

# Astrophysique de laboratoire et analyse de spectres stellaires

Lydia Tchang-Brillet, Christian Balança (PI), Christophe Blaess,  
Norbert Champion, Fabrice Dayou, Nicole Feautrier et Sylvie Sahal-  
Bréchet

Ali Meftah\* et Jean-François Wyart\*\* (ass.)

LERMA, Observatoire de Paris-Meudon, PSL Research University,  
Sorbonne Université, UPMC Univ. Paris 6, CNRS, UMR 8112, F-92195  
Meudon, France

\* Laboratoire de Physique et Chimie Quantique, Université Mouloud Mammeri, BP 17 RP, 15000  
Tizi-Ouzou, Algeria

\*\* Laboratoire Aimé Cotton, UMR9188, CNRS, Université Paris-Sud, ENS Cachan, Université  
Paris-Saclay, rue Aimé Cotton, F-91405 Orsay Cedex, France

# Motivations générales

Avancées rapides des observations →

Nécessité d'une grande quantité de données atomiques et moléculaires **de qualité** pour caractériser les conditions physiques **hors-ETL** et **l'évolution chimique** des étoiles

Nous proposons :

nos compétences en **physique atomique et moléculaire** →

Etudes théoriques et expérimentales en laboratoire

+ étroite **collaboration avec des astrophysiciens**

# Thématiques soutenues par le PNPS

(aussi par Plas@Par, CS de l'Observatoire de Paris, VAMDC, Gaia)

## Modélisation des atmosphères d'étoiles froides - collisions

- Collisions atomiques et exploitation de GAIA
- Excitation rotationnelles de petites molécules
- Photodissociation de molécules diatomiques

Christian Balança, Fabrice Dayou, Nicole Feautrier et collaborateurs

## Spectre d'émission à haute résolution d'ions atomiques lourds dans l'UV lointain

Données de laboratoire → HST, FUSE, SOHO → Futures missions : WSO, LUVOIR

Lydia Tchang-Brillet, Ali Meftah, Jean-François Wyart, Norbert Champion, Christophe Blaess et collaborateurs

## Calcul de paramètres d'élargissement Stark

Sylvie Sahal-Bréchet et collaborateurs

## Mise en ligne des données

Base Stark-b.obspm.fr

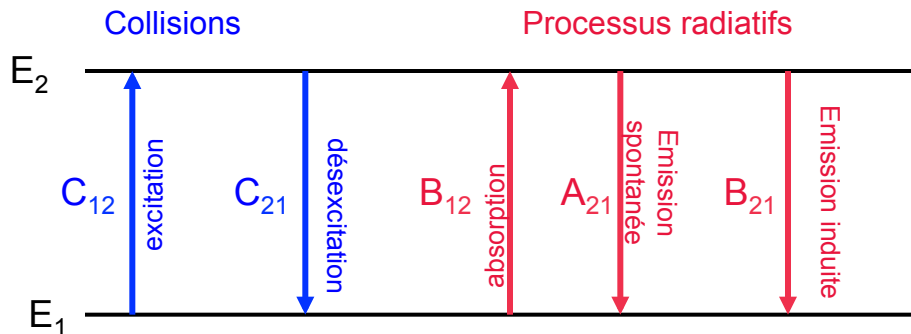
Portail MOLAT.obspm.fr



Programme National de Physique Stellaire

# Collisions : modélisation de spectres hors-ETL

- populations des niveaux ← cinétique des processus radiatifs et collisionnels

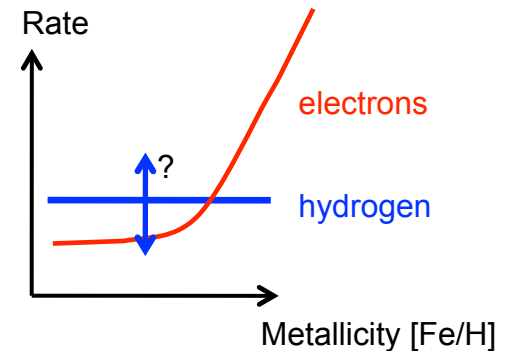


$$C_{21} = n_P k_{21}(T) \quad k_{21}(T) = \langle v\sigma \rangle_v$$

$s^{-1}$  (pointing to  $C_{21}$ )       $cm^3s^{-1}$  (pointing to  $k_{21}(T)$ )

$n_p$ : densité des perturbateurs

$k_{21}(T)$  : taux de coll.  $\propto$  section efficace  $\sigma$



→ Collisions atomes - H  $\gg$  atomes - e dans atmosphères à faible métallicité

$$N_H/N_e \sim 10^4 - 10^7$$

→ Collisions de molécules avec  $H_2$ : environnements circumstellaires

# Calcul des taux : excitation électronique d'atomes par H ou excitation ro-vibrationnelle de molécules par H<sub>2</sub>

Deux étapes :

- **Calculs de chimie quantique** → potentiels d'interaction et opérateurs de couplage en fonction de la configuration nucléaire (distances internucléaires, angles etc)  
Coll. M. Guitou, A. Mitrushchenkov (Paris-Est)
- **Etude de la dynamique** : méthodes quantiques à faibles énergies et recherche de méthodes approchées pour hautes énergies  
Coll. A. Belyaev (St Petersburg)

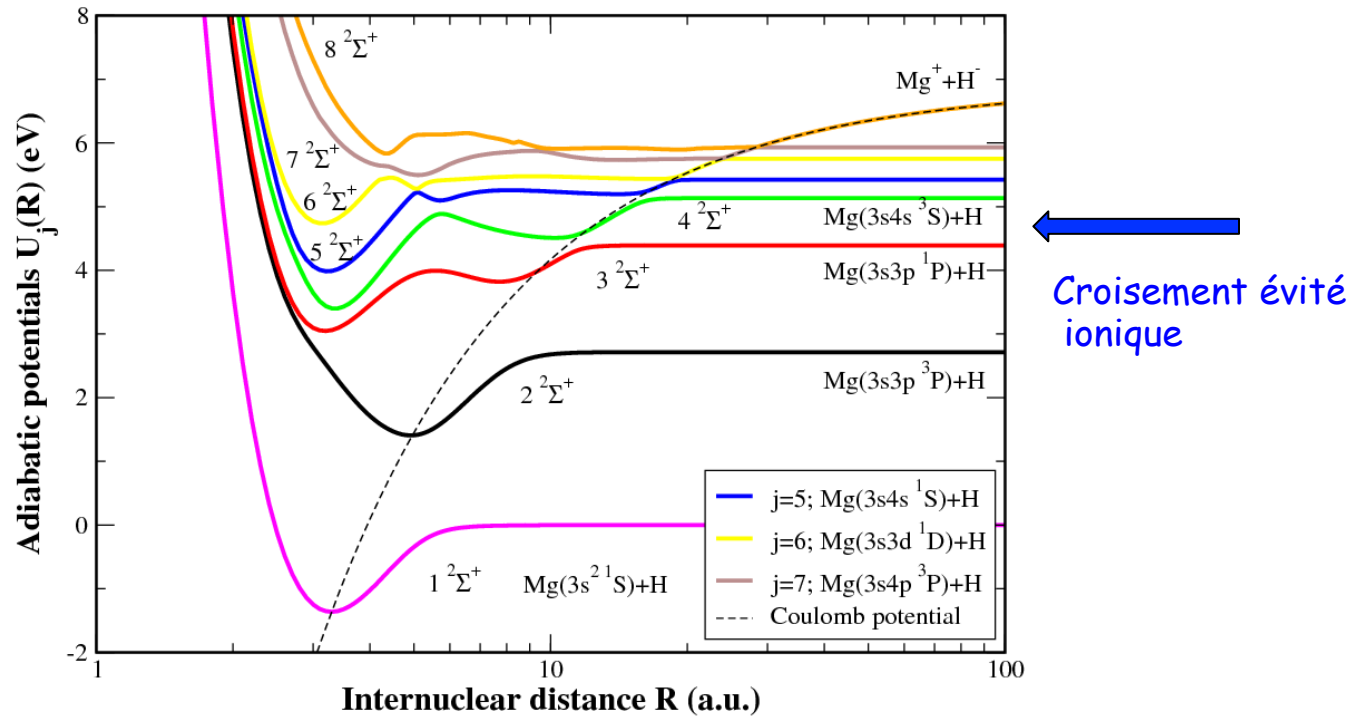
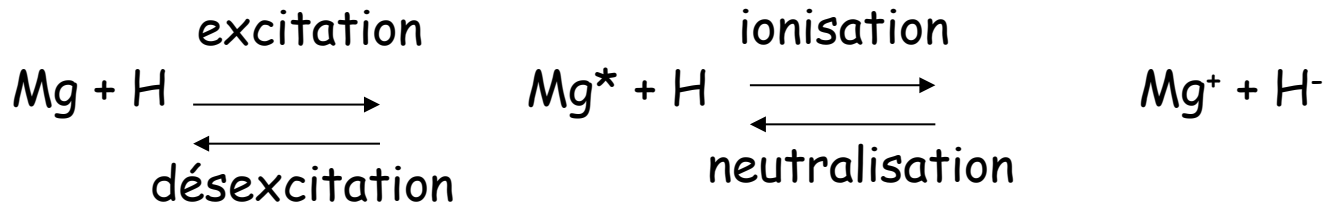
**Cas récemment étudiés**

Excitation électronique par H : Li+H, Na+H, Mg+H

Excitation ro-vibrationnelle par H<sub>2</sub> : SO<sub>2</sub>, SiO, C<sub>2</sub>H

**En cours et projets** : Ca + H, O+H, Fe + H  
N<sub>2</sub>H<sup>+</sup> + H<sub>2</sub>, C<sub>4</sub>H<sup>-</sup> + H<sub>2</sub>

# Exemple de Mg+H



# Impact des données

coll. F. Thévenin and T. Merle, Guitou et al. Chem. Phys. 2015

- Equilibre statistique + transfert radiatif (MARCS model, code MULTI)
- Inclusion de processus radiatifs + collisions (e, H avec ou sans EC)

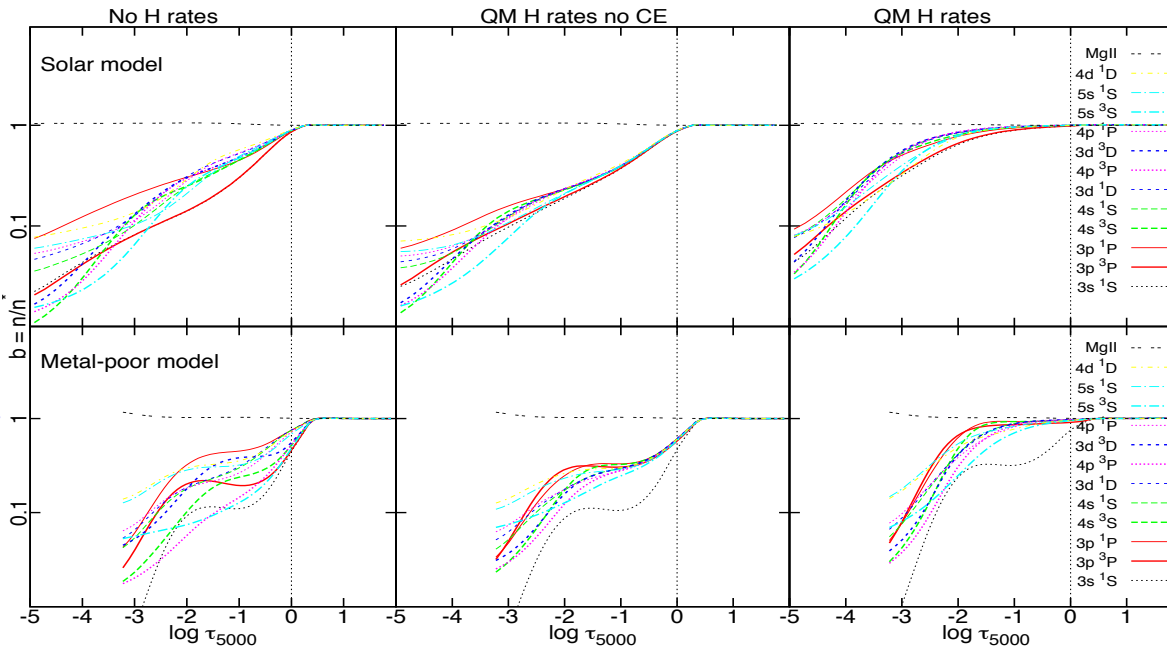
e seuls

avec H, sans EC

avec H et EC

Ex:  
2 atmosphères

Coeff.  $b_i = n_i/n_i^*$   
d'écart de  
populations à ETL  
vs  $\log \tau$   
profondeur optique



Soleil

HD122563  
(metal poor)

## Conclusions

- Collisions avec H : excitation/désexcitation  $10^{-9} - 10^{-10} \text{ cm}^3/\text{s}$  ; réduisent l'écart à l'ETL pour les atmosphères pauvres en métaux
- Importance du processus d'échange de charges (EC) :  $10^{-8} - 10^{-9} \text{ cm}^3/\text{s}$
- Formule de Drawin non fiable (absence de base physique et imprécision d'un facteur  $\rightarrow 10^5$ )

Spectres d'émission VUV  
d'ions lourds  
moyennement chargés:

métaux de transition,  
Lanthanides, actinides

Spectres complexes

$d^N, d^{N-1}nl, f^N, f^{N-1}nl$

**PERIODIC TABLE**  
**Atomic Properties of the Elements**

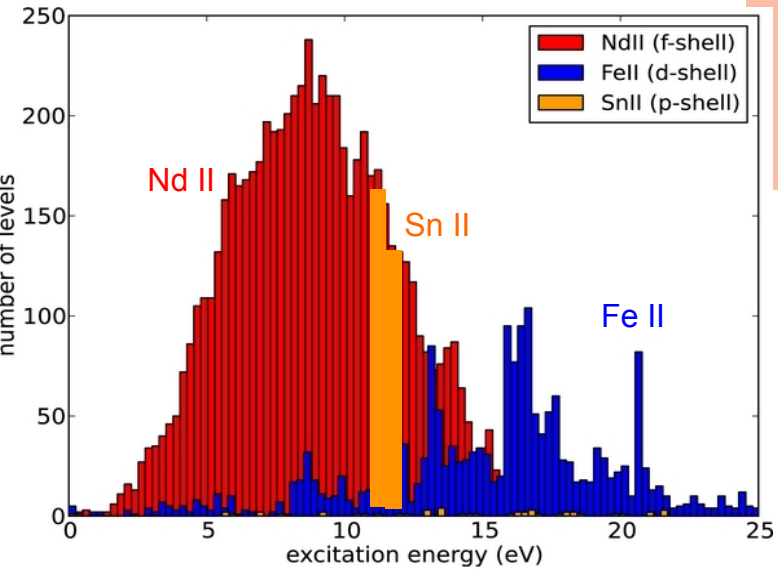
NIST  
National Institute of Standards and Technology  
U.S. Department of Commerce

Frequently used fundamental physical constants

For the most accurate values of these and other constants, visit [physics.nist.gov/constants](http://physics.nist.gov/constants)  
1 second = 9 192 631 770 periods of radiation corresponding to the transition between the two hyperfine levels of the ground state of  $^{133}\text{Cs}$   
speed of light in vacuum  $c$  299 792 458 m s $^{-1}$  (exact)  
Planck constant  $h$  6.626 07 x 10 $^{-34}$  J s ( $h = h/2\pi$ )  
elementary charge  $e$  1.602 177 x 10 $^{-19}$  C  
electron mass  $m_e$  9.109 38 x 10 $^{-31}$  kg  
 $m_e c^2$  0.510 999 MeV  
proton mass  $m_p$  1.672 622 x 10 $^{-27}$  kg  
fine-structure constant  $\alpha$  1/137.035 999  
Rydberg constant  $R_\infty$  10 973 731.566 m $^{-1}$   
 $R_\infty hc$  3.289 841 960 x 10 $^{15}$  Hz  
Boltzmann constant  $k$  1.380 65 x 10 $^{-23}$  J K $^{-1}$

Physical Measurement Laboratory [www.nist.gov/pml](http://www.nist.gov/pml) Standard Reference Data [www.nist.gov/srd](http://www.nist.gov/srd)

1 IA 1 H Hydrogen 1.008 1s 13.5984	2 IIA 3 Li Lithium 6.94 1s <sup>2</sup> 2s 5.3917	4 IIA 4 Be Beryllium 9.0121831 1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> 9.3227	5 IIIA 11 Na Sodium 22.98976928 (Ne)3s <sup>1</sup> 5.1391	6 IIIB 12 Mg Magnesium 24.304 (Ne)3s <sup>2</sup> 7.6482	7 IIIB 19 K Potassium 39.0983 (Ar)4s 4.3407	8 IVB 20 Ca Calcium 40.078 (Ar)4s 6.1132	9 VB 21 Sc Scandium 44.955908 (Ar)3d <sup>1</sup> 4s 6.5615	10 VIB 22 Ti Titanium 47.887 (Ar)3d <sup>2</sup> 4s 6.8281	11 VIIA 23 V Vanadium 50.9415 (Ar)3d <sup>3</sup> 4s 6.7462	12 VIIA 24 Cr Chromium 51.9961 (Ar)3d <sup>5</sup> 4s 6.7085	13 VIIA 25 Mn Manganese 54.938044 (Ar)3d <sup>5</sup> 4s 7.4340	14 VIIA 26 Fe Iron 55.845 (Ar)3d <sup>6</sup> 4s 7.9025	15 VIIA 27 Co Cobalt 58.933194 (Ar)3d <sup>7</sup> 4s 7.8810	16 VIIA 28 Ni Nickel 58.6934 (Ar)3d <sup>8</sup> 4s 7.5399	17 VIIA 29 Cu Copper 63.546 (Ar)3d <sup>10</sup> 4s 7.7264	18 VIIA 30 Zn Zinc 65.38 (Ar)3d <sup>10</sup> 4s 9.3942	19 VIIA 31 Ga Gallium 69.723 (Ar)3d <sup>10</sup> 4s 5.9993	20 VIIA 32 Ge Germanium 72.630 (Ar)3d <sup>10</sup> 4s 7.8994	21 VIIA 33 As Arsenic 74.921595 (Ar)3d <sup>10</sup> 4s 7.8886	22 VIIA 34 Se Selenium 78.9718 (Ar)3d <sup>10</sup> 4s 9.0097	23 VIIA 35 Br Bromine 79.904 (Ar)3d <sup>10</sup> 4s 11.8138	24 VIIA 36 Kr Krypton 83.798 (Ar)3d <sup>10</sup> 4s 13.9906												
3 37 Rb Rubidium 85.4678 (Kr)5s 4.1771	4 38 Sr Strontium 87.62 (Kr)5s 6.6949	5 39 Y Yttrium 88.90584 (Kr)4d <sup>1</sup> 5s 6.2173	6 40 Zr Zirconium 91.224 (Kr)4d <sup>2</sup> 5s 6.6339	7 41 Nb Niobium 92.90637 (Kr)4d <sup>4</sup> 5s 6.4669	8 42 Mo Molybdenum 95.94 (Kr)4d <sup>5</sup> 5s 7.1194	9 43 Tc Technetium (98)	10 44 Ru Ruthenium 101.07 (Kr)4d <sup>7</sup> 5s 7.3609	11 45 Rh Rhodium 102.90550 (Kr)4d <sup>8</sup> 5s 7.4669	12 46 Pd Palladium 106.42 (Kr)4d <sup>10</sup>	13 47 Ag Silver 107.8682 (Kr)4d <sup>10</sup> 5s 5.782	14 48 Cd Cadmium 112.414 (Kr)4d <sup>10</sup> 5s 8.3369	15 49 In Indium 114.818 (Kr)4d <sup>10</sup> 5s 7.6864	16 50 Sn Tin 118.710 (Kr)4d <sup>10</sup> 5s 7.3439	17 51 Sb Antimony 121.757 (Kr)4d <sup>10</sup> 5s 6.8084	18 52 Te Tellurium 127.60 (Kr)4d <sup>10</sup> 5s 9.0097	19 53 I Iodine 126.90447 (Kr)4d <sup>10</sup> 5s 10.4513	20 54 Xe Xenon 131.29 (Kr)4d <sup>10</sup> 5s 12.1298	21 55 Cs Cesium 132.90545193 (Xe)6s 3.8939	22 56 Ba Barium 137.327 (Xe)6s 5.2117	23 57 La Lanthanum 138.9048 (Xe)4f <sup>1</sup> 5d <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup> 6.8251	24 58 Ce Cerium 140.116 (Xe)4f <sup>1</sup> 5d <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup> 6.8251	25 59 Pr Praseodymium 140.907 (Xe)4f <sup>2</sup> 6s <sup>2</sup> 6.479	26 60 Nd Neodymium 144.242 (Xe)4f <sup>3</sup> 6s <sup>2</sup> 6.4220	27 61 Pm Promethium (145)	28 62 Sm Samarium 150.36 (Xe)4f <sup>6</sup> 6s <sup>2</sup> 6.6437	29 63 Eu Europium 151.964 (Xe)4f <sup>7</sup> 6s <sup>2</sup> 5.6704	30 64 Gd Gadolinium 157.25 (Xe)4f <sup>7</sup> 6s <sup>2</sup> 6.1498	31 65 Tb Terbium 158.92535 (Xe)4f <sup>9</sup> 6s <sup>2</sup> 6.8638	32 66 Dy Dysprosium 162.500 (Xe)4f <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup> 6.9391	33 67 Ho Holmium 164.93033 (Xe)4f <sup>11</sup> 6s <sup>2</sup> 6.9416	34 68 Er Erbium 167.259 (Xe)4f <sup>12</sup> 6s <sup>2</sup> 6.7077	35 69 Tm Thulium 168.93422 (Xe)4f <sup>13</sup> 6s <sup>2</sup> 6.1843	36 70 Yb Ytterbium 173.054 (Xe)4f <sup>14</sup> 6s <sup>2</sup> 6.2542	37 71 Lu Lutetium 174.967 (Xe)4f <sup>14</sup> 6s <sup>2</sup> 6.4259
7 87 Fr Francium (223)	88 Ra Radium (226)	89 Ac Actinium (227)	90 Th Thorium 232.037 (Rn)6d <sup>2</sup> 7s <sup>2</sup> 5.89	91 Pa Protactinium 231.03688 (Rn)5f <sup>2</sup> 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup> 5.89	92 U Uranium 238.02891 (Rn)5f <sup>3</sup> 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup> 6.1941	93 Np Neptunium 237.04817 (Rn)5f <sup>4</sup> 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup> 6.2655	94 Pu Plutonium 244 (Rn)5f <sup>6</sup> 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup> 6.0238	95 Am Americium 243 (Rn)5f <sup>7</sup> 7s <sup>2</sup> 5.9738	96 Cm Curium 247 (Rn)5f <sup>8</sup> 7s <sup>2</sup> 5.9914	97 Bk Berkelium 247 (Rn)5f <sup>9</sup> 7s <sup>2</sup> 6.1978	98 Cf Californium 251 (Rn)5f <sup>10</sup> 7s <sup>2</sup> 6.2917	99 Es Einsteinium 252 (Rn)5f <sup>11</sup> 7s <sup>2</sup> 6.3676	100 Fm Fermium 257 (Rn)5f <sup>12</sup> 7s <sup>2</sup> 6.50	101 Md Mendelevium 258 (Rn)5f <sup>13</sup> 7s <sup>2</sup> 6.58	102 No Nobelium 259 (Rn)5f <sup>14</sup> 7s <sup>2</sup> 6.65	103 Lr Lawrencium 262 (Rn)5f <sup>14</sup> 7p <sup>1</sup> 4.90																		



\*Based upon  $^{12}\text{C}$ . ( ) indicates the mass number of the longest-lived isotope. \*IUPAC conventional atomic weights; standard atomic weights for these elements are expressed in intervals; see [iupac.org](http://iupac.org) for an explanation and values. For a description of the data, visit [physics.nist.gov/data](http://physics.nist.gov/data) NIST SP 966 (September 2014)

Pour  $E_{\text{excitation}} < 25 \text{ eV}$

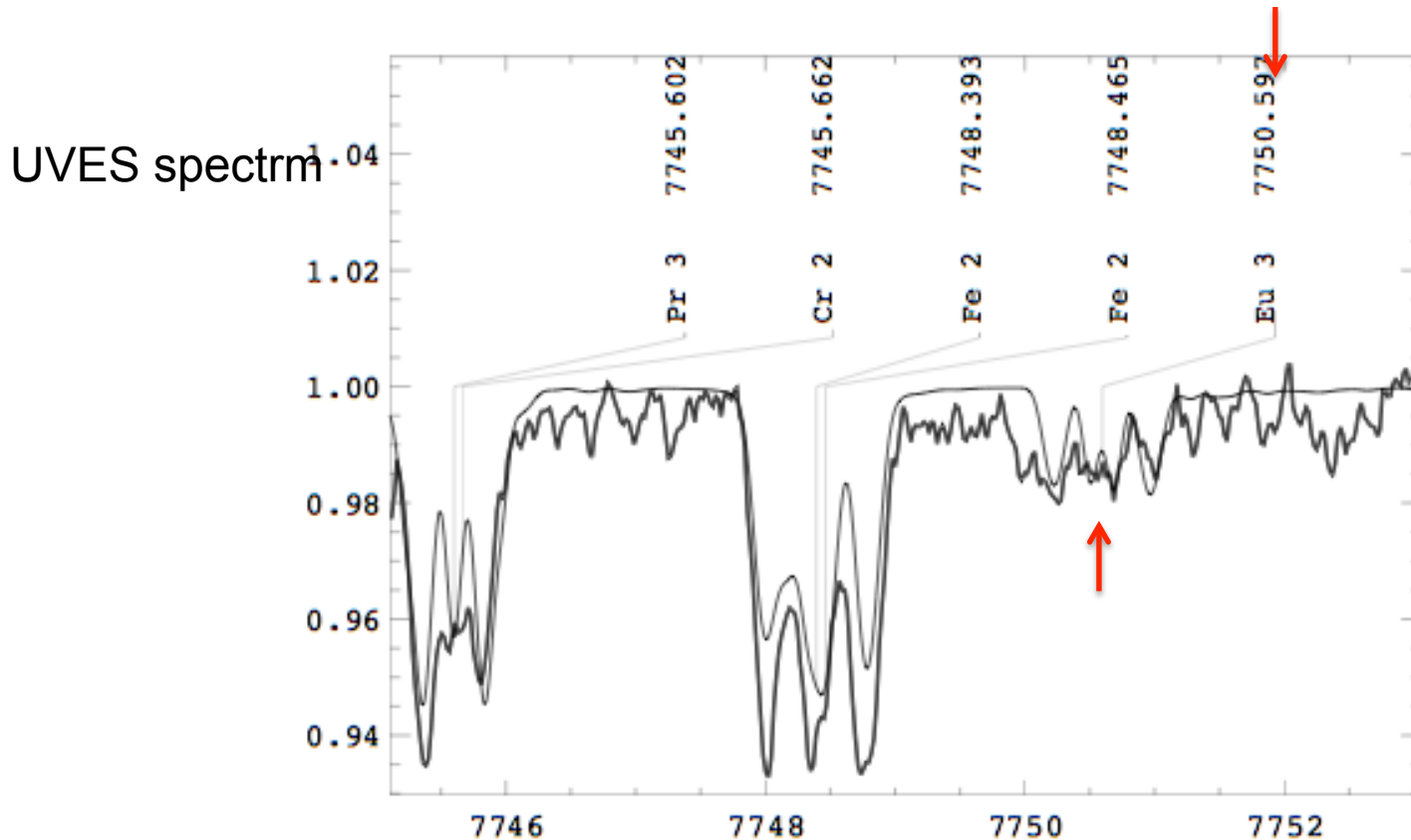
Nb de niveaux Nb de raies

Nd II (f):	6888	3 873 372
Fe II (d):	1857	355 367
Sn II (p):	47	371



Abondances des étoiles chimiquement particulières  
Eu III lines in Ap star HD 144897

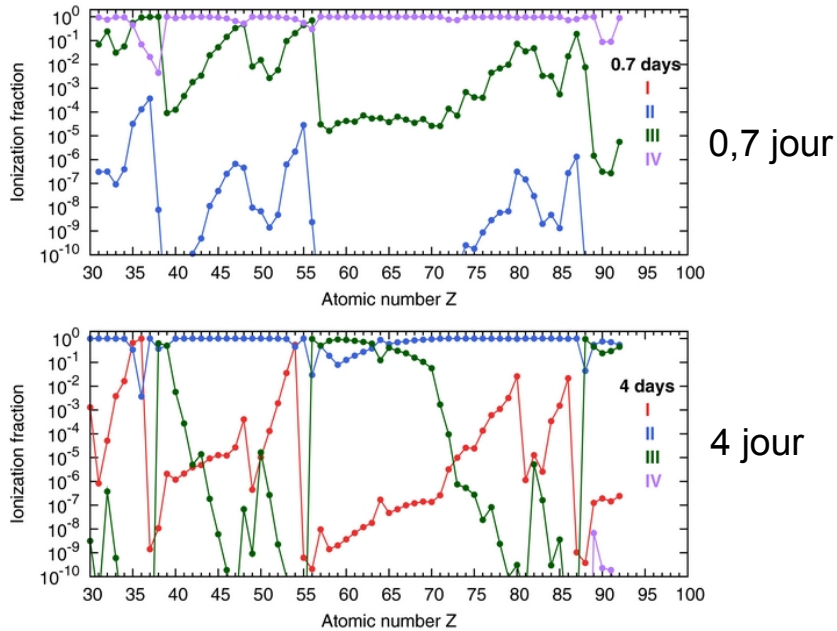
Magnetic field  $B=8.8$  kG



Comparaison s'un spectre observé dans la région de la raie Eu III  $\lambda 7750.59$  Å line (trait double) et d'un spectre synthétique avec les paramètres atomiques dérivés du travail présent (trait plein).

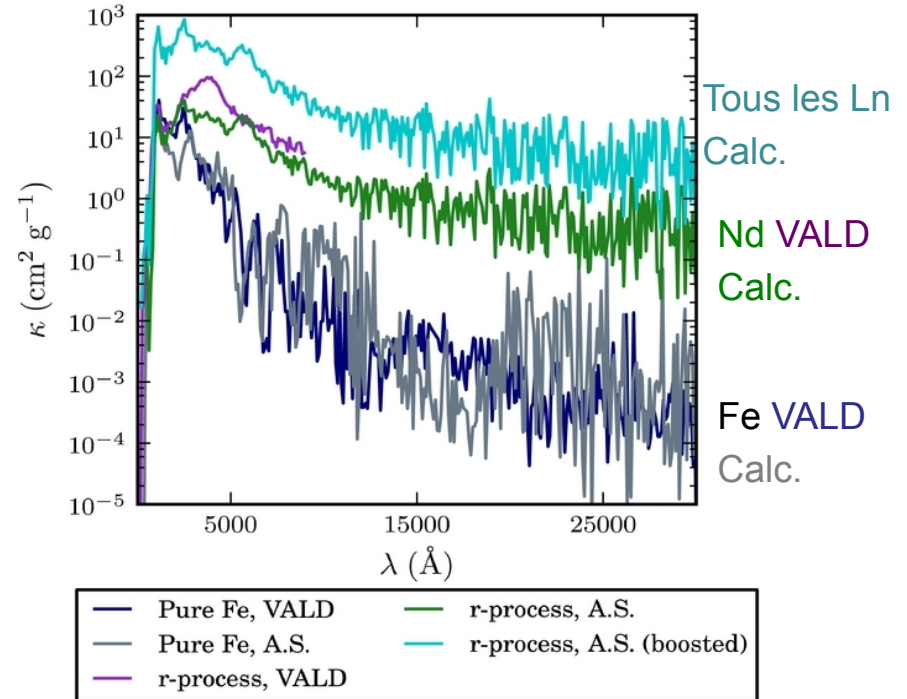
# Coalescence de deux étoiles à neutrons : lanthanides ionisés formés par processus r dans la matière éjectée

Degrés d'ionisation de Nd  
après la coalescence : I - IV



(Tanaka & Hotokezaka 2013 ApJ)

Opacités  
à 1 jour, T=5000K



(Barnes & Kasen 2013 ApJ)

Simulation de transfert radiatif : données sur  
les spectres IV absentes pour  $Z > 31$  dans  
les bases de données existantes

Opacité de Nd 10-100 fois plus grandes que Fe

# Spectrographe UV sous vide à incidence normale de 10m de l'Observatoire Paris - Meudon



- $\lambda$  : 200-3000 Å
- Réseau concave holographique 3600 traits/mm
- dispersion = 0.25 Å /mm dans le plan focal
- Résolution ~ 150 000 (8mÅ, fente 30µm)
- Plaques photographiques  $\Rightarrow \Delta\lambda = \pm 0.001-0.005$  Å
- Image plates  $\Rightarrow$  réponse linéaire en intensités 1-10<sup>5</sup>

## Spectre d'étincelles de l'erbium Er

Plaques photo

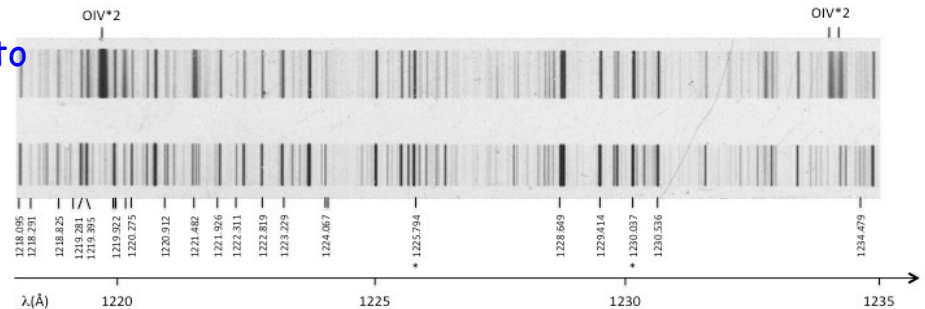
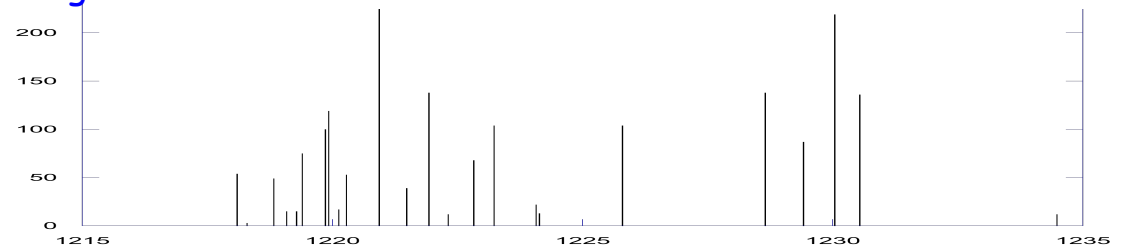


Image Plate



### Sources utilisées:

Étincelles sous vide haute tension pour ions atomiques

Décharge Penning pour spectres moléculaires

1215Å ← 20Å → 1235Å

PNPS, 26/28-3-2018, Montpellier

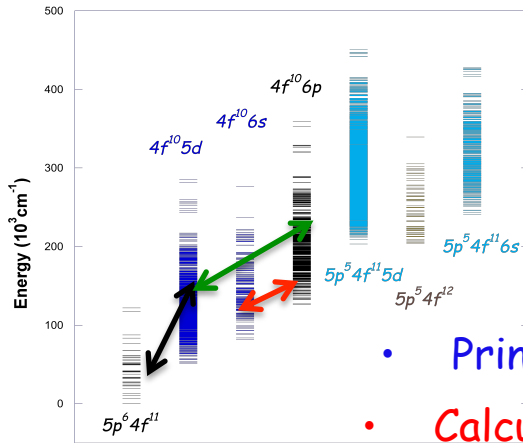
# Démarche générale

Spectres d'émission en laboratoire  
(structures fines)

+

Analysis basée sur :

- Principe de combinaison de Ritz  $\sigma = 1/\lambda = E_{\text{sup}} - E_{\text{inf}}$
- Calculs paramétriques (Cowan codes) des E et des f. o.



$$H_{1ij} = \sum_{\alpha} c_{ij}^{\alpha} P_{\alpha} \quad \text{ajustement des } P_{\alpha} \text{ minimisant} \quad \Delta E = \sqrt{\sum_I (E_i^{\text{exp}} - E_i^{\text{cal.}})^2 / (N_I - N_p)}$$

- Régularités isoélectroniques ou isoioniques  $\Rightarrow P_{\alpha}$  initiaux

↓

Energies expérimentales et fonctions d'onde en couplage intermédiaire

+

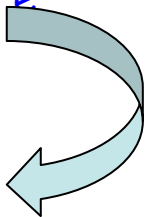
Liste de raies avec  $\lambda$ , intensités relatives et identifications

+

Valeurs semi-empiriques de  $gA$ , durées de vie, rapports de branchement,  
facteurs de Landé, fonctions de partition

$\Rightarrow$  Interprétation de formation des raies hors-ETL

Modèle Collisionnel-radiatif des plasmas  
PNPS, 26/28-3-2018, Montpellier



Fonctions de partition de **U II**  
pour une température typique d'étoile pauvre en métaux

$$T = 4825 \text{ K} \Leftrightarrow k_B T = 3353.541 \text{ cm}^{-1}$$

$$Q(T) = \sum_i (2J_i + 1) \exp\left(-\frac{E_i}{k_B T}\right)$$

$k_B$ : Boltzmann Constant

Incluant toutes les  $E_i < 50\,000 \text{ cm}^{-1}$  (niveaux pairs et impairs)

Energies calculées après ajustement paramétrique :

$$Q = 107.84 + 13.15 = 120.99$$

Substitution par énergies expérimentales disponibles :

$$Q = 109.67 + 13.32 = 122.99 \quad \Delta \sim 2\%$$

Calculs Hartree-Fock ab initio :  $Q = 87.13 + 2.06 = 89.19 \quad \Delta \sim 28\%$

# Données disponibles sur [MOLAT.obspm.fr](http://MOLAT.obspm.fr)

## Eu III

- 90 new lines, 30 new levels  
(1150 Ritz wavelengths)

## Tm IV

- 760 lines, 209 energy levels

## Nd IV

- 1426 lines, 232 levels

## Nd V

- 464 lines 152 levels

## Yb IV

- 1023 lines, 193 energy levels

## Yb V

- 1080 lines, 242 energy levels

## Er IV (2016)

- 591 lines, 120 energy levels

- à venir : U II , Os III

## En projet :

**Er, Eu, Dy ionisés.** Coll. équipe Meftah en développement à l'Université de Tizi-Ouzou (Algérie), 2 MCF, 3 doctorants

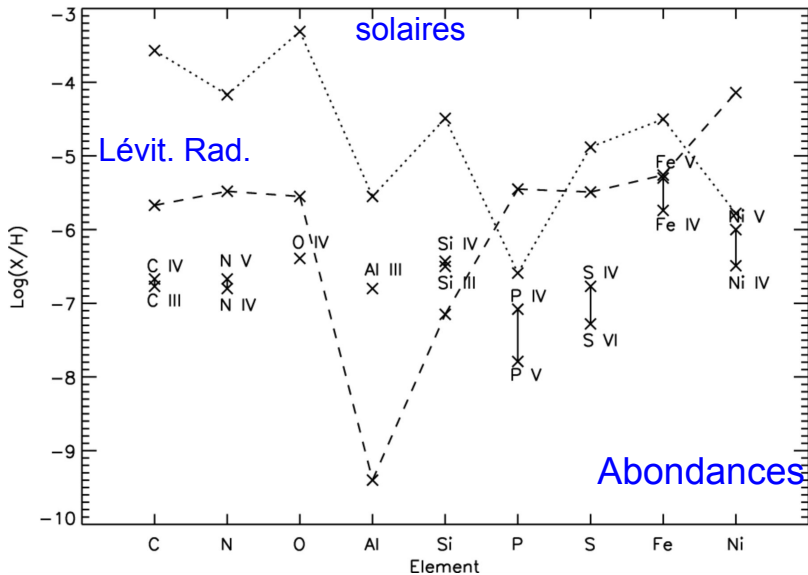
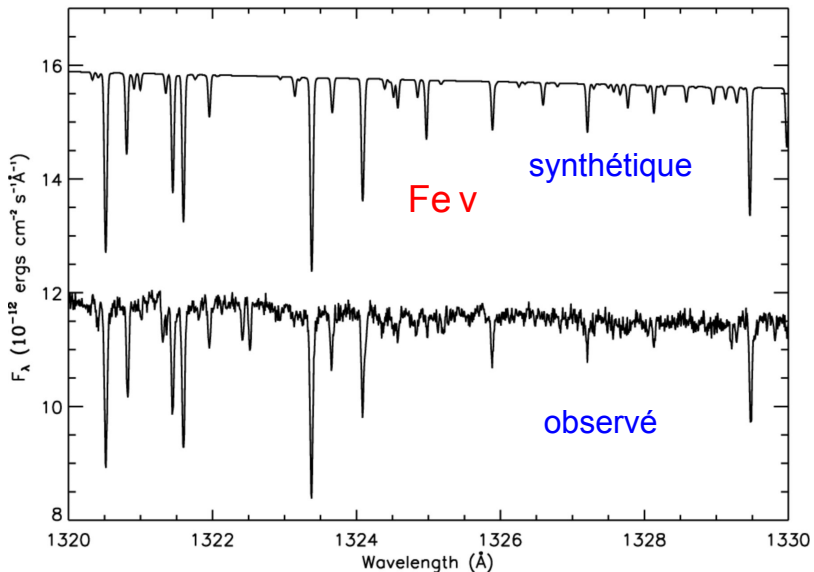
**Ions de Mn, Fe, Ni.** Coll. Ryabtsev et al, Institut de Spectroscopie, Troitsk, Moscou (Russie)

# Variation des constantes fondamentales : Cte de structure fine $\alpha$

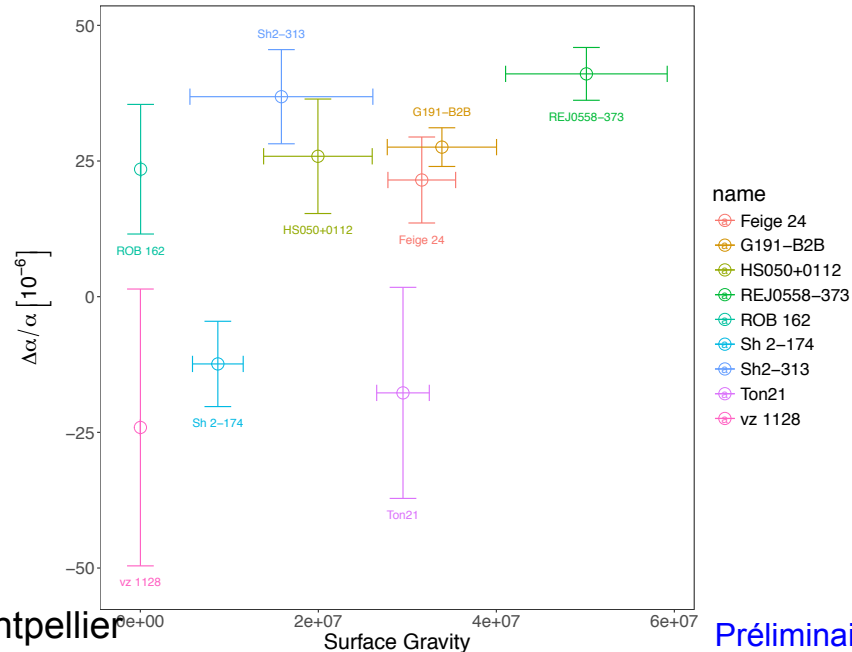
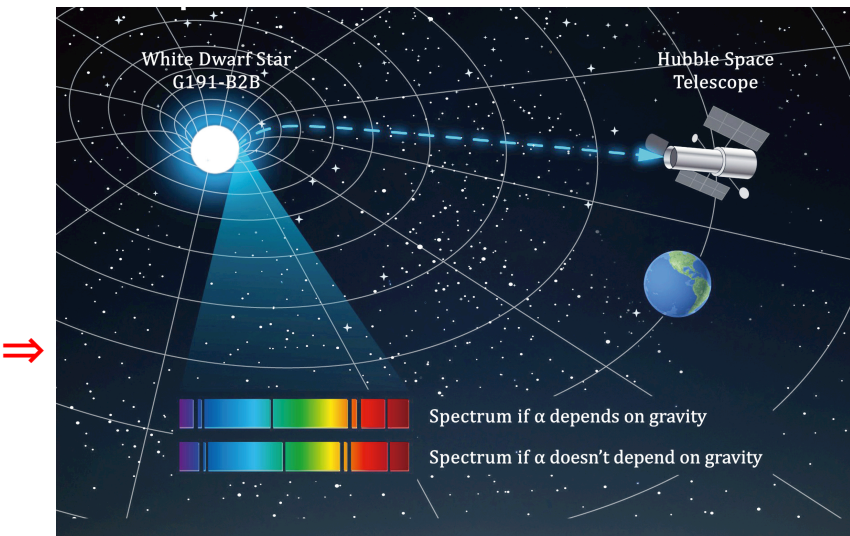
Spectres HST/STIS de naines blanches

DA white dwarf G191-B2B

Preval et al, MNRAS 2013



$$(\Delta\lambda/\lambda)_{\text{laboratoire}} \sim 10^{-6}$$



PNPS, 26/28-3-2018, Montpellier

Préliminaires

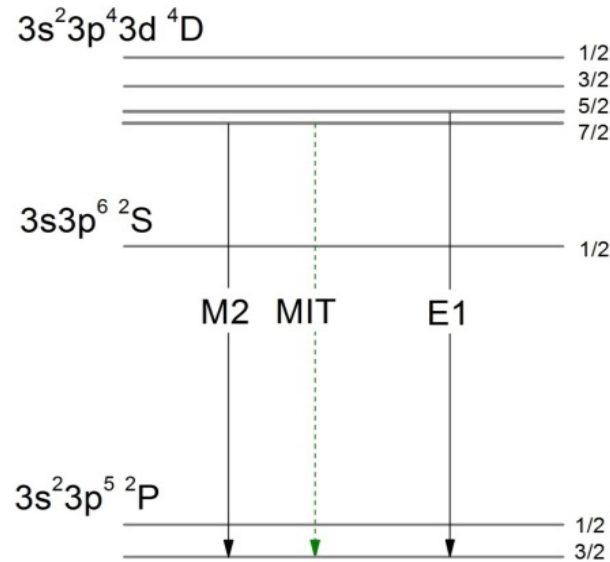
Bainbridge et al, Universe 2017

# Mesure du champ magnétique sans la polarisation ?

Fe X : magnetic field induced transition (MIT)

$$I_{\text{MIT}}/I_{\text{E1}} \propto B^2$$

Observer et modéliser un profil asymétrique de deux raies non résolues ?



◇  $\Delta E(5/2-7/2) = ?$   
( $\sim 5 \text{ cm}^{-1}$ )  
Source EBIT  
+  
Spectrographe de Meudon

Schematic energy-level diagram for Chlorine-like ions with  $Z < 26$  and zero nuclear spin, where  $^4D_{7/2}$  is the lowest level in the configuration  $3s^2 3p^4 3d$ . For ions with  $Z > 26$ , a level crossing has occurred and  $^4D_{5/2}$  is lower than  $^4D_{7/2}$ . Under the influence of an external magnetic field, an E1 transition opens up from the  $^4D_{7/2}$  to the ground state through mixing with the  $^4D_{5/2}$ .

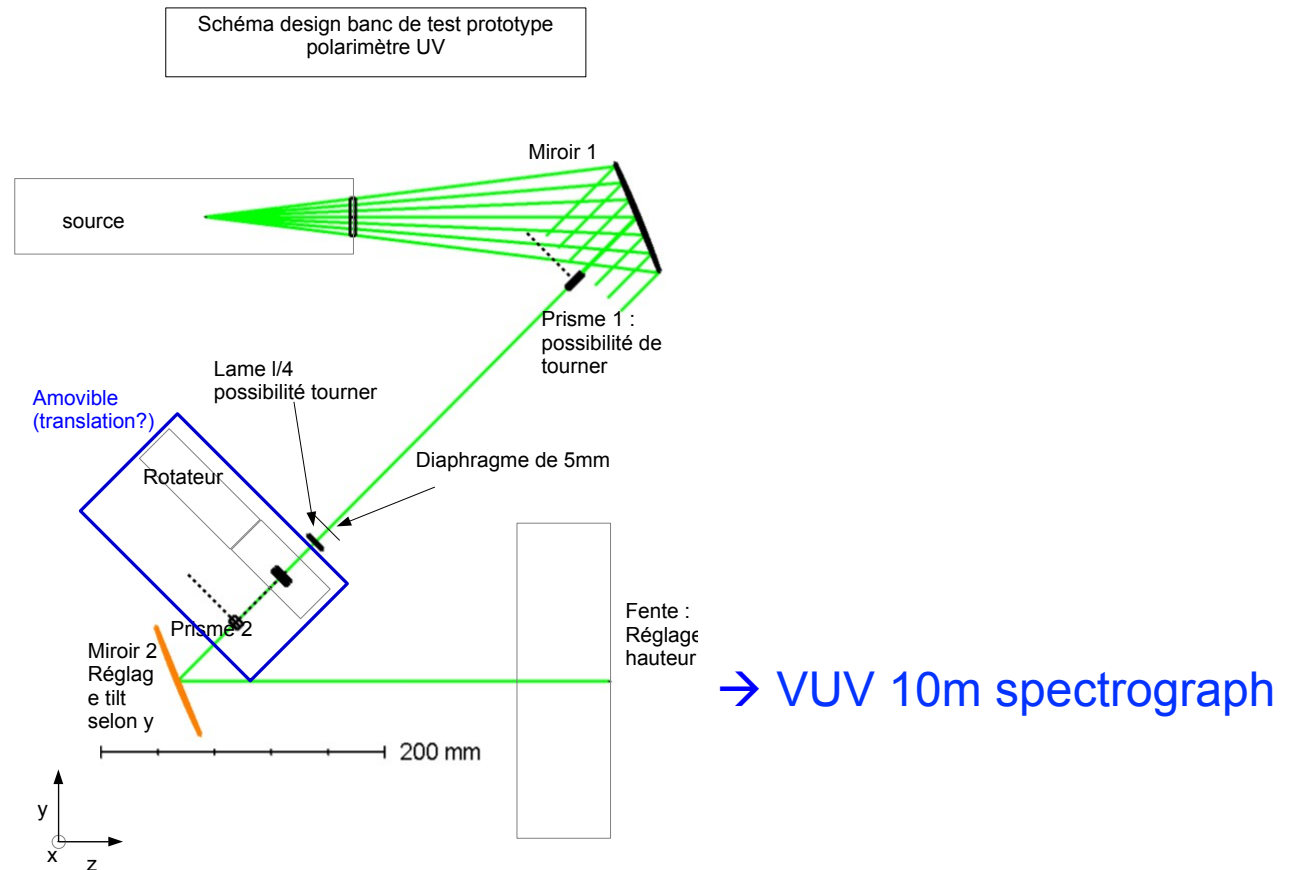
Coll. R. Hutton, Y. Yang (Shanghai), T. Brage (Lund)



# Test d'un prototype polarimètre UV

## Schema de montage

(C. Neiner LUVOIR/POLLUX)



# Largeurs et déplacements des raies des atomes neutre et ionisés dus aux collisions avec les électrons et les ions dans un plasma. Applications stellaires

Sylvie Sahal-Bréchet, en collaboration avec  
M.S.Dimitrijević, et son équipe de l'Observatoire de Belgrade,  
N. Ben Nessib, et son équipe tunisienne

- Développement de la base de données STARK-B
  - <http://stark-b.obspm.fr>
- Applications stellaires aux naines blanches et aux étoiles particulières:
  - 1 exemple: O I
  - Dufour, Ben Nessib, Sahal-Bréchet & Dimitrijević, “ Stark broadening of carbon and oxygen lines in hot DQ white dwarf stars: recent results and applications”, 2011, Baltic Astronomy, Vol. 20, p. 511-515

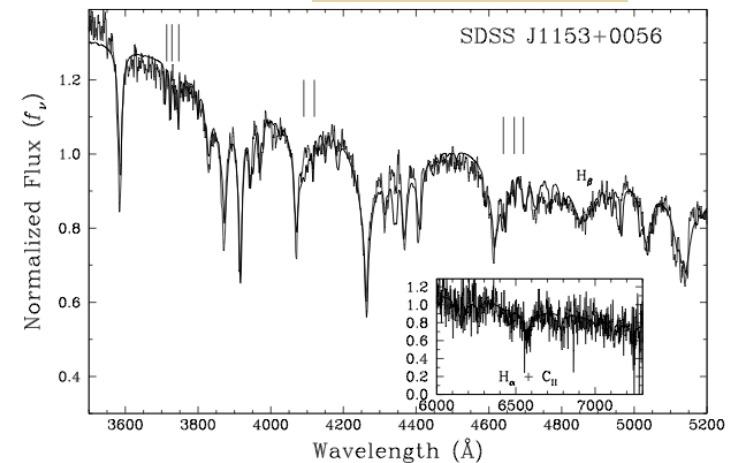
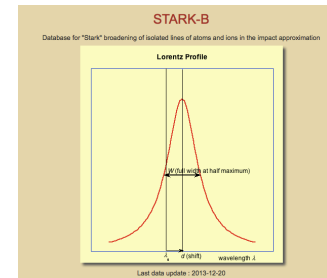


Fig. 1. Fit of a model to the carbon lines for the hot DQ SDSS J1153+0056. Oxygen lines, which are not fitted, are indicated by tick marks. The thick line is the best solution obtained by fitting the optical (MMT) data. The insert shows the H $\alpha$  region (SDSS spectroscopic observations). The C/O ratio is fixed to 1 in this preliminary analysis. This represent a significant improvement over the 'first generation' fits of Dufour et al. (2009, see their Fig. 2).

Terminés : C II, B IV, Xe VI et Xe VIII

Projets : Cr VI, Ar VII et Ar II

**Merci !**