

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master en Sciences Physiques

---

# ÉTUDE DE SPECTRES INFRAROUGES D'ÉTOILES GÉANTES ROUGES ÉVOLUÉES

---

DÉPARTEMENT DE PHYSIQUE  
INSTITUT D'ASTRONOMIE ET D'ASTROPHYSIQUE

réalisé par  
Margaux VANDERERVEN

supervisé par  
Sophie VAN ECK

Année académique 2024-2025

# ÉTUDE DE SPECTRES INFRAROUGES D'ÉTOILES GÉANTES ROUGES ÉVOLUÉES

INSTITUT D'ASTRONOMIE ET D'ASTROPHYSIQUE

---

Margaux VANDERERVEN

## Abstract

La poussière

## Contents

<b>1</b>	<b>INTRODUCTION</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>DÉBROUSSAILLER</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>MOLÉCULES</b>	<b>2</b>
<b>4</b>	<b>TS</b>	<b>2</b>
<b>5</b>	<b>MINIMISATION <math>\chi^2</math></b>	<b>2</b>
<b>6</b>	<b>Macroturbulence</b>	<b>2</b>
<b>7</b>	<b>ABONDANCE CNO</b>	<b>2</b>
<b>8</b>	<b>Métallicité</b>	<b>3</b>
<b>9</b>	<b>Teff</b>	<b>3</b>
<b>10</b>	<b>logg</b>	<b>5</b>
<b>11</b>	<b>vitesse de micro</b>	<b>6</b>
<b>12</b>	<b>NLTE</b>	<b>6</b>
<b>13</b>	<b>abondance d'éléments lourds</b>	<b>6</b>
<b>14</b>	<b>détermination d'abondance</b>	<b>6</b>
<b>A</b>	<b>Table</b>	<b>8</b>

# 1 INTRODUCTION

# 2 DÉBROUSSAILLER

# 3 MOLÉCULES

Synthèse avec modèle :

Modèle	$T_{\text{eff}}$ (K)	$\log g$ (cm s <sup>-2</sup> )	[Fe/H] (dex)	Mass (M <sub>☉</sub> )	[s/Fe] (dex)
A	4000	1.00	-0.50	1.0	+0.00

**Notes.** 4000g1.0z-0.50m1.0t02a+0.20c+0.346n+0.00o+0.20r+0.00s+0.00

**Table 1.** Modèles de MARCS utilisés pour les synthèses.

TODO: parler des modèles MARCS et de la grille de modèles.

Les listes de raies nous ont été fournies par Thomas Masseron, la provenance détaillée est donnée en Table 2.

Les listes de raies atomiques ont la forme suivante :

longueur d'onde (Å) - excitation (eV) - log gf - log gf - fdamp - gup

on garde du coup 3 listes de raies atomiques et 14 listes de raies moléculaires.

# 4 TS

# 5 MINIMISATION $\chi^2$

$$\chi^2 = \sum \frac{(\text{synthétique} - \text{observé})}{\text{observé}}$$

on fait passer une fonction quadratique sur les valeurs de chi2 et on regarde le minimum. si deux valeurs, on interpole une grille et on regarde le minimum. TODO: mettre plot pour expliquer la minimisation.

# 6 Macroturbulence

Nous commençons par déterminer la macroturbulence à l'aide de raies propres dans le bande H et K. Nous effectuons des synthèses avec le modèle A de la Table 1 et les abondances CNO et paramètres stellaires de la littérature [Shetye et al. 2018](#). Nous procédons par minimisation  $\chi^2$  sur différentes raies propres avec comme paramètre libre l'abondance de l'élément et la macroturbulence. Les autres abondances sont scale à partir de [Asplund et al. 2007](#).

# 7 ABONDANCE CNO

il n'y a pas de raies atomiques de C, N, O dans l'infrarouge, donc nous regarderons les molécules de OH pour l'abondance d'oxygène, de CO pour l'abondance de carbone et de CN pour l'abondance de carbone.

Nous partons des paramètres stellaires de la littérature. [C/Fe]=0.35, [N/Fe]=-0.1, C/O=0.75  $\log(C/O) = \log\epsilon_C - \log\epsilon_O$

si on prend abu solaire de Magg 2022,  $[X/Fe] = \log\epsilon_* - \log\epsilon_{sun} - [Fe/H]$   $\log\epsilon_* = [X/Fe] + \log\epsilon_{sun} + [Fe/H] = -0.1 + 7.98 - 0.3 = 7.58$  pour azote  $\log\epsilon_{sun_N} = 7.98$   $\log\epsilon_{sun_O} = 8.77$   $\log\epsilon_{sun_C} = 8.56$   $\log\epsilon_*$  pour C = 0.35 + 8.56 - 0.3

Abondance d'oxygène avec raie de OH, Cabu=8.44 (litt) et Nabu=7.38 (litt) [Asplund et al. 2007](#) avec un ratio de 12C/13C à 40 (valeur standard pour géantes) Données d'entrée : 0.35 +8.39 - 0.3 = 8.44 pour C -0.1 +7.78 - 0.3 = 7.38 pour N Paramètres variables : Oabu macro 8.6

-> Oabu = 8.60 ± 0.01 voir Table ??.

Puis on repasse sur les raies de CO pour checker C avec donc Oabu = 8.59 et Nabu = 7.38 (litt) tjrs ratio 12C/13C.

Molécules	Auteur
<sup>16</sup> OH	Brooke
<sup>56</sup> FeH	Dulick + Hargreaves
<sup>28</sup> SiO	Barton exomol
<sup>28</sup> SiH	Yurchenko2017(EXOMOL)
HCl	HITRAN
<sup>12</sup> CH	Masseron2014
<sup>13</sup> CH	Masseron2014
AlH	Yurchenko 2018(EXOMOL)
<sup>12</sup> C <sup>14</sup> N	Snedden web
<sup>13</sup> C <sup>14</sup> N	Snedden web
YO	HITRAN
HF	PGopher
<sup>12</sup> C <sup>16</sup> O	HITRAN (Li 2018)
<sup>13</sup> C <sup>17</sup> O	HITRAN (Li 2018)
<sup>48</sup> TiO	toto Exomol
H <sup>12</sup> CN	Exomol
H <sup>13</sup> CN	Exomol
<sup>52</sup> CrH	Burrows 2002
ZrO	toto Exomol
<sup>13</sup> C <sup>13</sup> C	EXOMOL
<sup>12</sup> C <sup>13</sup> C	EXOMOL
<sup>12</sup> C <sup>12</sup> C	EXOMOL
MgH	Yadin (EXOMOL)
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	HITRAN
VO	VOMYT
<sup>14</sup> NH	Brooke edited by EXOMOL
H <sub>2</sub> O	Barber & Tennyson
<sup>20</sup> CaH	Yadin (EXOMOL)

**Table 2.** Provenance détaillée des listes de raies moléculaires.

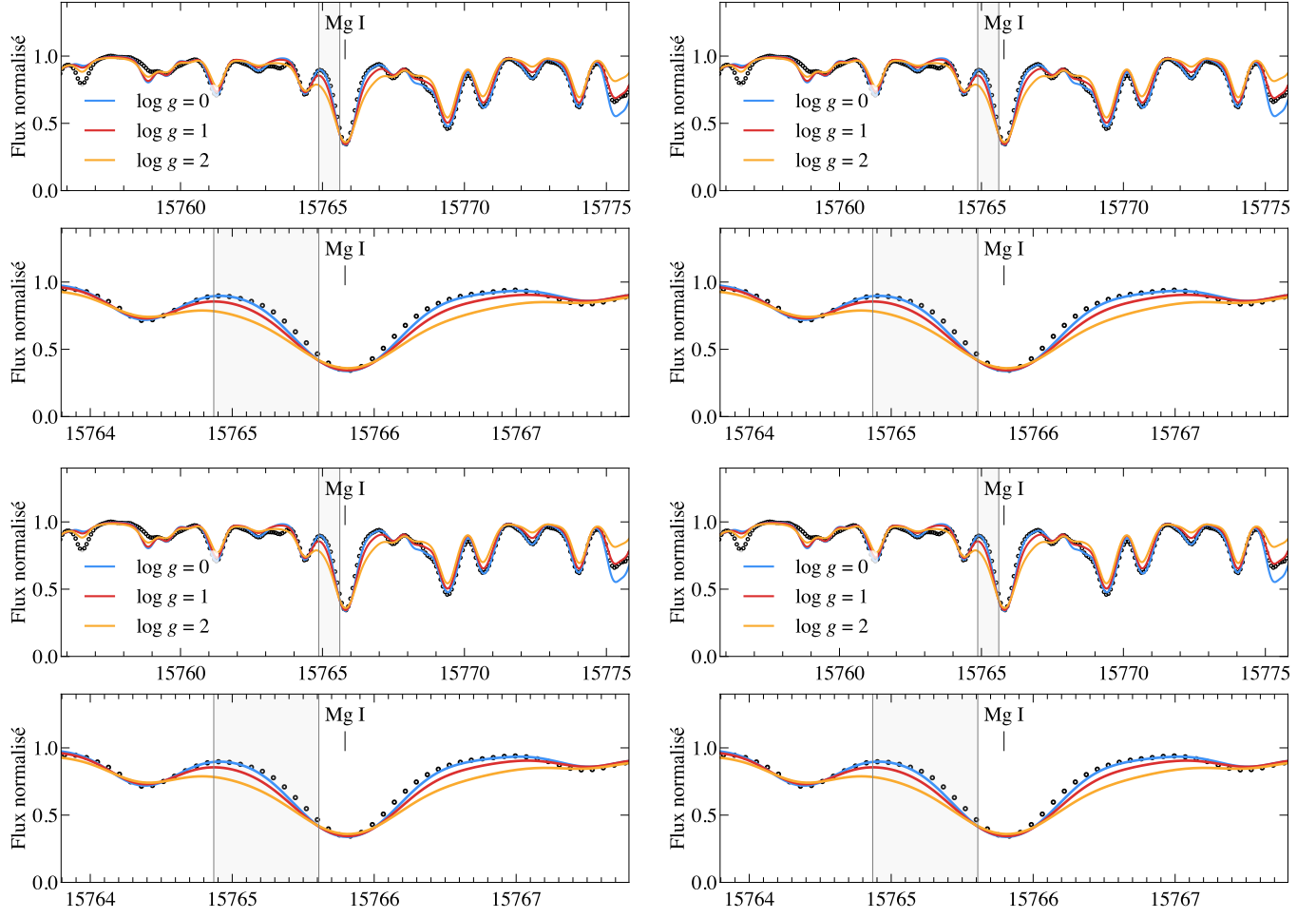
Notes.

## 8 Métallicité

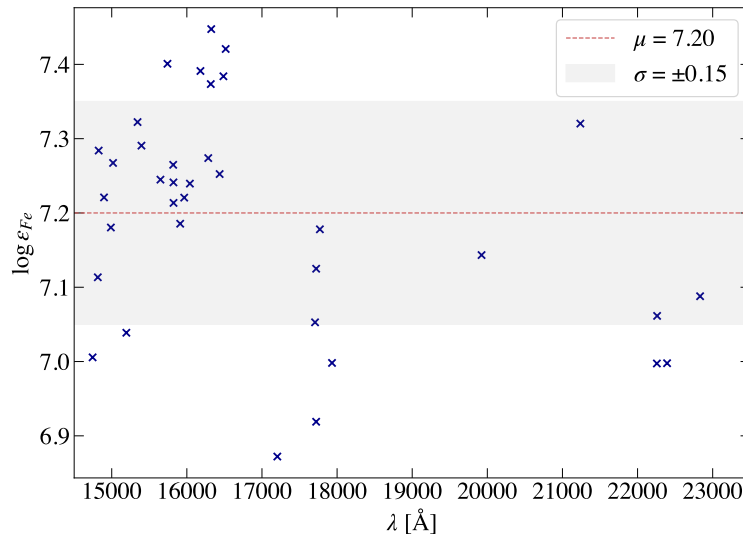
$\log \varepsilon_{\text{Fe}} = 7.21$  solaire 7.45 donc  $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.24$  à l'ETL  
en 16198.56 frot blendée, on l'élimine. 16645.874 pareil, on l'élimine.

## 9 Teff

pente de quasi 0 donc 4000K bonne Teff à l'ETL



**Notes.** Variation de la gravité de surface de l'étoile.



**Notes.** Abondance de Fe en fonction de la longueur d'onde. Dispersion forte, on regarde en détail les raies de Fe I.

Molécules	Bande H	Bande K	Cat.	Molécules	Bande H	Bande K	Cat.
$^{12}\text{C}^{14}\text{N}$	55.14 %	44.35 %	I	$^{28}\text{SiH}$	< 0.01 %	0.02 %	III
$^{13}\text{C}^{14}\text{N}$	32.00 %	14.51 %	I	$^{28}\text{SiO}$	< 0.01 %	0.04 %	III
$^{12}\text{C}^{16}\text{O}$	75.33 %	72.01 %	I	VO	0.03 %	< 0.01 %	III
$^{13}\text{C}^{17}\text{O}$	0.04 %	1.96 %	II	YO	< 0.01 %	< 0.01 %	III
$^{16}\text{OH}$	59.68 %	31.59 %	I	$^{48}\text{TiO}$	0.06 %	< 0.01 %	III
$^{56}\text{FeH}$	3.12 %	0.08 %	II	$^{24}\text{MgH}$	< 0.01 %	< 0.01 %	III
HF	17.79 %	57.16 %	I	AlH	< 0.01 %	< 0.01 %	III
$^{12}\text{CH}$	4.68 %	10.68 %	I	$^{52}\text{CrH}$	< 0.01 %	0.00 %	III
$^{13}\text{CH}$	0.15 %	0.39 %	III	$\text{H}^{12}\text{CN}$	< 0.01 %	< 0.01 %	III
$^{14}\text{NH}$	1.57 %	1.23 %	II	$\text{H}^{13}\text{CN}$	< 0.01 %	< 0.01 %	III
$^{12}\text{C}^{12}\text{C}$	32.97 %	30.73 %	I	$^{90}\text{ZrO}$	0.02 %	< 0.01 %	III
$^{12}\text{C}^{13}\text{C}$	14.12 %	12.26 %	I	$^{91}\text{ZrO}$	< 0.01 %	< 0.01 %	III
$^{13}\text{C}^{13}\text{C}$	0.38 %	0.25 %	III	$^{92}\text{ZrO}$	< 0.01 %	< 0.01 %	III
$\text{C}_2\text{H}_2$	0.00 %	0.00 %	III	$^{93}\text{ZrO}$	0.00 %	0.00 %	III
HCl	0.64 %	0.50 %	III	$^{94}\text{ZrO}$	< 0.01 %	< 0.01 %	III
$\text{H}_2\text{O}$	1.75 %	6.80 %	II	$^{96}\text{ZrO}$	< 0.01 %	< 0.01 %	III
$^{20}\text{CaH}$	< 0.01 %	< 0.01 %	III				

**Notes.** La catégorie I concerne les molécules contribuant à plus de 10%, la catégorie II celles à moins de 10% et plus de 1% et la catégorie III celles à moins de 1%. Les valeurs dans le colonne "Bande H" et "Bande K" sont le pourcentage en absorption du plus grand extremum du tracé de la différence entre le spectre synthétique atom + mol et le spectre synthétique atomique simple.  $\log\epsilon_C = 9,44$ ,  $\log\epsilon_O = 9,56$  et  $\log\epsilon_N = 8,38$ ,  $\text{MACTurb} = 8,00 \text{ kms}^{-2}$ ,  $\text{MICROturb} = 1,70$  et  $z = -0,3$ , ratio C = , ratio C/O=0.75.

Élément	$\lambda$ (Å)	$\lambda_{\min}$ (Å)	$\lambda_{\max}$ (Å)	$v_{\text{macro}}$ ( $\text{km s}^{-1}$ )	$\log \epsilon$	$\chi^2$
Fe I	15964.865			8.58		
Fe I	22257.107	22256.48	22257.87	8.65	7.10	0.0270
Fe I	22260.18	22259.67	22260.77	8.64	7.09	0.0132
Co I	16757.704			8.61		
Ti I	22211.22	22210.52	22211.91	8.90	4.88	0.0004
Ti I	22232.844			9.00		

**Notes.**

## 10 logg

on test plusieurs log g avec différents modèles, +1, +2, +0, +3, +4 -> best fit +1 à l'ETL sur des raies profondes principalement de Mg et Ca (à tester encore) checker avec les isochrones et les tracés évolutifs l'un suppose l'âge de l'étoile l'autre sa masse

$\log \varepsilon_{\text{O}}$	$\log \varepsilon_{\text{C}}$	$\log \varepsilon_{\text{N}}$	$^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$	Element
$8.60 \pm 0.01$	8.44	7.38	40	$^{16}\text{OH}$
8.60	$7.79 \pm 0.03$	7.38	40	$^{12}\text{C}^{16}\text{O}$
8.59	7.82	7.38	20	$^{13}\text{C}^{17}\text{O}$
$8.30 \pm 0.02$	7.82	7.38	20	$^{16}\text{OH}$
8.30	$7.89 \pm 0.02$	7.38	20	$^{12}\text{C}^{16}\text{O}$
$8.33 \pm 0.02$	7.89	7.38	20	$^{16}\text{OH}$
8.33	$7.86 \pm 0.03$	7.38	20	$^{12}\text{C}^{16}\text{O}$
8.33	7.86	$7.84 \pm 0.02$	20	$^{12}\text{C}^{14}\text{N}$
8.33	7.86	7.84	12	$^{13}\text{C}^{14}\text{N}$
$8.31 \pm 0.01$	7.86	7.84	12	$^{16}\text{OH}$
8.31	$7.88 \pm 0.03$	7.84	12	$^{12}\text{C}^{16}\text{O}$
8.31	7.88	$7.84 \pm 0.02$	12	$^{12}\text{C}^{14}\text{N}$

**Notes.** Chaque synthèse est réalisée sur des raies de l’élément se trouvant en 4ème colonne. Les paramètres fixés sont en noir et le paramètre déterminé en bleu.

## 11 vitesse de micro

regarder avec eqwuidt la largeur équivalente sinon regarder avec les synthèses et plot python

## 12 NLTE

faire tourner le code poiur les atomes pas possible de faire de hors etl pour les molécules, même pas pour tous les atomes

## 13 abondance d’éléments lourds

regarder ce que je peux identifier

Ca I, Mg I, Al I, Si I, K I, Ca I, Sc I, Ti II, Ti II, V I, Mn I, Fe I, Co I, Ni I, Cu I, Y I, Zr I, Ba I, Ce II, Ce III, Er II, Yb II.

## 14 détermination d’abondance

	$\lambda$	$\log gf$	$\lambda_{\text{min}}$	$\lambda_{\text{max}}$	$\chi^2$	$\log \varepsilon$
Na I	19452.98	-0.65	19451.82	19453.88		
	19505.74	-1.13	19504.79	19506.51		
	19776.77	-0.39	19775.41	19777.84		
	19853.09	0.40	19851.97	19854.25		
	19862.19	-1.14	19861.22	19863.30		
Al I						

**Notes.**

## References

- M. Asplund, N. Grevesse, and A. J. Sauval. The Solar Chemical Composition. *Space Science Reviews*, 130:105–114, June 2007. ISSN 0038-6308. doi: 10.1007/s11214-007-9173-7. URL <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2007SSRv..130..105G>. ADS Bibcode: 2007SSRv..130..105G.
- S. Shetye, S. V. Eck, A. Jorissen, H. V. Winckel, L. Siess, S. Goriely, A. Escorza, D. Karinkuzhi, and B. Plez. S stars and s-process in the Gaia era - I. Stellar parameters and chemical abundances in a sub-sample of S stars with new MARCS model atmospheres. *Astronomy & Astrophysics*, 620:A148, Dec. 2018. ISSN 0004-6361, 1432-0746. doi: 10.1051/0004-6361/201833298. URL <https://www.aanda.org/articles/aa/abs/2018/12/aa33298-18/aa33298-18.html>. Publisher: EDP Sciences.



# A Table

Fe I	$\lambda_{\min}$	$\lambda_{\max}$
14745.39	14745.01	14745.93
14814.73	14814.25	14815.41
14826.41	14825.87	14826.95
14897.41	14896.89	14897.82
14988.78	14988.28	14989.29
15017.70	15017.25	15018.10
15194.49	15194.00	15194.93
15343.79	15343.33	15344.26
15394.67	15394.21	15395.14
15395.72	15395.22	15396.31
15591.49	15590.94	15591.95
15648.51	15648.03	15648.96
15723.59	15723.00	15724.01
15741.92	15741.43	15742.36
15818.14	15817.57	15818.58
15821.71	15821.21	15822.14
15822.82	15822.30	15823.30
15911.30	15910.82	15911.83
15964.86	15964.27	15965.43
16040.65	16040.17	16041.10
16042.72	16042.18	16043.19
16125.90	16125.45	16126.45
16165.03	16164.40	16165.57
16180.90	16180.44	16181.29

Fe I	$\lambda_{\min}$	$\lambda_{\max}$
16198.50	16197.86	16198.95
16284.77	16284.22	16285.39
16316.32	16315.75	16316.91
16318.69	16318.07	16319.23
16324.45	16323.96	16325.04
16436.62	16436.19	16437.04
16466.92	16466.24	16467.55
16486.67	16486.07	16487.23
16506.29	16505.74	16506.75
16517.22	16516.66	16517.67
16645.87	16645.31	16646.39
17204.30	17203.74	17204.83
17706.62	17705.95	17707.11
17721.09	17720.51	17721.75
17721.37	17720.51	17721.75
17771.12	17770.46	17771.70
17932.60	17931.95	17933.19
19923.34	19922.62	19923.86
21238.47	21237.74	21239.13
22257.11	22256.07	22257.87
22260.18	22259.25	22260.91
22392.88	22392.15	22393.39
22419.98	22419.14	22420.67
22832.36	22831.40	22833.06

Notes.

$^{16}\text{OH}$	$\log gf$	$\lambda_{\min}$	$\lambda_{\max}$	$\log \varepsilon_{O_1}$	$\chi_1^2$
14661.14	-5.99	14660.60	14661.59	8.61	0.015
15002.15	-5.65	15001.67	15002.67	8.62	0.002
15003.12	-5.65	15002.67	15003.64	8.61	0.002
15130.92	-5.57	15130.32	15131.53	8.62	0.002
15266.17	-5.50	15265.54	15266.76	8.61	0.002
15278.52	-5.45	15278.03	15279.16	8.59	0.009
15391.20	-5.51	15390.49	15391.93	8.60	0.001
15409.17	-5.43	15408.47	15409.77	8.60	0.002
15428.40	-5.42	15427.96	15429.06	8.61	0.001
15429.69	-5.15	15429.03	15430.13	8.60	0.001
15505.75	-5.38	15504.80	15506.66	8.59	0.005
15568.78	-5.34	15568.17	15569.43	8.60	0.005
15651.90	-5.20	15651.33	15652.41	8.59	0.003
15719.69	-5.32	15719.09	15720.36	8.60	0.001
15755.52	-5.17	15754.86	15756.04	8.57	0.005
15756.53	-5.17	15756.06	15757.10	8.58	0.003
16052.77	-4.98	16052.15	16053.29	8.58	0.006
16247.88	-5.18	16247.50	16248.78	8.57	0.006
16312.92	-5.08	16311.80	16313.42	8.58	0.003
16347.49	-5.00	16347.12	16348.07	8.62	0.001
16368.14	-4.86	16367.51	16368.76	8.59	0.004
16662.20	-5.07	16661.77	16662.85	8.61	0.001
16729.78	-4.79	16729.47	16730.32	8.58	0.004
16904.28	-4.71	16903.62	16904.82	8.59	0.005
17322.25	-4.63	17321.83	17322.84	8.62	0.003
17423.86	-4.50	17423.35	17424.43	8.59	0.004

$^{12}\text{C}^{16}\text{O}$	$\lambda_{\min}$	$\lambda_{\max}$
15780.09	15779.54	15780.63
16237.90	16237.36	16238.29
16314.39	16313.89	16314.89
17026.00	17025.60	17026.45
17081.80	17081.37	17082.30
17129.35	17128.77	17129.85
23073.90	23073.11	23074.49
23109.40	23108.55	23110.21

$^{12}\text{C}^{14}\text{N}$	$\lambda_{\min}$	$\lambda_{\max}$
14744.25	14743.77	14744.54