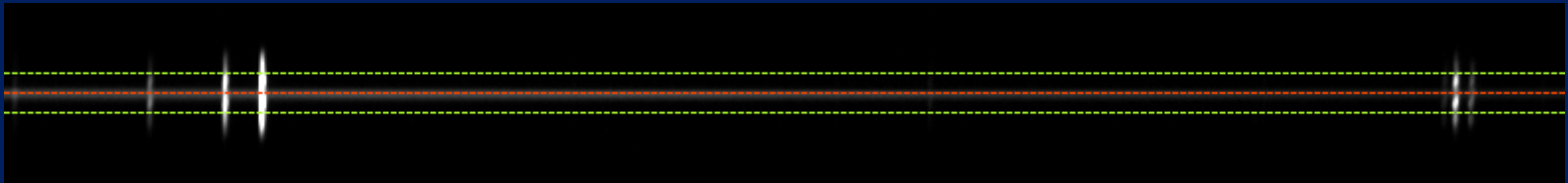
Telescope : SC 25 cm

Spectrograph : LISA Slit 23 mcm R = 950

Spectrum processing : ISIS

Instrumental response computed with Alp Gem

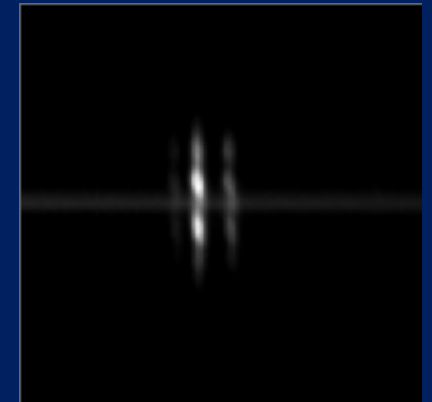
1. Repérer l'emplacement de la fente (Image Autoguidage)
2. Intégrer le spectre dans une zone homogène et repérer cette zone



Zone [O III]



NGC 2392



Zone H α

Amélioration SNR et diminution de l'incertitude sur les mesures

NGC 6572

8 x 30 secondes



H β = 100

H α / H β

[O III] 4959, 5007 / H β

8 x 300 secondes



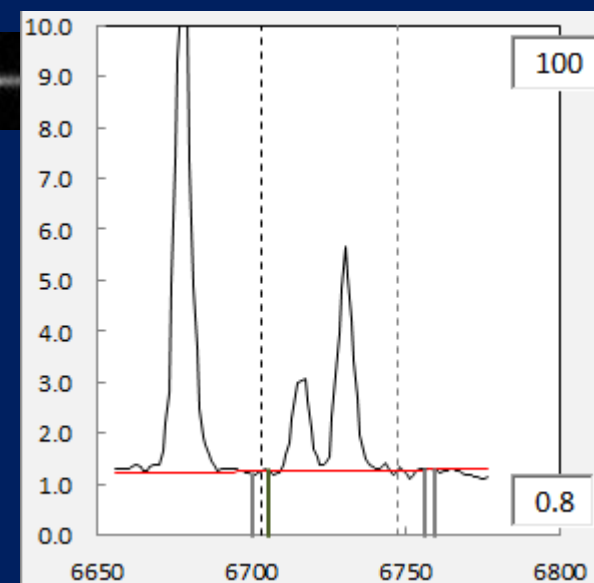
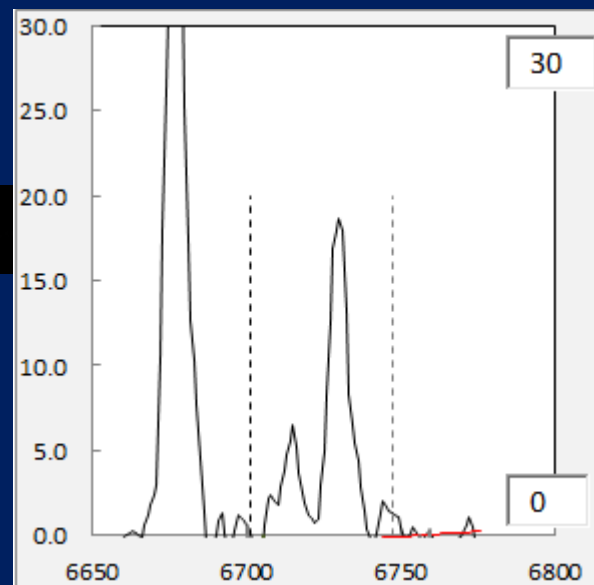
[O III] 4959/5007 saturées

[O III] 4636 / H β

Autres raies faibles [S II] ...

2 acquisitions

- Faible durée : raies intenses
- Longue durée : raies faibles
- Mesures rapportées à H β = 100



Exemple : raies soufre [S II]

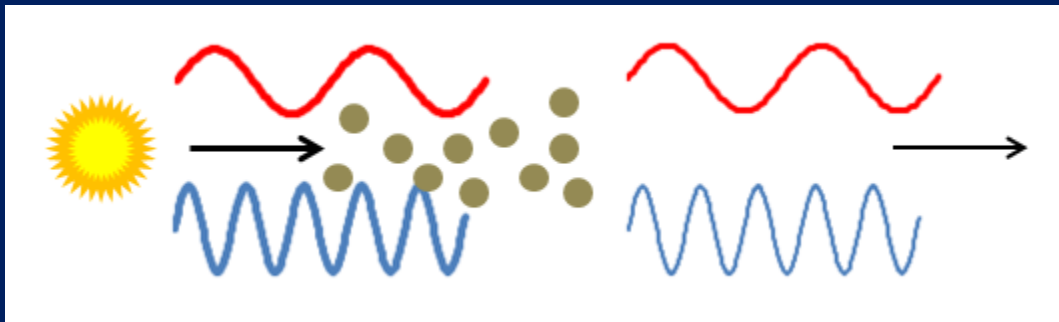
Dérougissement



Le rayonnement émis par une étoile réagit avec le milieu interstellaire (Absorption, réflexion, diffusion ...)

Il en résulte une diminution de l'intensité appelée Extinction

$$\text{Extinction} = I - I_0$$



Le rayonnement de faible longueur d'onde interagit plus avec le rayonnement de plus grande longueur d'onde : l'extinction dans le bleu est plus forte que dans le rouge.

L'intensité relative dans le rouge du spectre observé est plus forte que dans le spectre émis : « rougissement »

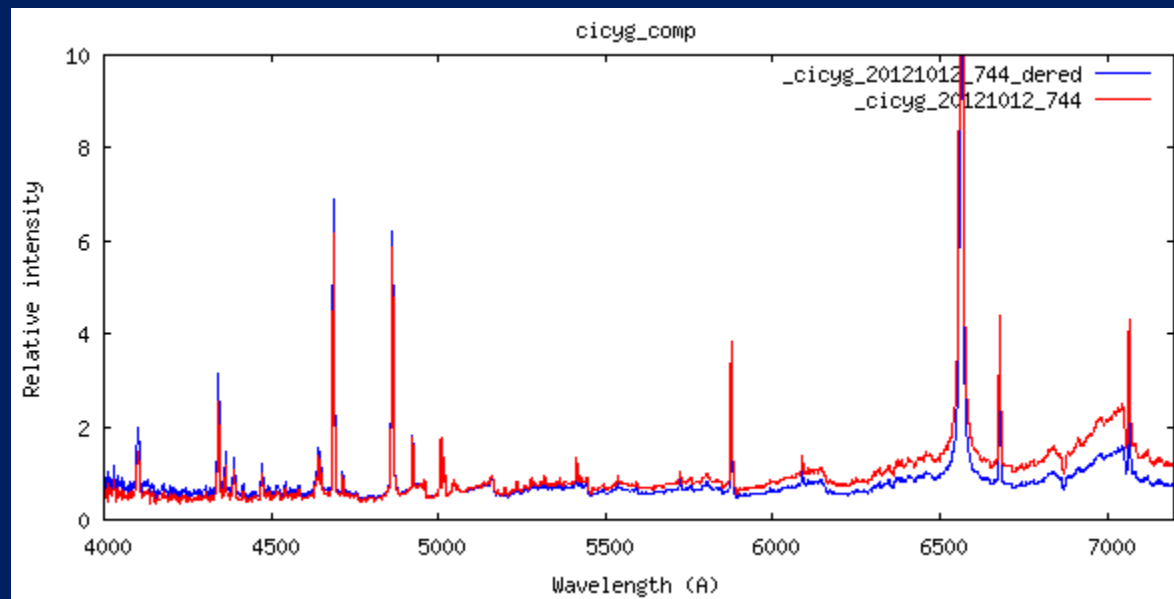
$$F(\lambda)_{\text{observé}} = F(\lambda)_{\text{émis}} e^{-A_V(5500/\lambda)}$$

Dérougissement

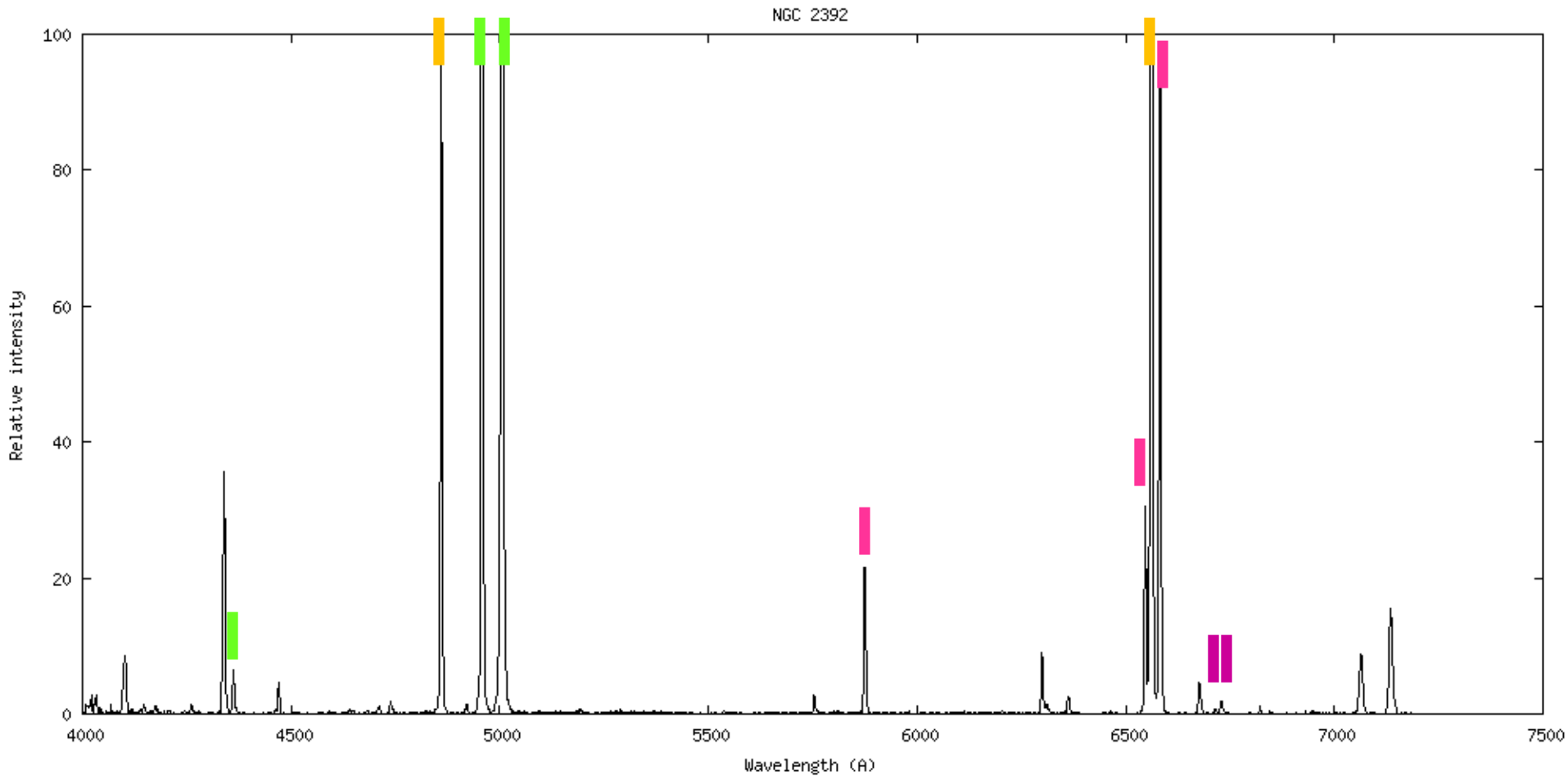


Exemple
Sur CI Cygni
 $E_{B-V} = 0.4$

Rouge : spectre brut
Bleu : spectre dérougi



Spectre de NGC 2392 après traitement



Raies utiles pour l'analyse

$H\alpha$ $H\beta$: correction du rougissement

[OIII] [NII] : calcul de la température

[SII] : calcul de la densité

1	2		3	4	5	6
λ	Line	$I_{0 \text{ Int.}}$	$I_{0 \text{ Gauss}}$	I_0 $I(\text{H}\beta) = 100$	I_c	$\Delta\%$
4340.47	H I	22.8	23.7	43.8	45.5	4
4363.21	[O III]	6.9	7	12.9	13.4	-3
4685.68	He II	16.5	16.6	30.7	31.1	-1
4861.33	H I	53.7	54.1	100.0	100.0	0
4958.92	[O III]	179	179	330.9	328.8	1
5006.85	[O III]	556.6	552.9	1022.0	1012.3	1
5754.57	[N II]	0.8	0.8	1.5	1.4	6
5875.65	HeI	5.8	6	11.1	10.4	6
6548.06	[N II]		15.2	28.1	25.6	10
6562.82	H I		167.6	309.8	282.2	10
6583.39	[N II]		46.1	85.2	77.6	10
6716.5	[S II]		3.9	7.2	6.5	10
6730.7	[S II]		6.1	11.3	10.2	11

3 : mesure des intensités

4 : intensités rapportées à $H\beta = 100$

5 : intensités corrigées du rougissement

Comparaison des intensités
(corrigées)
à des valeurs publiées

Vérification des méthodes
d'acquisition, traitement
et analyse

	This Work	[1]	[2]	[3]	[4]
4340.47 H I	45.5	46	48	48	47.3
4363.21 [O III]	13.4	14	25	19.5	19.5
4685.68 He II	31.1	38	38	35	37.0
5006.85 [O III]	1012.3	950	1200	1260	1136.7
5754.57 [N II]	1.4	2	1.6	1.51	1.7
5875.65 HeI	10.4	6.8	7.8	7.45	7.4
6562.82 H I	282.2	275	295	283	284.3
6583.39 [N II]	77.6	95	95	85.5	91.8
6716.5 [S II]	6.5	8	6.7	4.8	6.5
6730.7 [S II]	10.2	10	7.9	7.8	8.6

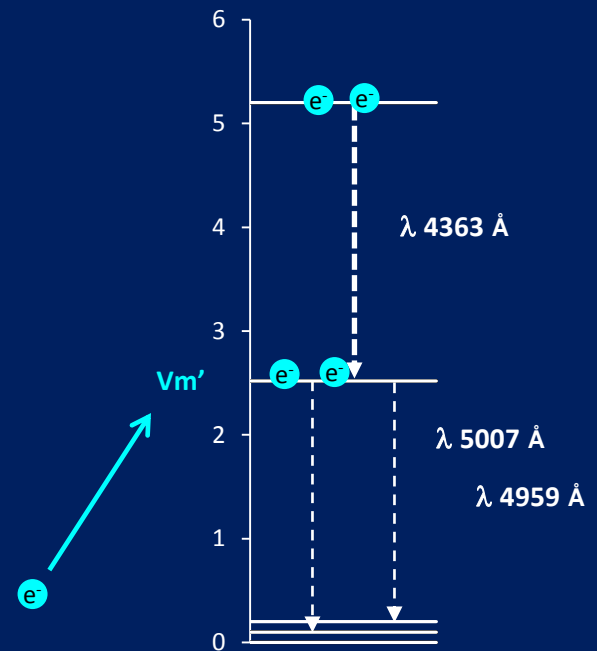
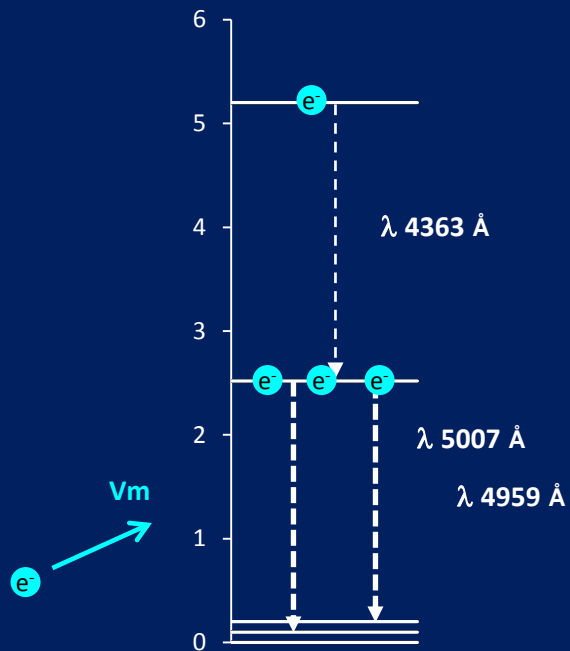
Table 5 : Line intensities - Comparison with published values

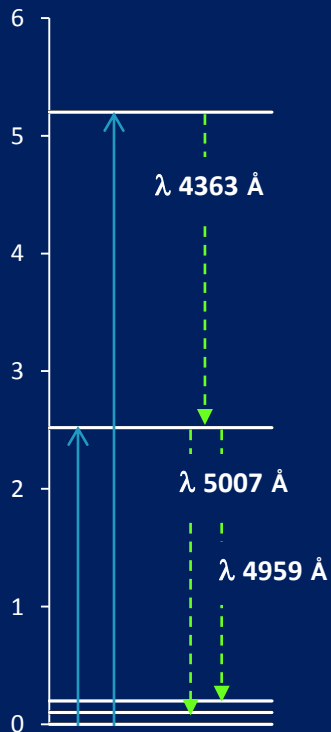
[1] : Henry & al. (2000) [2] : Barker (1991) [3] Aller & Czyzak (1979)

[4] Average of [1], [2] and [3] as computed in Pottasch & al. (2008)

1. Température < -- > Vitesse

Vitesse < -- > Energie





2.1. Excitation par **collision** prépondérante

2.2. Désexcitation par **radiation** prépondérante

3. Equilibre entre

- Nombre excitations par collision
- Nombre de désexcitations par émission

Les équations d'équilibre donnent :
$$R[OIII] = \frac{I_{5007} + I_{5659}}{I_{4363}} = 7,90 \cdot \frac{1}{K} \cdot e^{\frac{3.29 \cdot 10^4}{T_e}}$$

$$K = 1 + 4 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{N_e}{\sqrt{T_e}}$$

4. Approximation :

Dans les conditions habituelles des NP ($N_e \approx 10000$ et $T_e \approx 10000$) d'où $K \approx 1$

4.1. $R[OIII]$ ne dépend que de la température

4.2. $R[OIII]$ est un indicateur de la température

$$R[OIII] = \frac{I_{5007} + I_{5659}}{I_{4363}} = 7,90 \cdot e^{\frac{3.29 \cdot 10^4}{T_e}}$$

$$T_e = \frac{3,29 \cdot 10^4}{\ln([ROIII])/8,3}$$

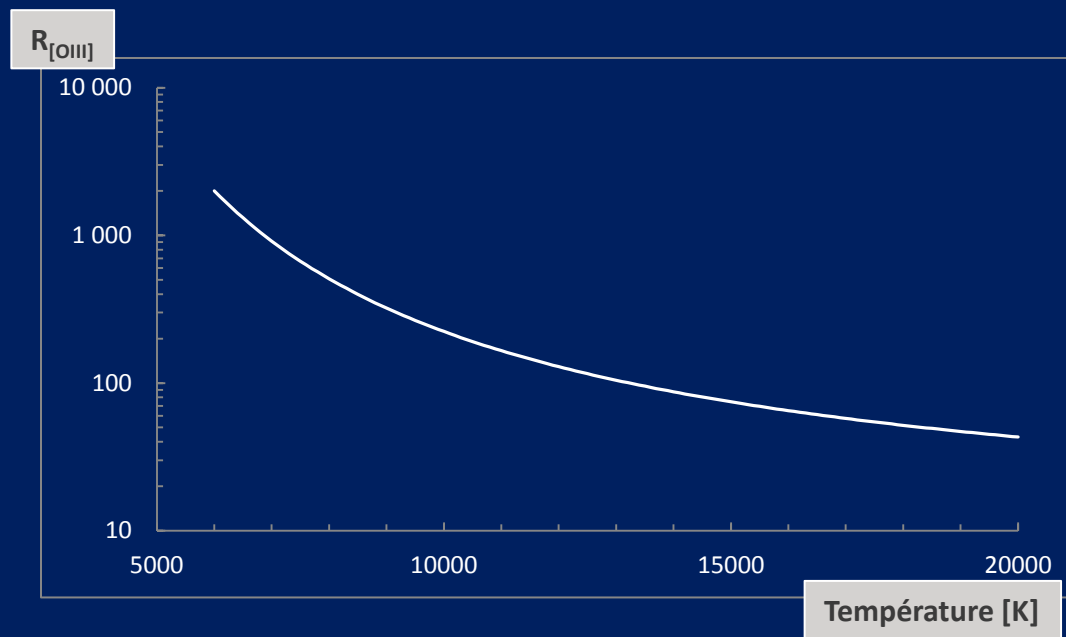
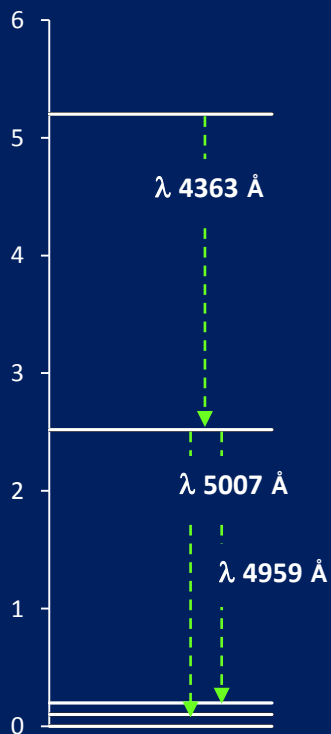
Température

[O III]

O²⁺

$$R_{[OIII]} = \frac{I_{5007} + I_{4959}}{I_{4363}} = 7,90 \cdot e^{-\frac{3,29 \cdot 10^4}{T_e}}$$

$$R_{[OIII]} = \frac{I_{5007} + I_{4959}}{I_{4363}} \rightarrow \text{Augmente avec } T \Rightarrow R \text{ diminue}$$



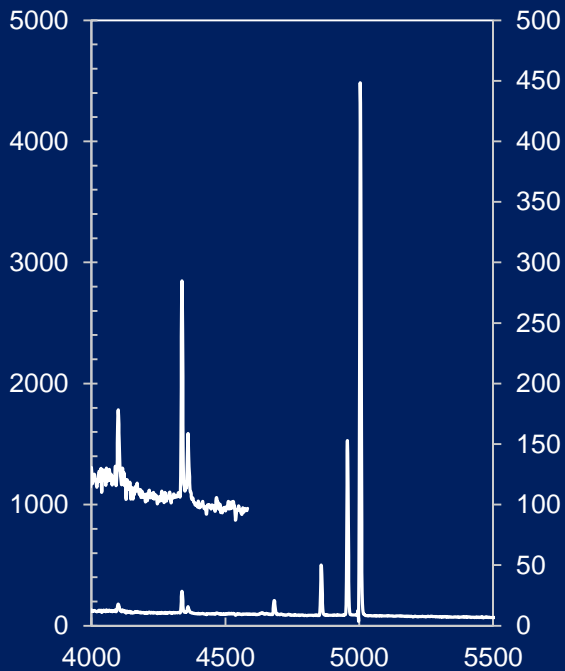
Température

Mesures sur NGC 2392

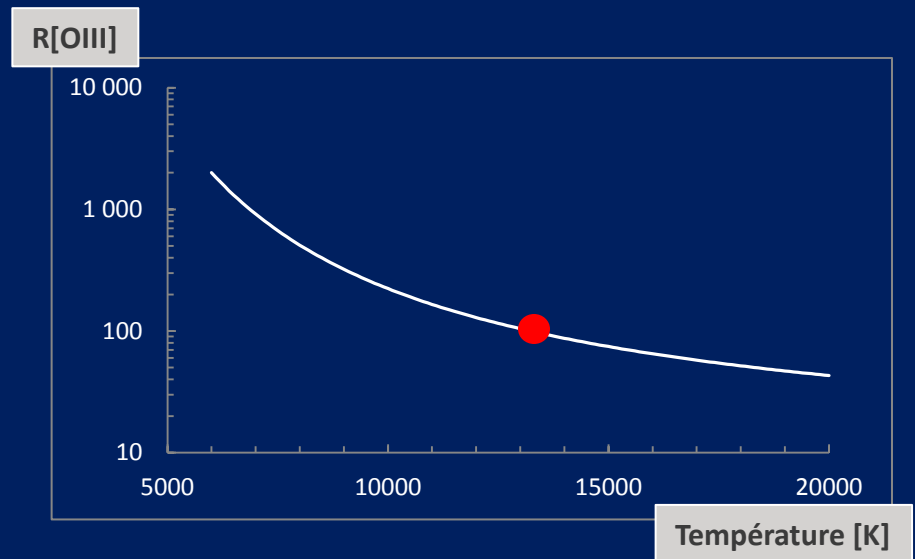
λ	I (H β = 100)
[O III] 5007	1022
[O III] 4959	331
[O III] 4363	12.9

$$R[\text{OIII}] = \frac{1022+331}{12.9} = 103.6$$

$$T_e = \frac{3,29 \cdot 10^4}{\ln(103.6)/7,9} = 12781 \text{ K} \approx 12\,800 \text{ K}$$



Henry & al. : $T_e = 12\,700 \text{ K}$



Température

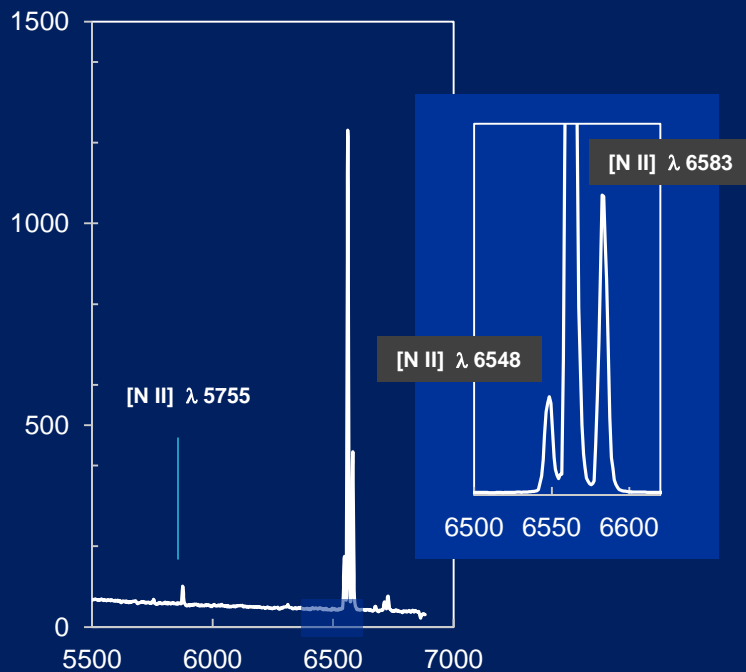
Mesures sur NGC 2392

λ	I (H β = 100)
[N II] 6583	77.6
[N II] 6548	25.6
[N II] 5755	1.4

$$R[\text{N II}] = \frac{77.6 + 25.6}{1.4} = 77.7$$

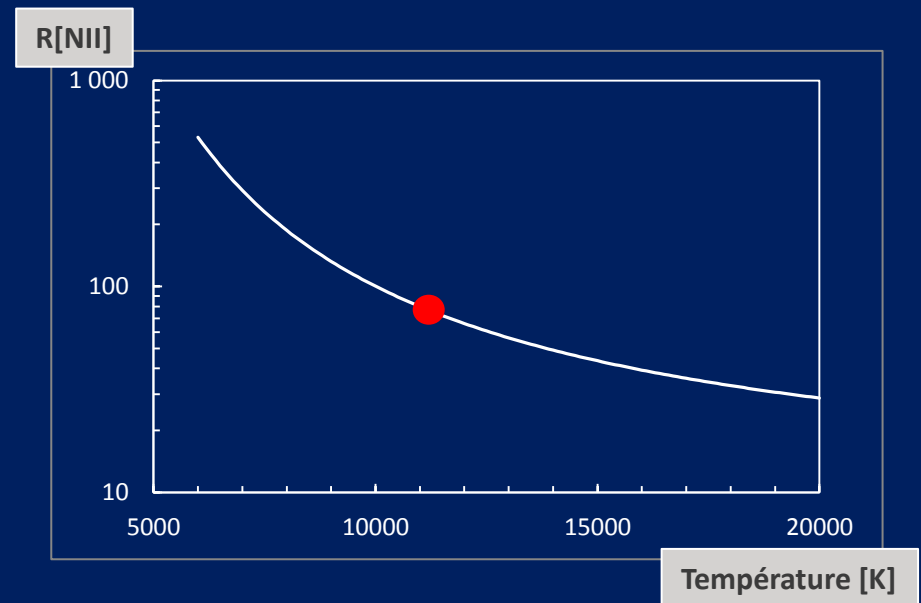
$$T_e = \frac{2,5 \cdot 10^4}{\ln(77.7)/8,23} = 11408\text{K} \approx 11\,400$$

NGC 2392



Henry & al. (2000) :

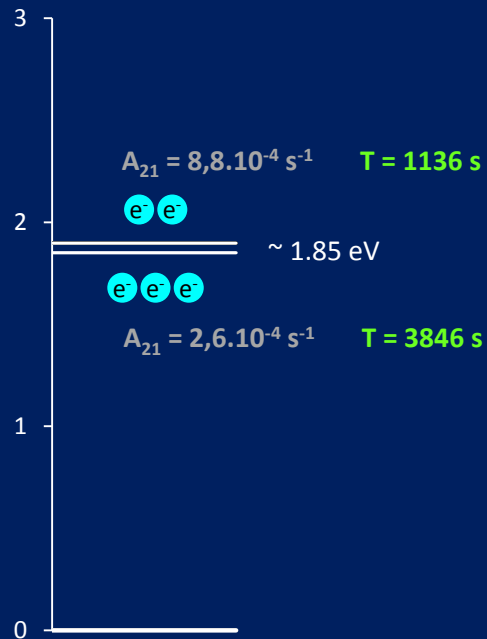
$T_e = 10\,800\text{K}$ (moyen) et $T_e = 11\,400\text{K}$ (Centre)



Densité

[S II] S⁺

Excitation par collision



2 niveaux métastables très proches
Donc peu sensibles à la température

Durée très longue sur les niveaux métastables

Force de collision

$\Omega_{12} = 4.19$ Niveau 2 plus dense
 $\Omega_{13} = 2.79$ que le niveau 3

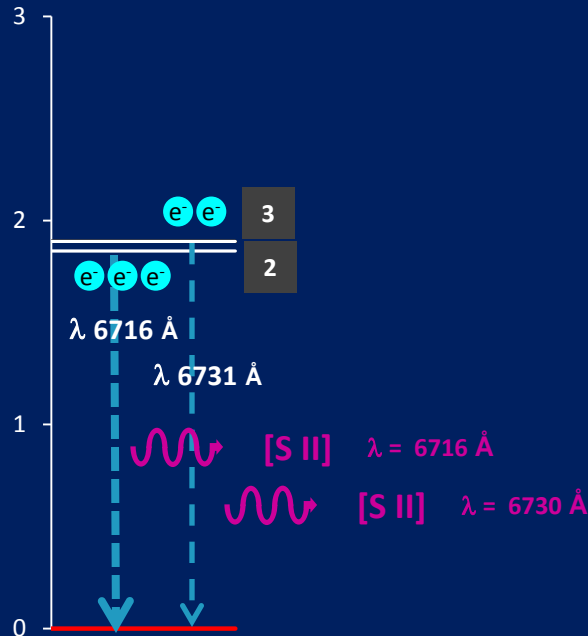
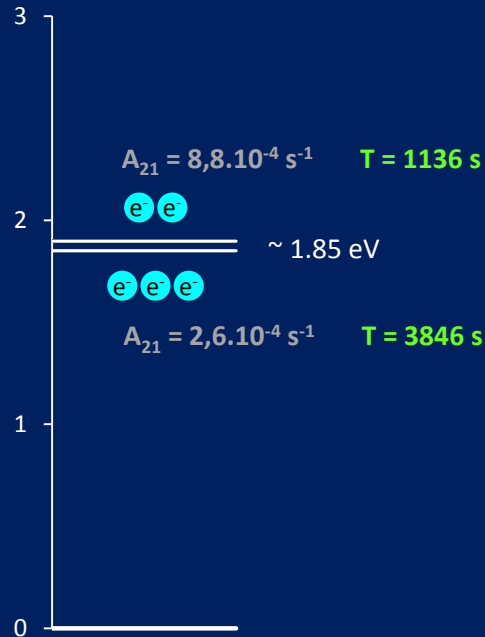
Densité

[S II] S⁺

Ne faible

Excitation par collision

Déexcitation spontanée



2 niveaux métastables très proches
Donc peu sensibles à la température

Toutes les excitations par collision
sont suivies d'une déexcitation spontanée

Durée très longue sur les niveaux métastables

Le rapport des intensités des raies 6716 et 6731
est le rapport du peuplement des niveaux 2 et 3
(environ $3/2 = 1.5$)

Force de collision

$$\Omega_{12} = 4.19$$

Niveau 2 plus dense

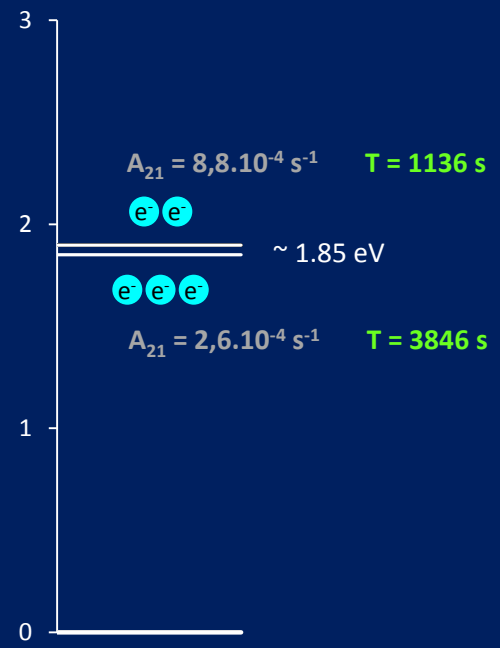
$$\Omega_{13} = 2.79$$

que le niveau 3

Densité

[S II] S⁺

Excitation par collision



2 niveaux métastables très proches
Donc peu sensibles à la température

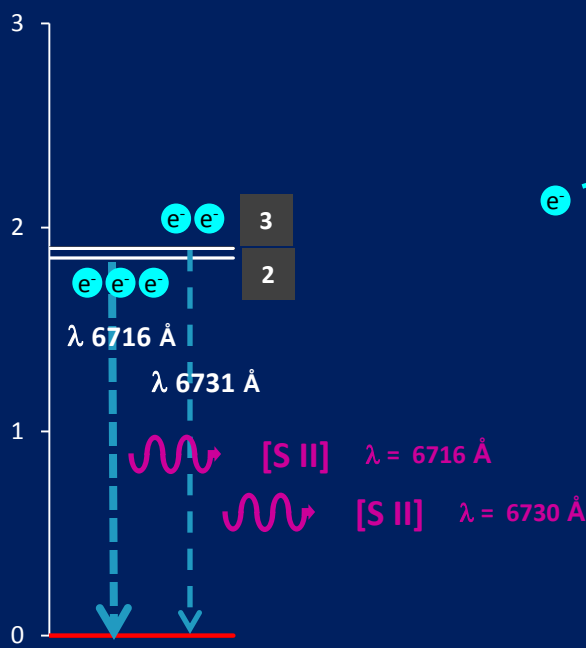
Durée très longue sur les niveaux métastables

Force de collision

$\Omega_{12} = 4.19$ Niveau 2 plus dense
 $\Omega_{13} = 2.79$ que le niveau 3

Ne faible

Désexcitation spontanée

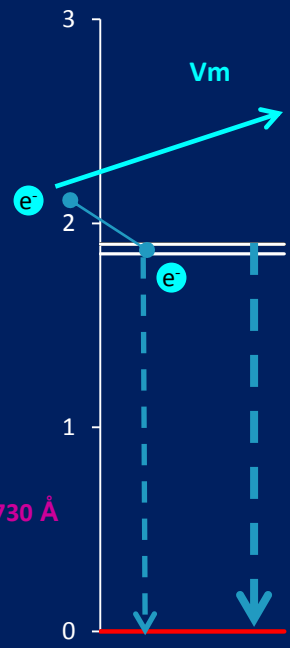


Toutes les excitations par collision
sont suivies d'une désexcitation spontanée

Le rapport des intensités des raies 6716 et 6731
est le rapport du peuplement des niveaux 2 et 3
(environ $3/2 = 1.5$)

Ne élevée

Désexcitation par collision



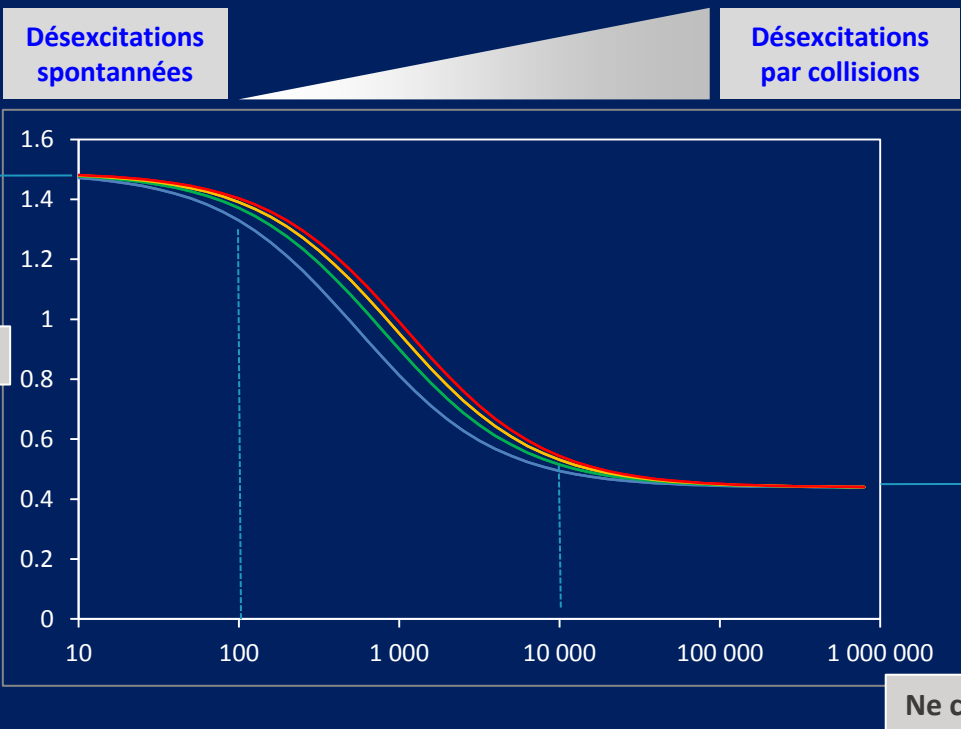
La fréquence des collisions est importante
L'intensité des raies interdites diminue

Les électrons du niveau 2, plus stable,
sont ceux qui subissent le plus
les collisions.
Le rapport des raies 6716/6730
tend vers 0.4

Densité

[S II] **S+**

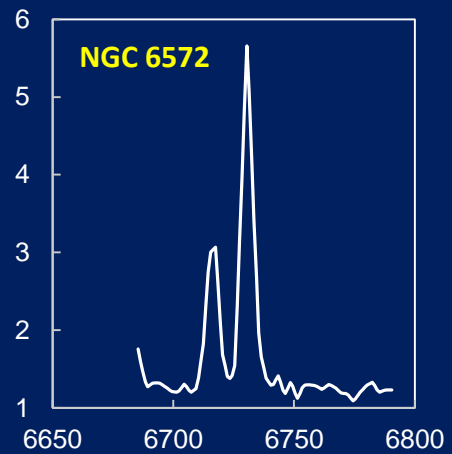
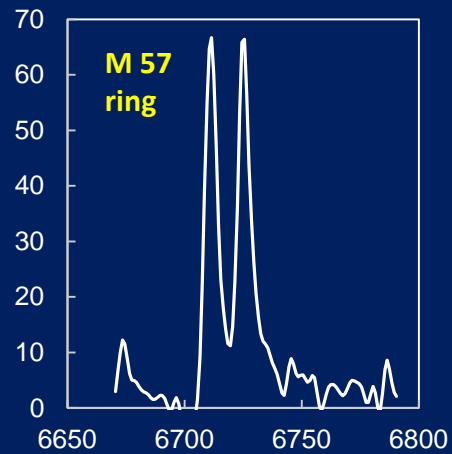
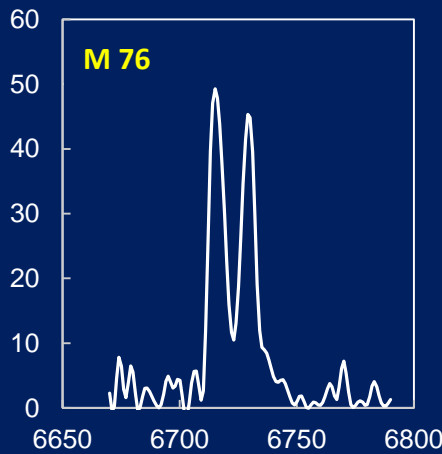
$$R[SII] = \frac{I(6717)}{I(6731)} \quad R[SII] = 1.49 * \frac{1 + 3.77 * Ne/\sqrt{Te}}{1 + 12.8 * Ne/\sqrt{Te}}$$



Faibles densités
R[SII] tend vers 1,48

- Te = 5000 K
- Te = 10 000 K
- Te = 15 000 K
- Te = 20 000 K

0.42
Fortes densités
R[SII] tend vers 0,42



Densité

NGC 2392

λ	I (H β = 100)
[S II] 6716	6.4
[S II] 6730	10.2

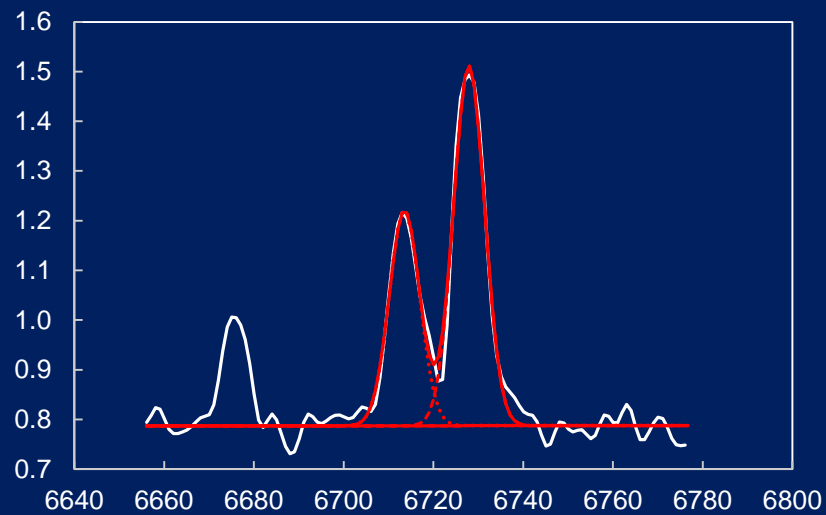
$$R[\text{SII}] = \frac{6.4}{10.2} = 0.64$$

$$N_e = 10^2 T_e^{1/2} \cdot \left(\frac{R_{[\text{SII}]} - 1.49}{5.62 - 12.8 R_{[\text{SII}]}} \right)$$

$$N_e = 10^2 12000^{1/2} \cdot \left(\frac{0.64 - 1.49}{5.62 - 12.8 \times 0.64} \right) = 3403$$

$$N_e = 3400 \text{ cm}^{-3}$$

Barker (1991) : $N_e = 3000 \text{ cm}^{-3}$



1	2	3	4	5	6
λ	Line	$I_{0 \text{ Gauss}}$	I_0 I(H β) =100	I_c	$\Delta\%$
4340.47	H I	23.7	43.8	45.5	4
4363.21	[O III]	7	12.9	13.4	-3
4685.68	He II	10.0	30.7	31.1	-1
4861.33	H I	54.1	100.0	100.0	0
4958.92	[O III]	170	330.9	328.8	1
5006.85	[O III]	552.9	1022.0	1012.3	1
5754.57	[N II]	0.8	1.5	1.4	6
5875.65	He I	6	11.1	10.4	6
6548.06	[N II]	15.2	28.1	25.6	10
6562.82	H I	167.6	309.8	282.2	10
6583.39	[N II]	10.1	85.2	77.6	10
6716.5	[S II]	3.9	7.2	6.5	10
6730.7	[S II]	6.1	11.3	10.2	11

Balmer Decrement				
n	Line	Measured value	Theoretical value	Dereddened value
3	H α	3.10	2.86	2.82
4	H β	1.00	1.00	1.00
5	H γ	0.44	0.47	0.45

$c(\text{H}\beta)$ 0.123 $E(B-V)$ 0.08

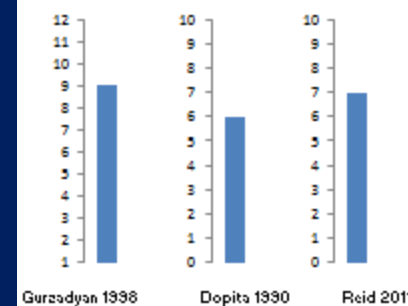
λ 5007/4959 3.08 λ 6583/6548 3.03 λ 6583/6562 0.27

		1	2	3	4	5	
$R_{[\text{O III}]}$	103.6	T(K)	12781	12722	12611	13043	12687
$R_{[\text{N II}]}$	73.6	T(K)	11408	10273	10931	10565	
$R_{[\text{S II}]}$	0.64	Ne (cm^{-3})	3536				
$1/R_{[\text{S II}]}$	1.56						
$T_{[\text{O III}]} / T_{[\text{N II}]}$		1.12	1.23			1.23	

References

- 1,6 Osterbrock & Ferland, University Science Books, 2006
- 2,7 Kaler, A.J., 308, 1986
- 3 Kwok, Cambridge astrophysics series, 2007
- 4,4b Acker, EDP Sciences, 2011 21876.72
- 5,8 McKenna & al., P.A.S.P., 108, 1996
- 9 Acker & Jaschek, Masson, 1995
- 10 Gurzadyan & Egikyan, A.P. Supp. Ser., 181,1991
- 11 Dopita & Meatheringham, A.J., 357, 1990
- 12 Kaler & Jacony, A.J., 345, 1989

Excitation Class	Class	Scale
Gurzadyan 1998 ¹⁰	1.64	9 [1-12] high excitation
Dopita 1990 ¹¹	6.04	6 [1-10] 127438 T* [K]
Reid 2011 ¹²	7.97	7 [1-10] 184115 T* [K]
		135167 Kaler, 1989



[clear data](#)[enter test data](#)[take Synth. data](#)[Plasma analysis](#)[Ionic fractions](#)[Strong Line analyses](#)

Wavelength	Observed	Calculated	Analyse Obs.	Synthesize
[O II] 3728	0.0	0.0		
[Ne III] 3869	0.0	0.0	Extinction c	0.125
[O III] 4363	7	13.31	Temp. T(O III)	12734.6
He II 4686	16.6	30.92	Temp. T(N II)	10188.9
H I 4861	54.1	100.0	Density n(S II)	3016.42
[O III] 5007	552.9	1012.45		
[N II] 5755	0.8	1.39	Elemental abundances	H = 1.00
He I 5876	6	10.34	He/H	0.09247
[S III] 6312	0.0	0.0	N/H	1.194E-5
H I 6563	167.6	282.43	O/H	2.296E-4
[N II] 6584	46.1	77.61	Ne/H	0
[S II] 6717	3.9	6.45	S/H	4.667E-7
[S II] 6731	6.1	10.26	Ar/H	0
[Ar III] 7135	0.0	0.0	set Solar abundances	
[O II] 7325	0.0	0.0		

Plasma diagnostics and strong line analysis of an emission line spectrum

© J.Köppen Kiel/Strasbourg Jan 2007

Java Applets for Teaching of AstroPhysics

Joachim Köppen Strasbourg

<http://astro.u-strasbg.fr/~koppenn/nebula/Plasma3.html>

Spectroscopie des Nébuleuses Planétaires

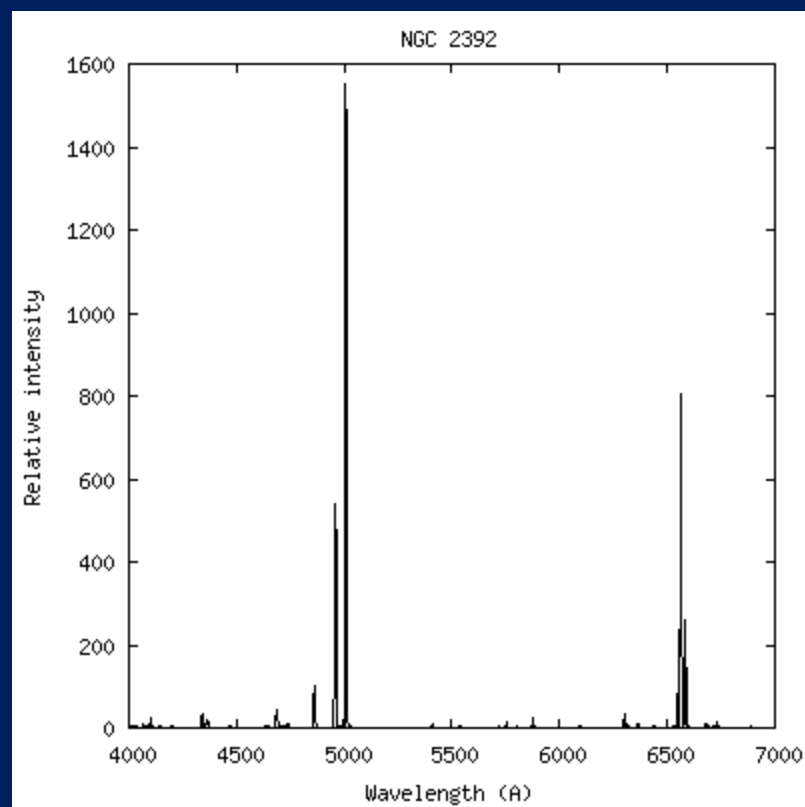
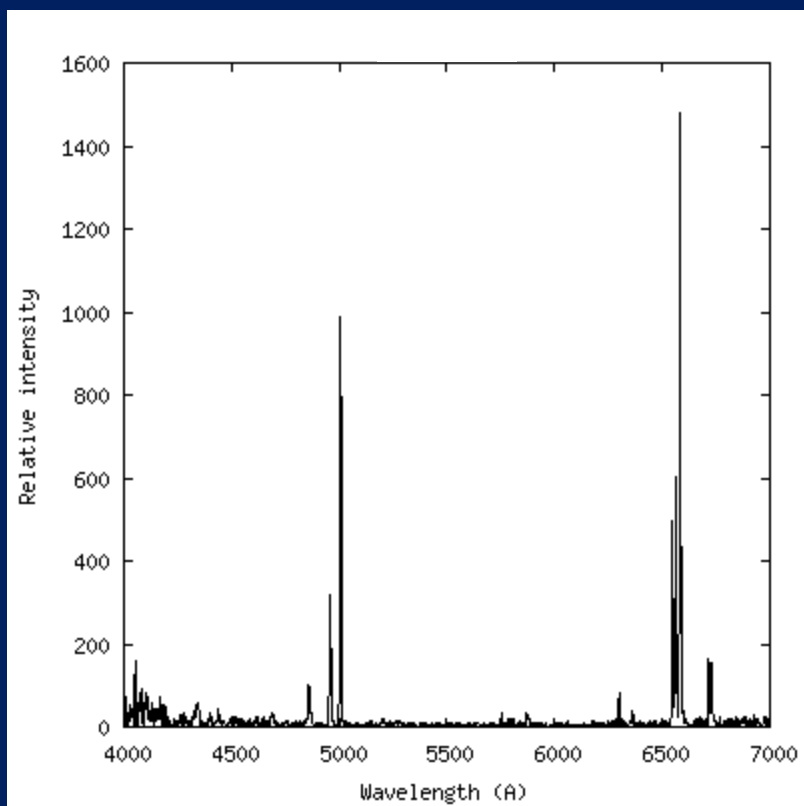
1. Identification et formation des raies
2. Mesure des paramètres physiques
- 3. Diversité des nébuleuses planétaires – Classe d'excitation**
4. Nébuleuse planétaire : une phase de la vie des étoiles $M < 8 M_{\odot}$
5. Discriminer les NP des autres objets à spectre d'émission
6. Intérêt de l'observation des NP en spectroscopie amateur
7. Références et annexes



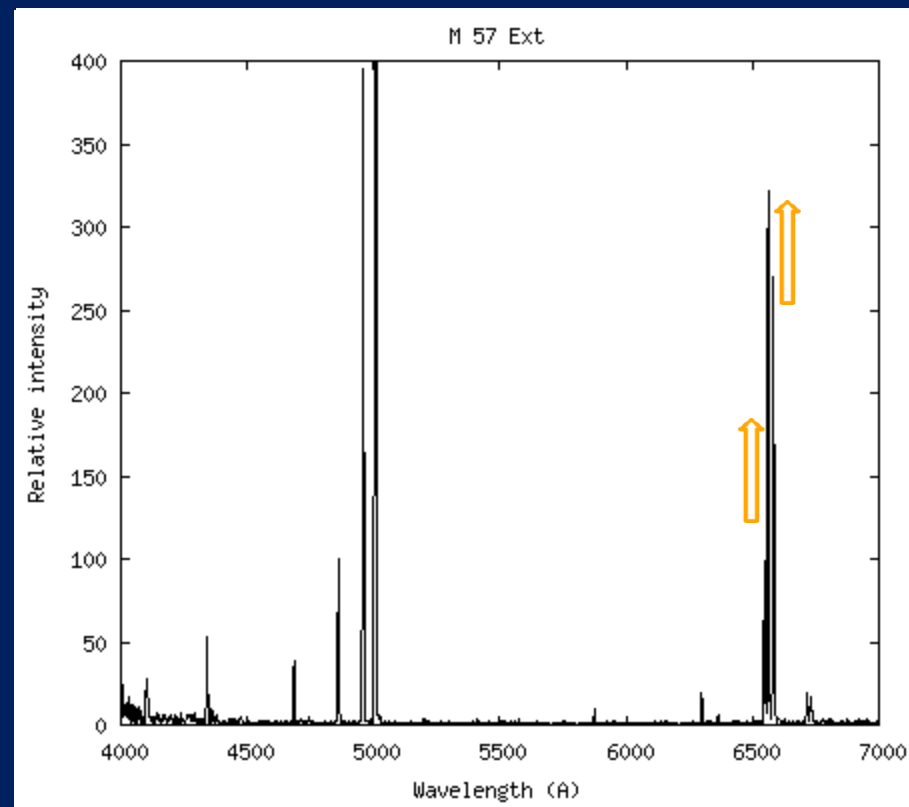
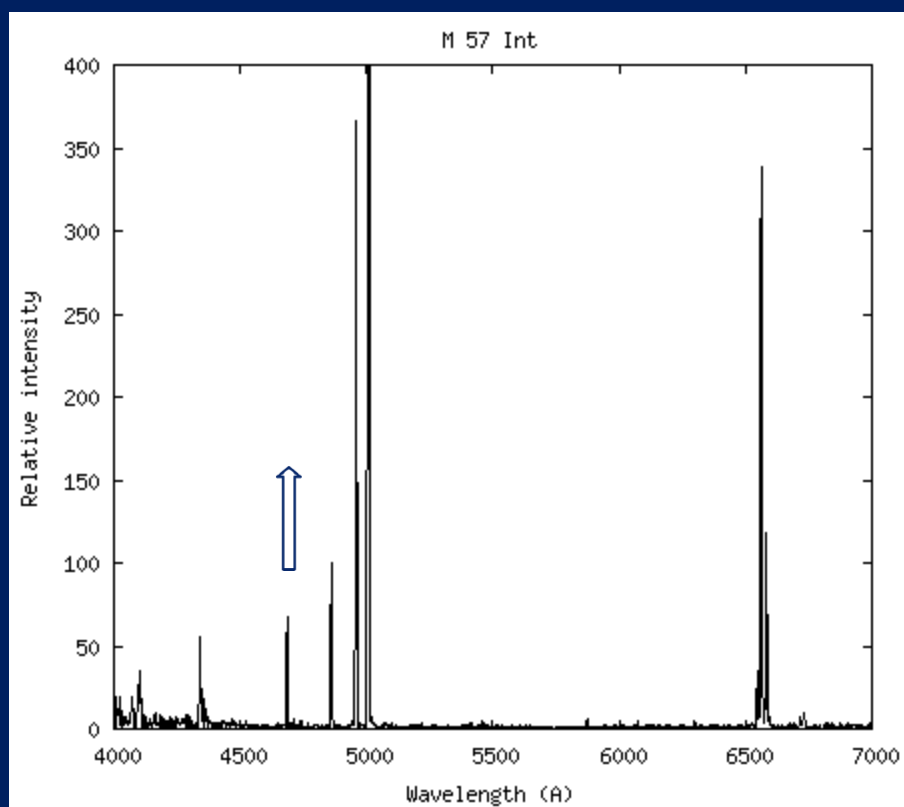
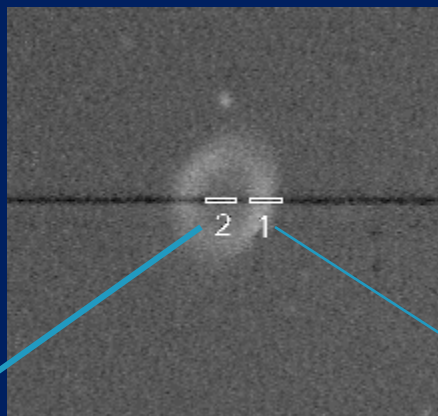


M 76

NGC 2392

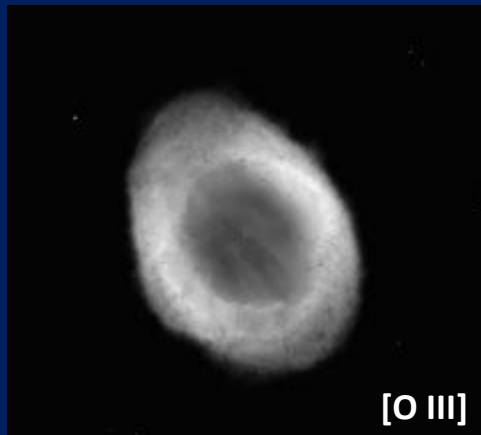


Des conditions physiques différentes
au sein d'une même nébuleuse
Exemple : M57

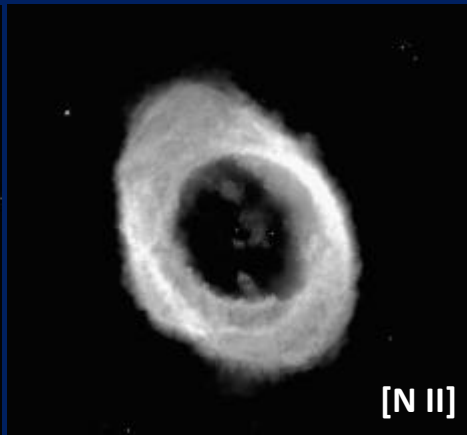




He II



[O III]

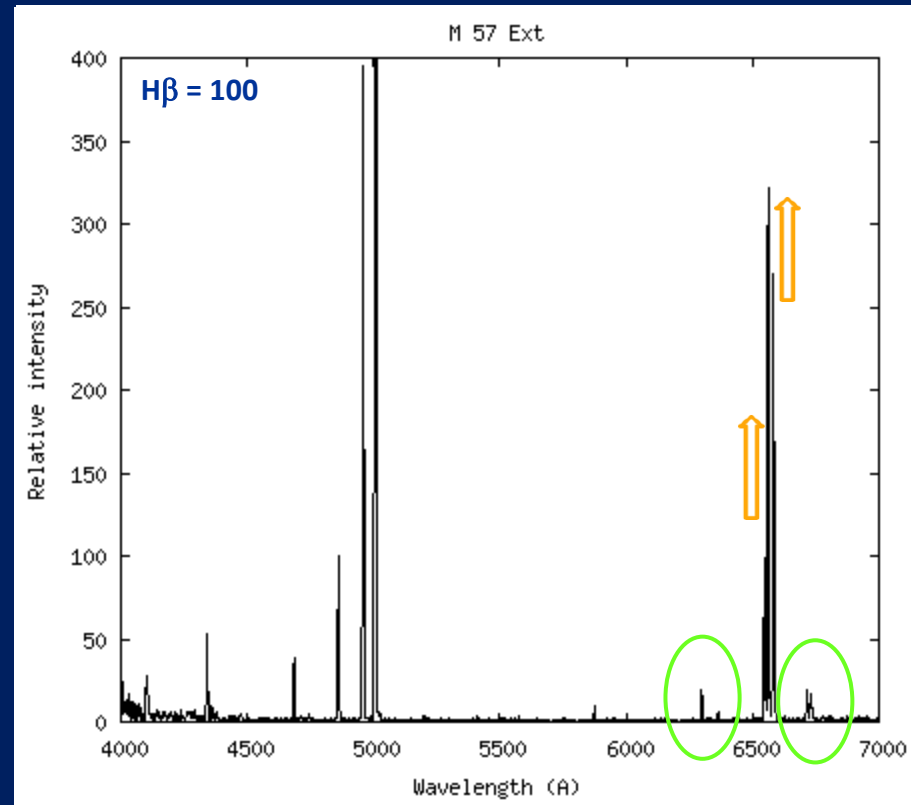
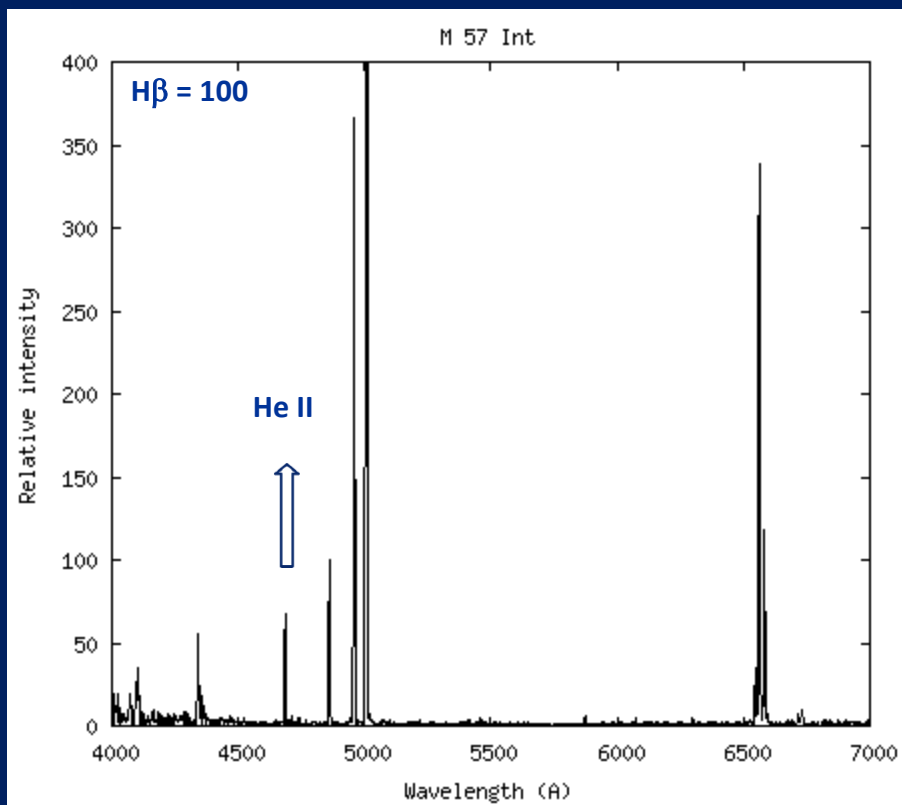


[N II]



M57 Intérieur

M57 Anneau



Classes d'excitation (E.C.)

Utilisation des intensités des raies
dans le but d'estimer la température de l'étoile centrale

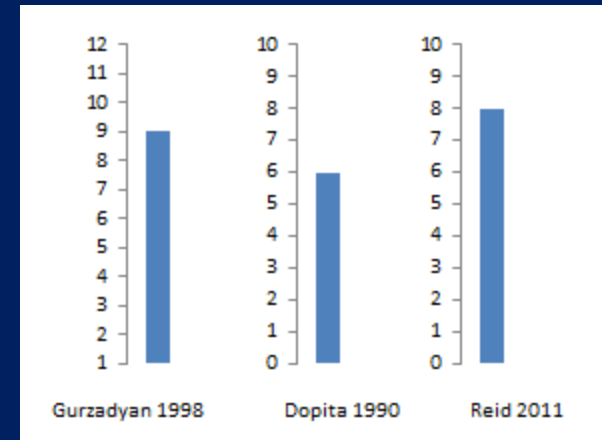
$$0 < E.C. < 5 \quad E.C. = 0.45 \times F_{[O III] 5007} / F_{H\beta}$$

$$5 \leq E.C. < 10 \quad E.C. = 5.54 \times F_{He II 4686} / F_{H\beta} + 0.78$$

Dopita & Meatheringham (1990)

Excitation Class		Class	Scale	
Gurzadyan 1998	10	1.64	9	[1-12] high excitation
Dopita 1990	11	6.04	6	[1-10]
Reid 2010	12	7.97	8	[1-10]

127438	Kaler, 1989
T* [K]	
184115	
135167	



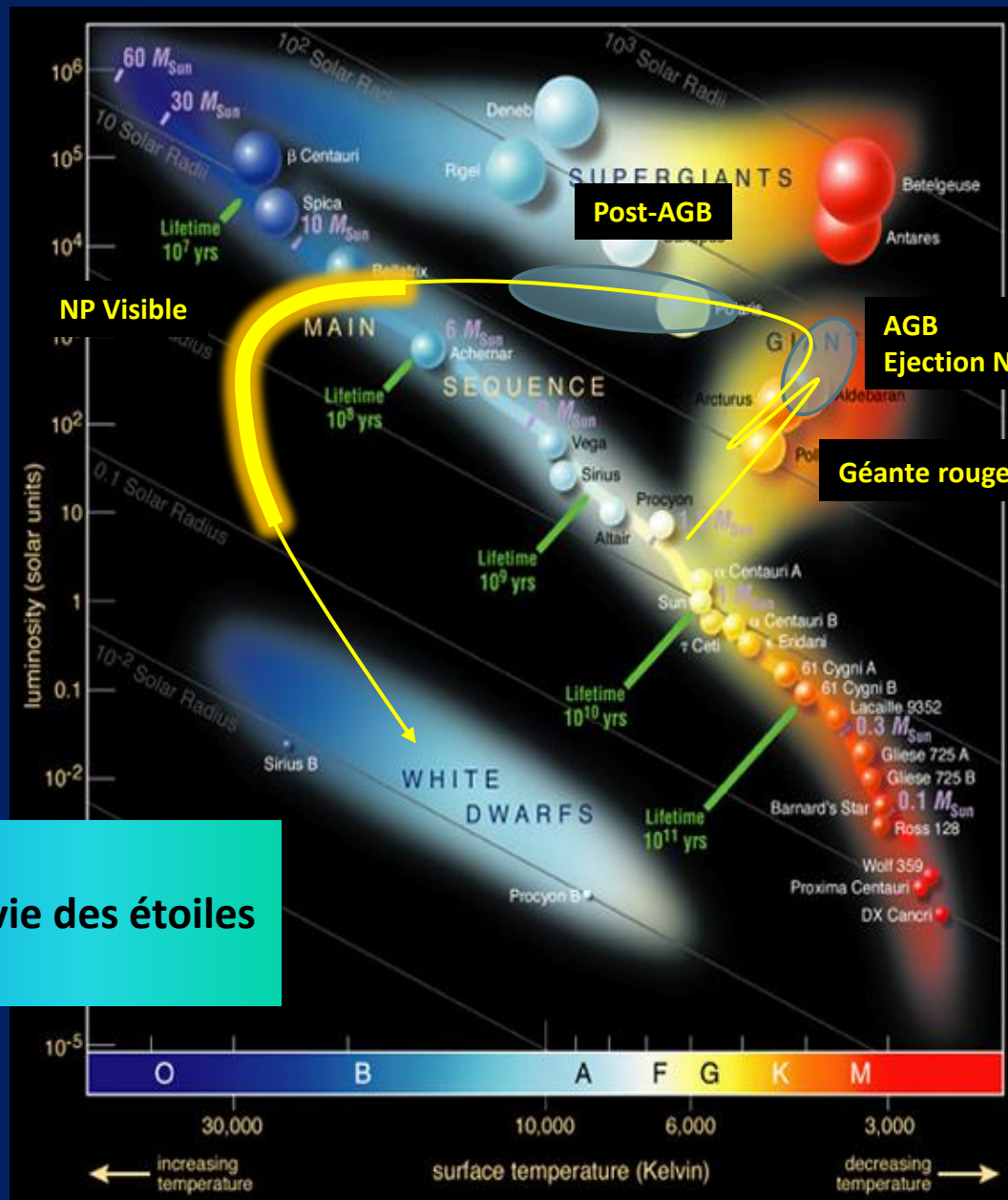
Notes :

1. plusieurs modèles donnant des évaluations différentes
2. Kaler & Jacobi (1991), autre méthode : $T^* < 70\,000\text{ K}$

Spectroscopie des Nébuleuses Planétaires

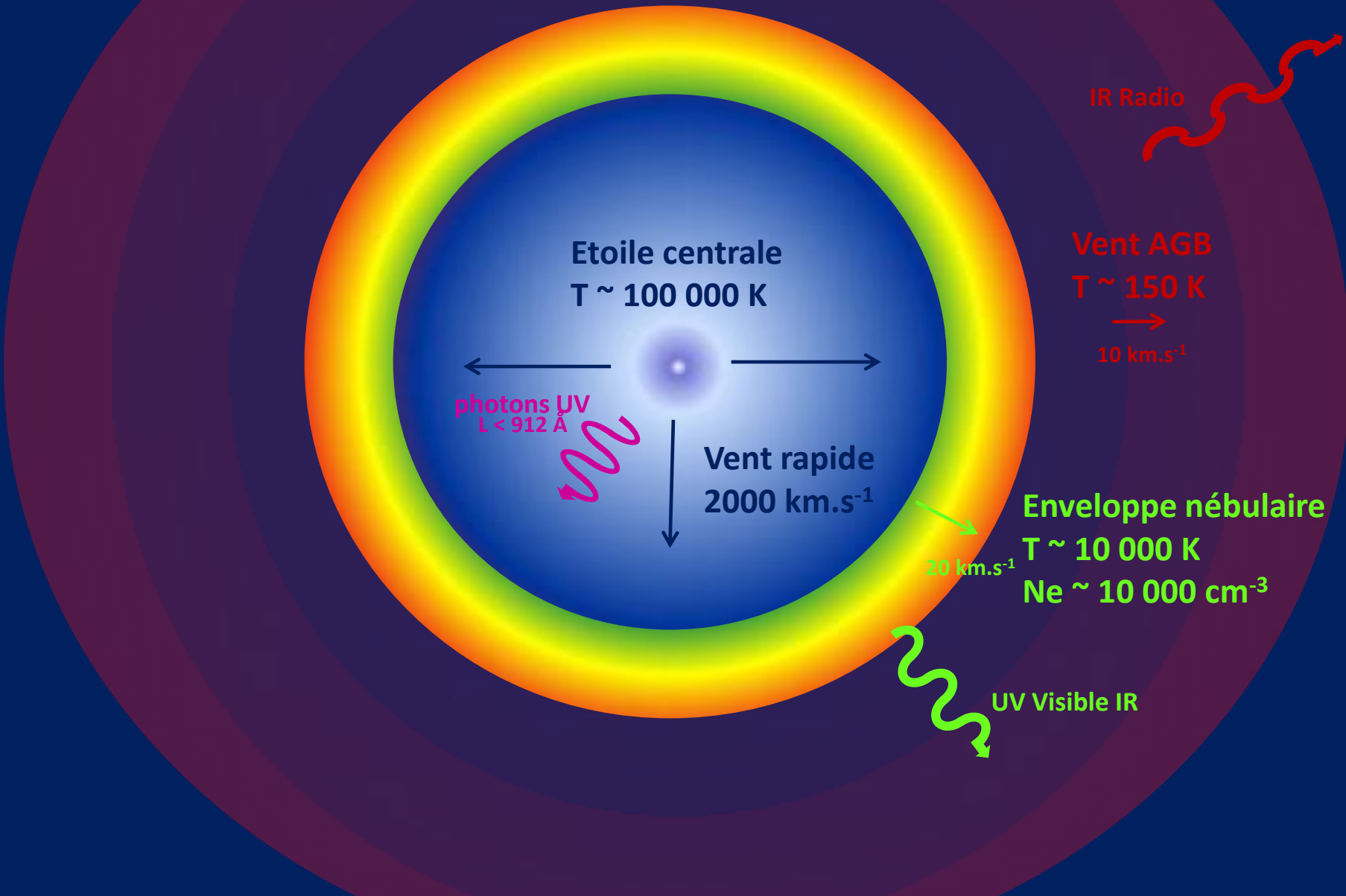
1. Identification et formation des raies
2. Mesure des paramètres physiques
3. Diversité des nébuleuses planétaires – Classe d'excitation
4. **Nébuleuse planétaire : une phase de la vie des étoiles $M < 8 M_{\odot}$**
5. Discriminer les NP des autres objets à spectre d'émission
6. Intérêt de l'observation des NP en spectroscopie amateur
7. Références et annexes





Nébuleuse planétaire
 Une courte phase dans la vie des étoiles
 de masse $< 8 M_{\odot}$

Schéma
Nébuleuse planétaire



Etoile centrale
 $T \sim 100\,000\text{ K}$

photons UV
 $\lambda < 912\text{ \AA}$

Vent rapide
 2000 km.s^{-1}

Vent AGB
 $T \sim 150\text{ K}$
 10 km.s^{-1}

Enveloppe nébulaire
 $T \sim 10\,000\text{ K}$
 $\text{Ne} \sim 10\,000\text{ cm}^{-3}$

IR Radio

UV Visible IR

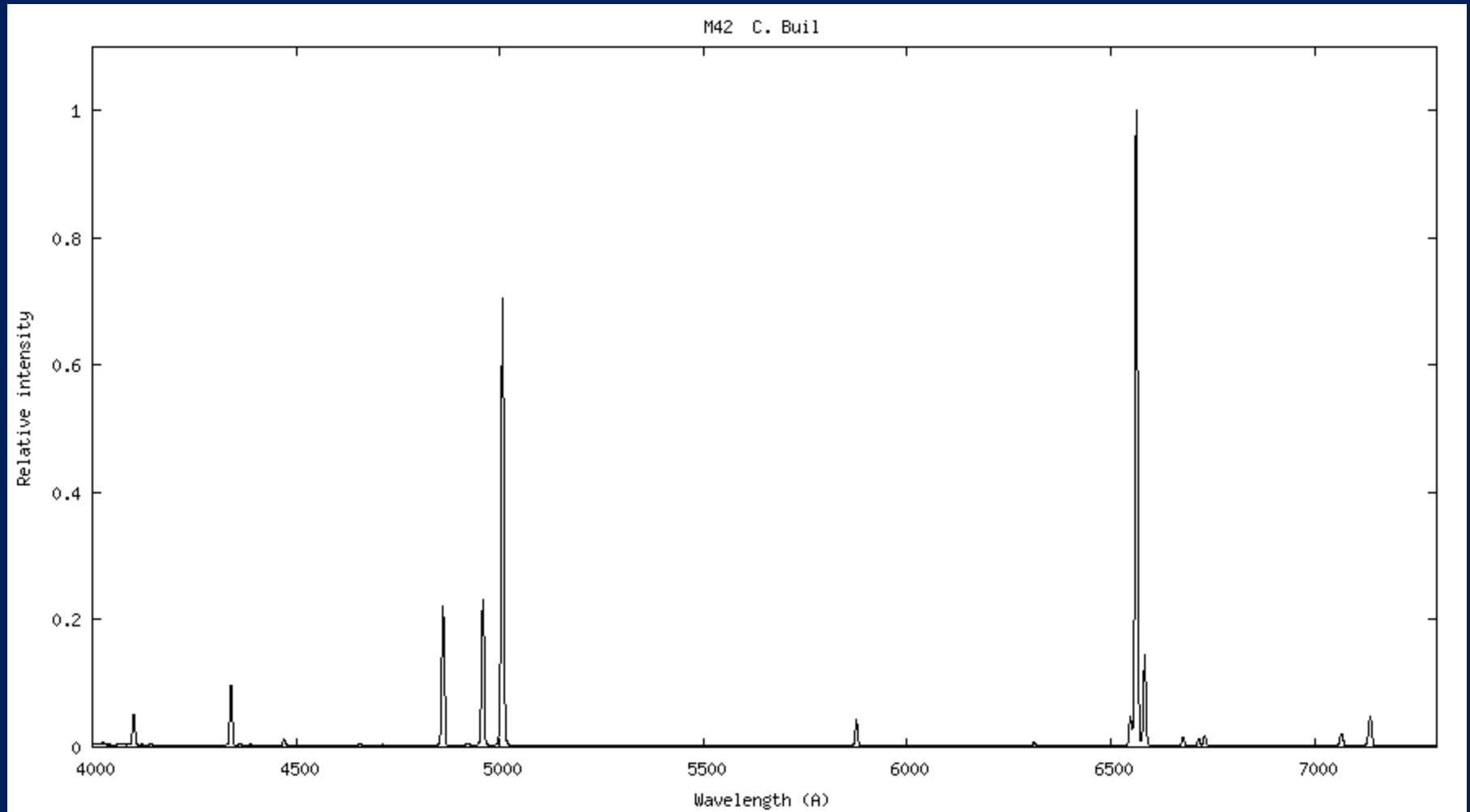
20 km.s^{-1}

Spectroscopie des Nébuleuses Planétaires

1. Identification et formation des raies
2. Mesure des paramètres physiques
3. Diversité des nébuleuses planétaires – Classe d'excitation
4. Nébuleuse planétaire : une phase de la vie des étoiles $M < 8 M_{\odot}$
5. **Discriminer les NP des autres objets à spectre d'émission**
6. Intérêt de l'observation des NP en spectroscopie amateur
7. Références et annexes

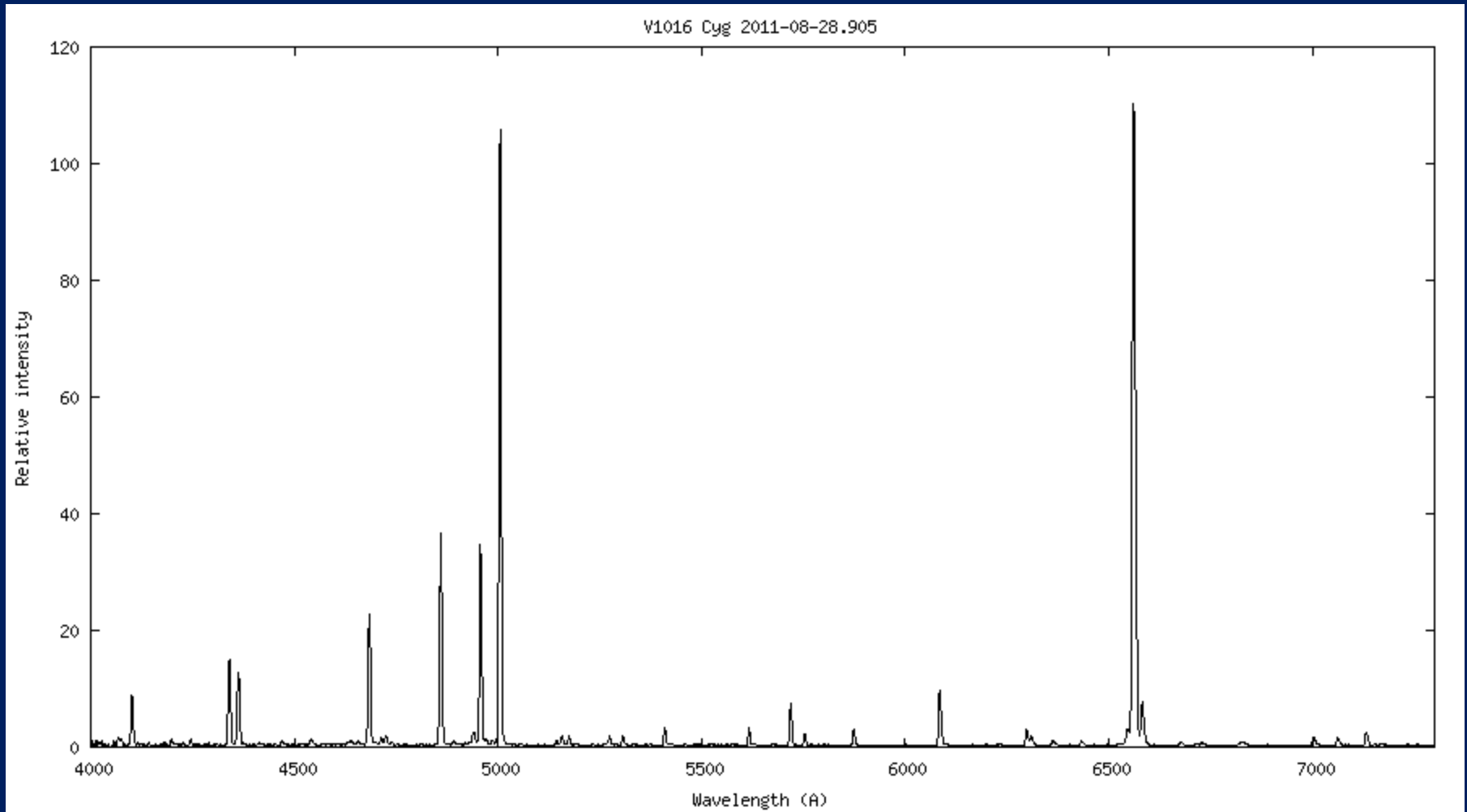


M42 Nébuleuse d'Orion



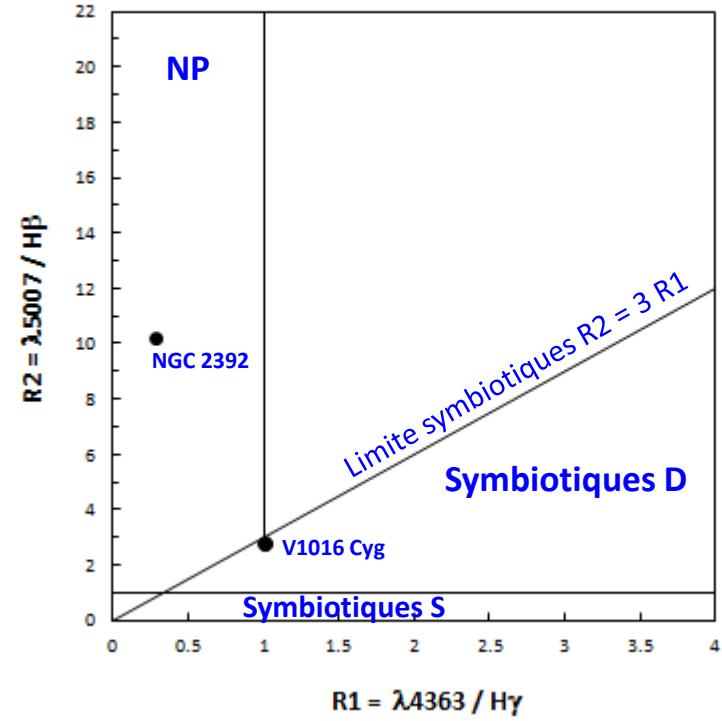
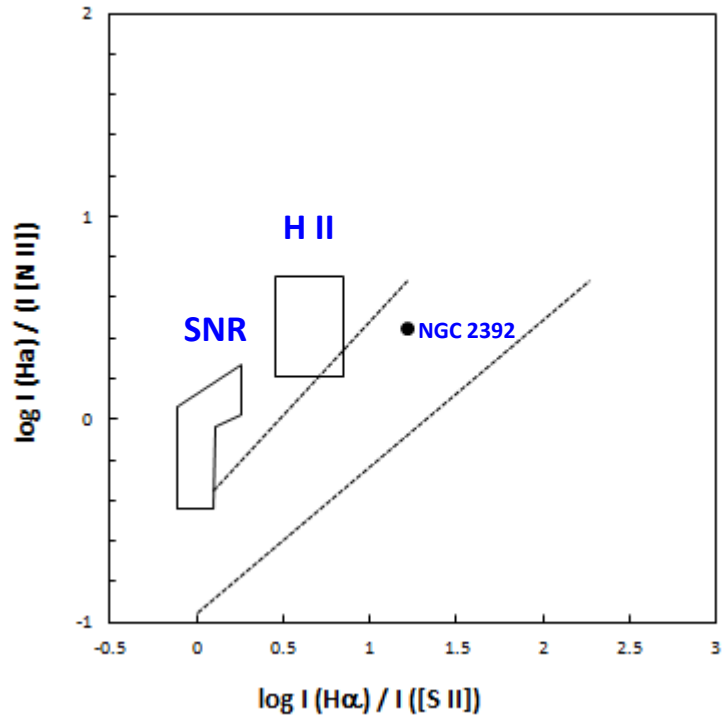
Etoiles Symbiotiques

V1016 Cyg



Nova Symbiotique

Diagrammes de diagnostic



Spectroscopie des Nébuleuses Planétaires

1. Identification et formation des raies
2. Mesure des paramètres physiques
3. Diversité des nébuleuses planétaires – Classe d'excitation
4. Nébuleuse planétaire : une phase de la vie des étoiles $M < 8 M_{\odot}$
5. Discriminer les NP des autres objets à spectre d'émission
6. Intérêt de l'observation des NP en spectroscopie amateur
7. Références et annexes



- 1. Initiation aux méthodes de mesures**
- 2. Des nébuleuses variables sur une courte échelle de temps**

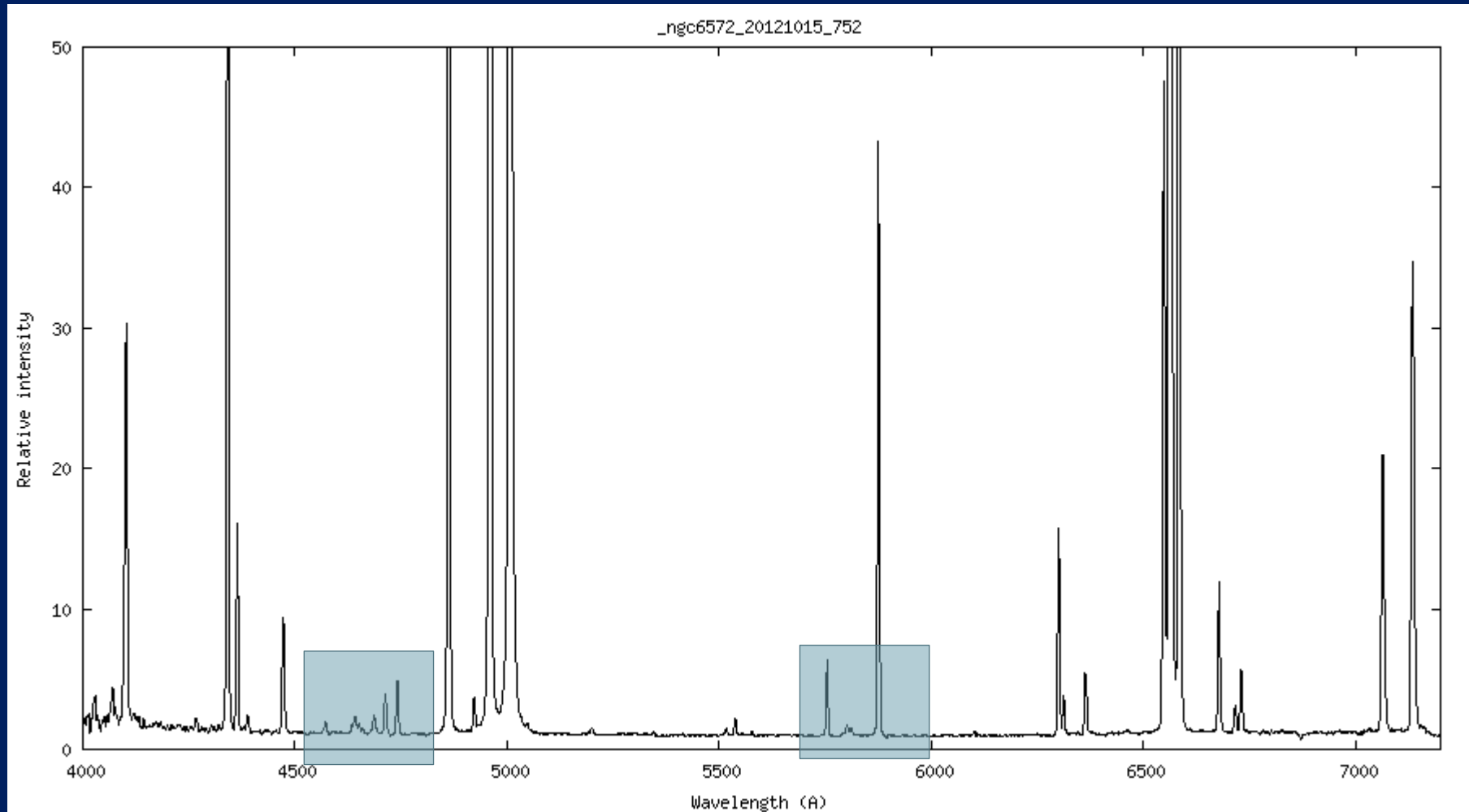
NGC 6572



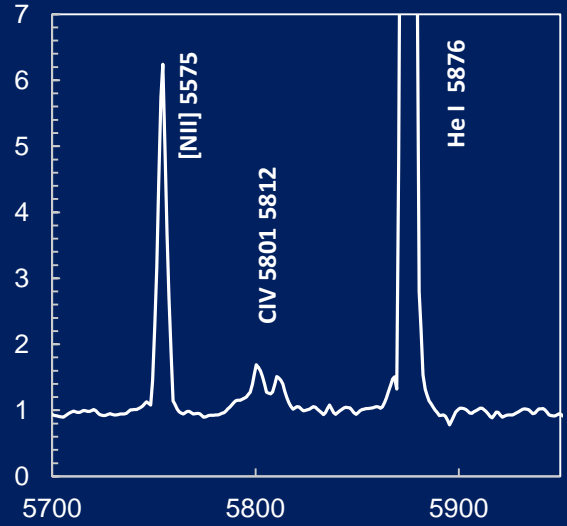
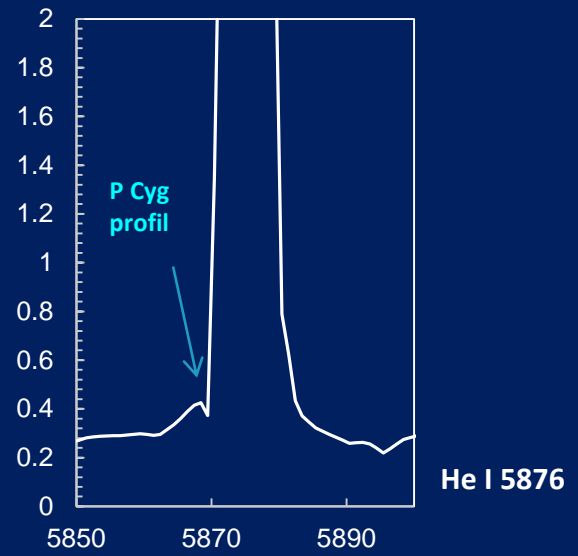
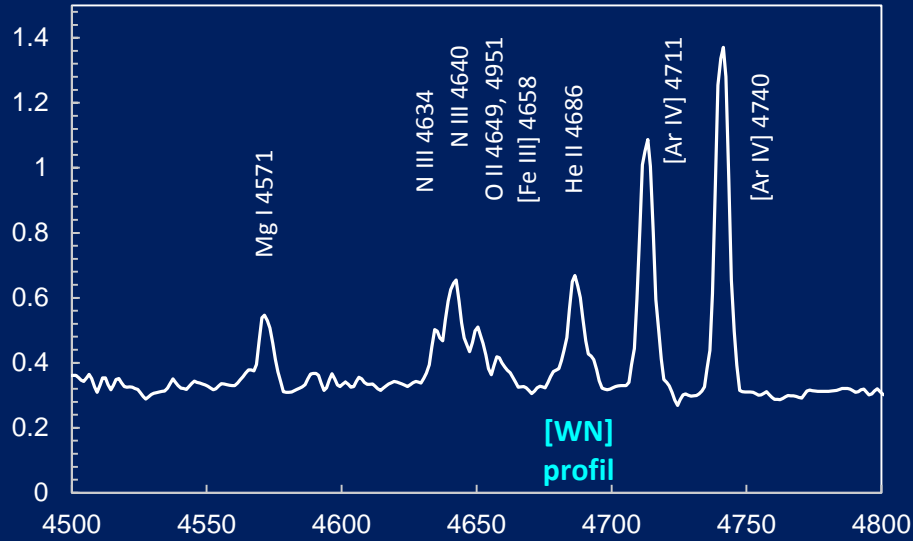
Aspect quasi-stellaire



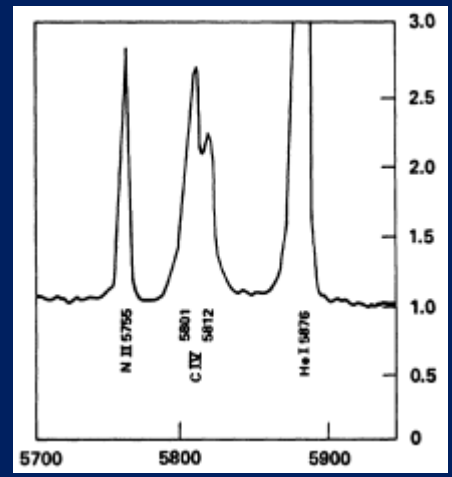
HST



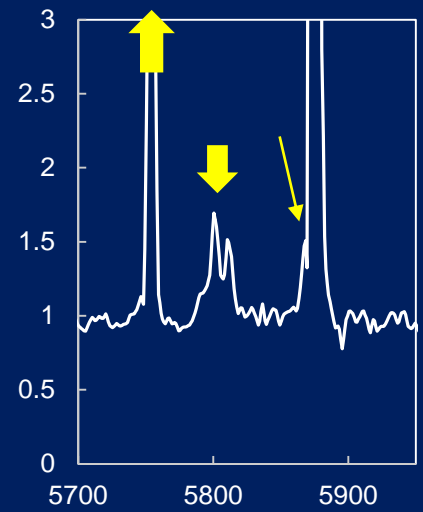
NGC 6572

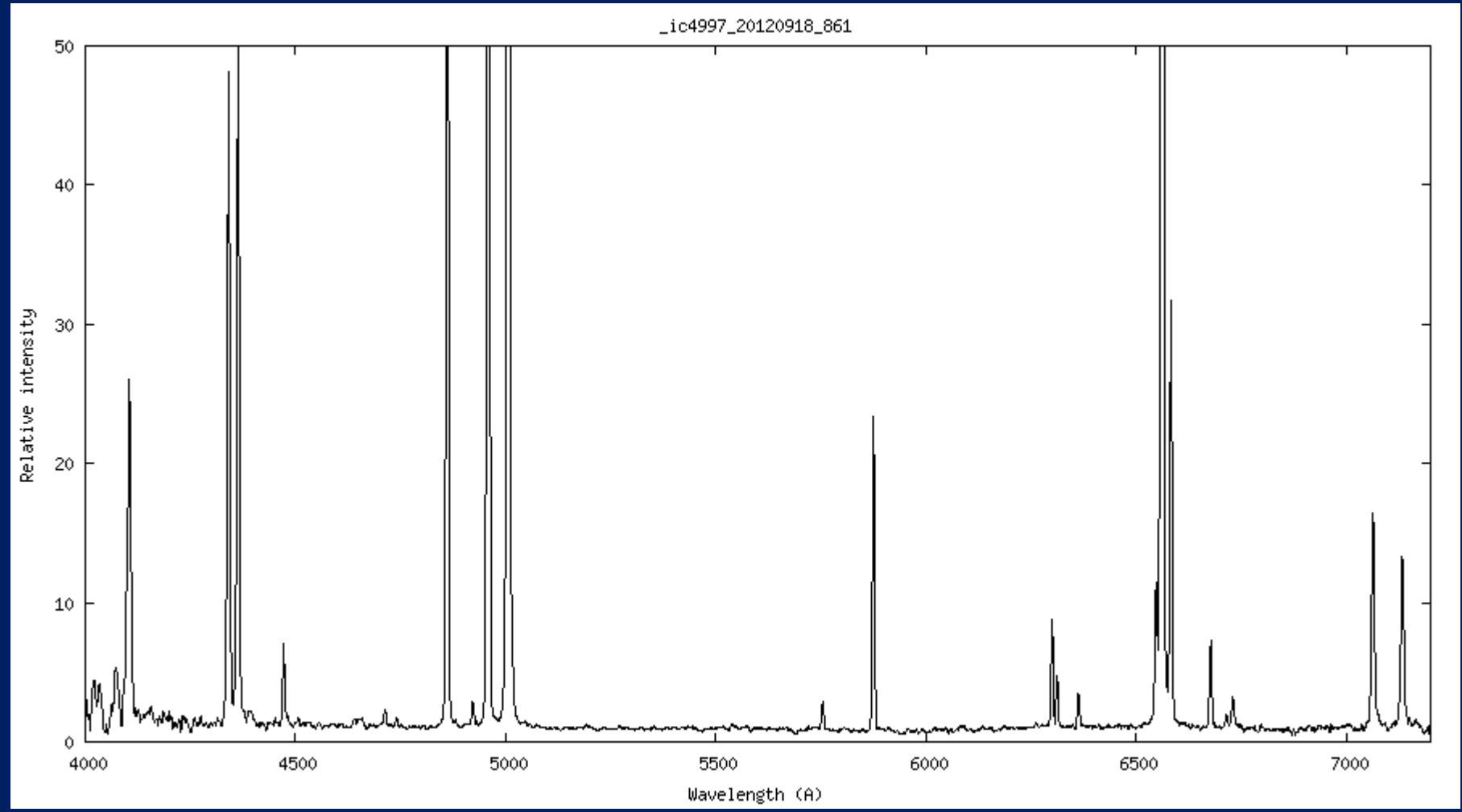


Feibelman & al., 1992



2012



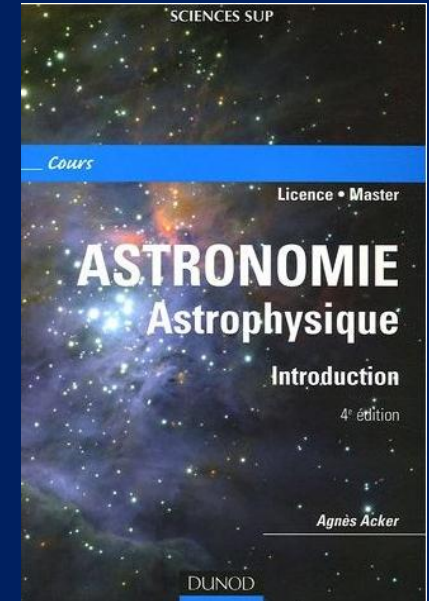
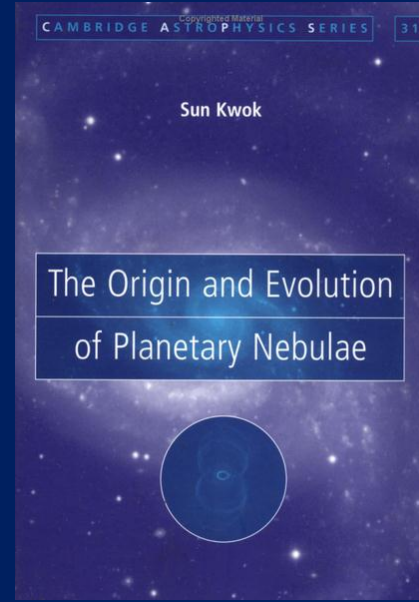
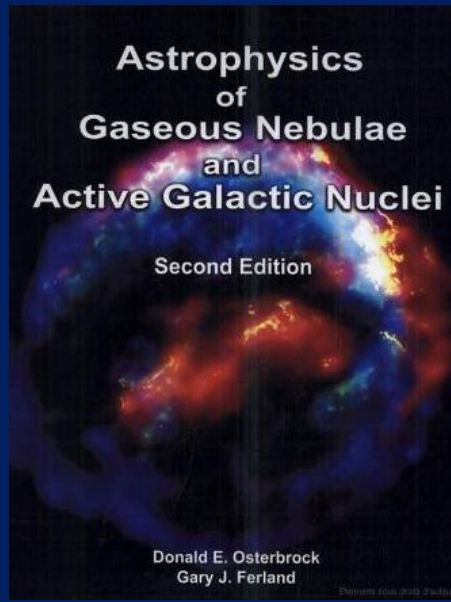
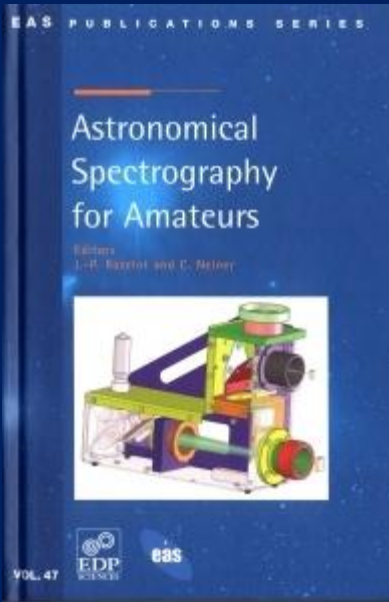


Spectroscopie des Nébuleuses Planétaires

1. Identification et formation des raies
2. Mesure des paramètres physiques
3. Diversité des nébuleuses planétaires – Classe d'excitation
4. Nébuleuse planétaire : une phase de la vie des étoiles $M < 8 M_{\odot}$
5. Discriminer les NP des autres objets à spectre d'émission
6. Intérêt de l'observation des NP en spectroscopie amateur
7. Références et annexes



Bibliographie



Spectrometry of nebulae
A. Acker

Références

Astrophysics of gaseous nebula and active galactic nuclei

D.E. Osterbrock & G.J. Ferland, University Science Books, 2006

The origin and evolution of planetary nebulae

S. Kwok, Cambridge astrophysics series, 2000, 2007

Spectroscopy of nebulae

A. Acker in Astronomical Spectrography for Amateurs
EAS Publications Series, 47 (2011) 189-214

Atomic Astrophysics and Spectroscopy

A. Pradhan & S. Nahar, Cambridge University Press, 2011

Astronomie, Astrophysique

A. Acker, Dunod, 2005

Kaler J.B. , 1976, ApJS, 31, 517

Kaler J.B. , 1986, ApJ, 308, 322

Acker A. & al., 1989, ESO Messenger, 58, 44

Excitation classes

Gurzadyan, G.A., & Egikyan, A.E., 1991 , AP&SS, 181, 73

Dopita M.A., & Meatheringham S.J., 1990, ApJ, 357, 140

Reid W.A. & Parker Q.A., arXiv:0911.3689v2, 2011

NGC 2392 studies

Pottasch S.R. and Bernard-Salas, J., 2008, A&A, 490, 715

Henry & al., 2000, ApJ, 531, 928

Barker T., 1991, ApJ, 371, 217

Formulaire