

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

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

1 INTRODUCTION

2 DÉBROUSSAILLER

3 MOLÉCULES

Synthèse avec modèle :

Modèle	T_{eff} (K)	$\log g$ (cm s ⁻²)	[Fe/H] (dex)	Mass (M _⊙)	[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 :

Je m'appelle margaux

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

Table 2. Provenance détaillée des listes de raies moléculaires.

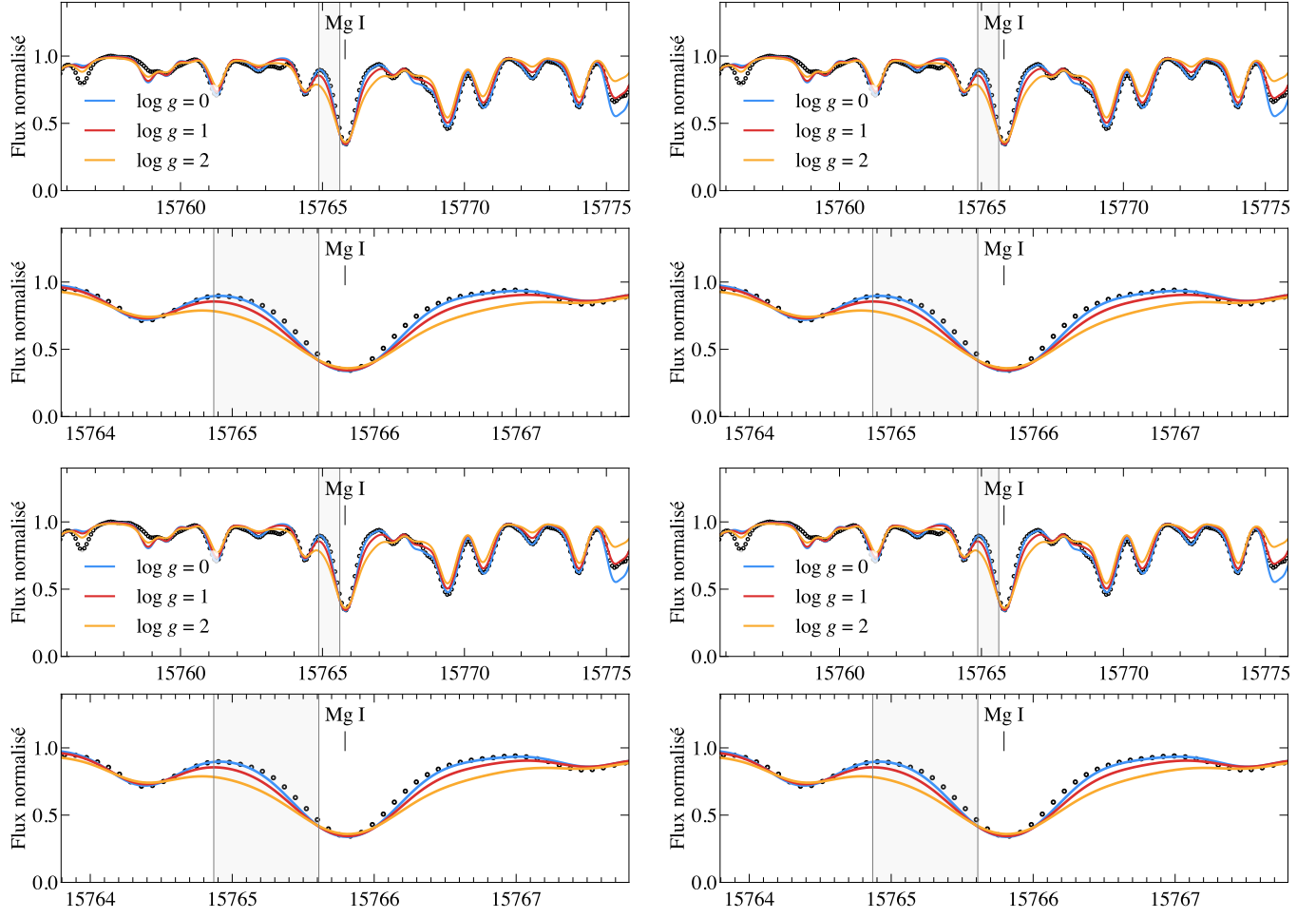
Notes.

8 Métallicité

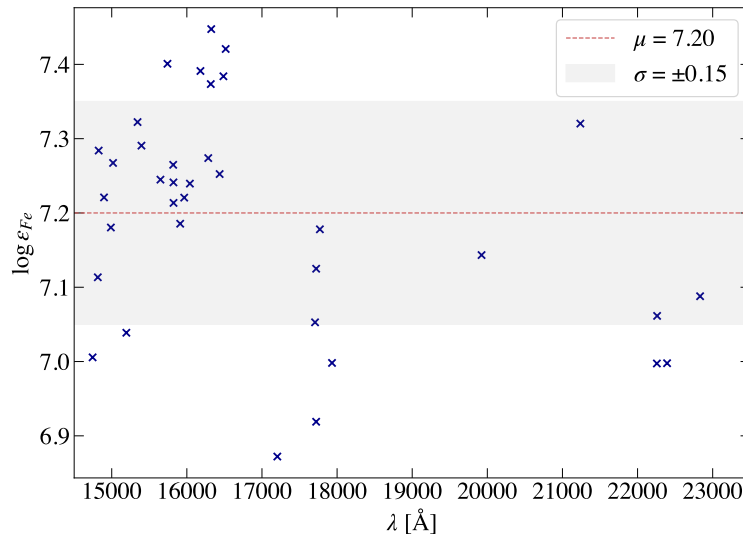
$\log \varepsilon_{\text{Fe}} = 7.21$ solaire 7.45 donc $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.24$ à l'ETL
en 16198.56 frot blendée, on l'élimine. 16645.874 pareil, on l'élimine.

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}SiH	< 0.01 %	0.02 %	III
$^{13}\text{C}^{14}\text{N}$	32.00 %	14.51 %	I	^{28}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}OH	59.68 %	31.59 %	I	^{48}TiO	0.06 %	< 0.01 %	III
^{56}FeH	3.12 %	0.08 %	II	^{24}MgH	< 0.01 %	< 0.01 %	III
HF	17.79 %	57.16 %	I	AlH	< 0.01 %	< 0.01 %	III
^{12}CH	4.68 %	10.68 %	I	^{52}CrH	< 0.01 %	0.00 %	III
^{13}CH	0.15 %	0.39 %	III	H^{12}CN	< 0.01 %	< 0.01 %	III
^{14}NH	1.57 %	1.23 %	II	H^{13}CN	< 0.01 %	< 0.01 %	III
$^{12}\text{C}^{12}\text{C}$	32.97 %	30.73 %	I	^{90}ZrO	0.02 %	< 0.01 %	III
$^{12}\text{C}^{13}\text{C}$	14.12 %	12.26 %	I	^{91}ZrO	< 0.01 %	< 0.01 %	III
$^{13}\text{C}^{13}\text{C}$	0.38 %	0.25 %	III	^{92}ZrO	< 0.01 %	< 0.01 %	III
C_2H_2	0.00 %	0.00 %	III	^{93}ZrO	0.00 %	0.00 %	III
HCl	0.64 %	0.50 %	III	^{94}ZrO	< 0.01 %	< 0.01 %	III
H_2O	1.75 %	6.80 %	II	^{96}ZrO	< 0.01 %	< 0.01 %	III
^{20}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	λ (Å)	λ_{\min} (Å)	λ_{\max} (Å)	v_{macro} (km s^{-1})	$\log \epsilon$	χ^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) check 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 ± 0.01	8.44	7.38	40	^{16}OH
8.60	7.79 ± 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 ± 0.02	7.82	7.38	20	^{16}OH
8.30	7.89 ± 0.02	7.38	20	$^{12}\text{C}^{16}\text{O}$
8.33 ± 0.02	7.89	7.38	20	^{16}OH
8.33	7.86 ± 0.03	7.38	20	$^{12}\text{C}^{16}\text{O}$
8.33	7.86	7.84 ± 0.02	20	$^{12}\text{C}^{14}\text{N}$
8.33	7.86	7.84	12	$^{13}\text{C}^{14}\text{N}$
8.31 ± 0.01	7.86	7.84	12	^{16}OH
8.31	7.88 ± 0.03	7.84	12	$^{12}\text{C}^{16}\text{O}$
8.31	7.88	7.84 ± 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

	λ	$\log gf$	λ_{min}	λ_{max}	χ^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						

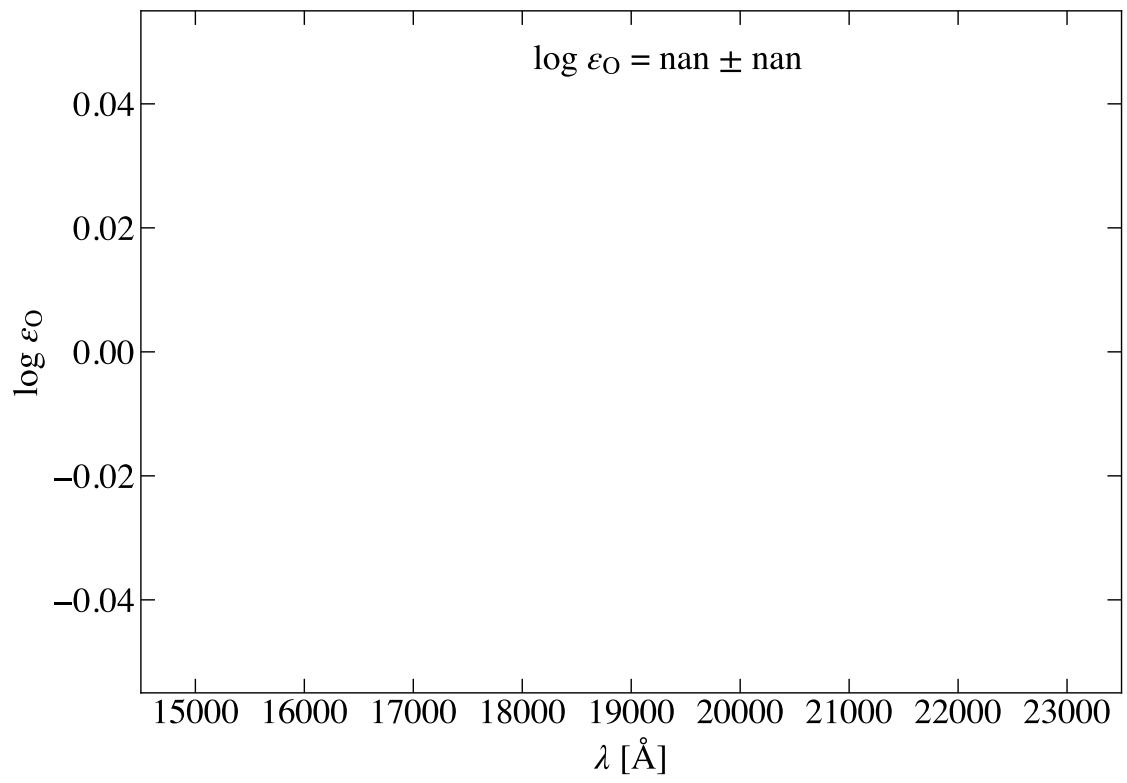
Notes.

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.

Table 3. Première minimisation de χ^2 pour les raies de l'OH.

λ [Å]	λ_{\min} [Å]	λ_{\max} [Å]	$\log \varepsilon_{\text{O}}$	σ_{O}	χ^2_{red}	R^2	p
14661.144	14660.659	14661.589	8.610	0.004	4.561	0.998	0.000
15002.153	15001.683	15002.613	8.620	0.005	0.783	0.999	0.669
15003.120	15002.690	15003.620	8.614	0.005	0.824	0.998	0.626
15130.921	15130.332	15131.494	8.623	0.004	0.184	0.999	1.000
15266.168	15265.565	15266.727	8.618	0.005	0.532	0.999	0.925
15391.205	15390.496	15391.890	8.600	0.004	0.175	0.999	1.000
15409.170	15408.543	15409.705	8.608	0.004	0.706	0.996	0.781
15428.401	15427.983	15428.990	8.611	0.006	0.208	1.000	0.999
15429.688	15429.068	15430.075	8.600	0.010	0.299	0.998	0.992
15505.746	15505.514	15506.598	8.592	0.004	0.148	1.000	1.000
15568.782	15568.173	15569.412	8.600	0.005	1.162	0.994	0.290
15651.897	15651.357	15652.364	8.595	0.005	1.087	0.999	0.365
15719.695	15719.128	15720.290	8.598	0.005	0.389	0.997	0.982
15755.520	15754.911	15755.996	8.578	0.006	1.229	1.000	0.246
15756.530	15756.073	15757.080	8.586	0.006	0.809	1.000	0.651
16052.766	16052.175	16053.259	8.584	0.005	1.674	0.999	0.053
16247.884	16247.511	16248.750	8.567	0.005	1.943	1.000	0.013
16312.920	16311.874	16313.346	8.577	0.005	0.322	1.000	0.998
16347.493	16347.192	16348.044	8.594	0.008	2.238	1.000	0.010
16368.136	16367.562	16368.724	8.590	0.005	1.262	0.999	0.217
16662.200	16661.805	16662.812	8.601	0.005	0.602	0.999	0.855
16729.784	16729.499	16730.274	8.564	0.008	1.298	1.000	0.225
16904.278	16903.690	16904.775	8.598	0.005	0.946	0.999	0.507
17423.859	17423.398	17424.405	8.576	0.007	1.216	1.000	0.260



A Table

Fe I	λ_{\min}	λ_{\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	λ_{\min}	λ_{\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}OH	$\log gf$	λ_{\min}	λ_{\max}	$\log \varepsilon_{O_1}$	χ_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

$^{12}\text{C}^{16}\text{O}$	λ_{\min}	λ_{\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

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