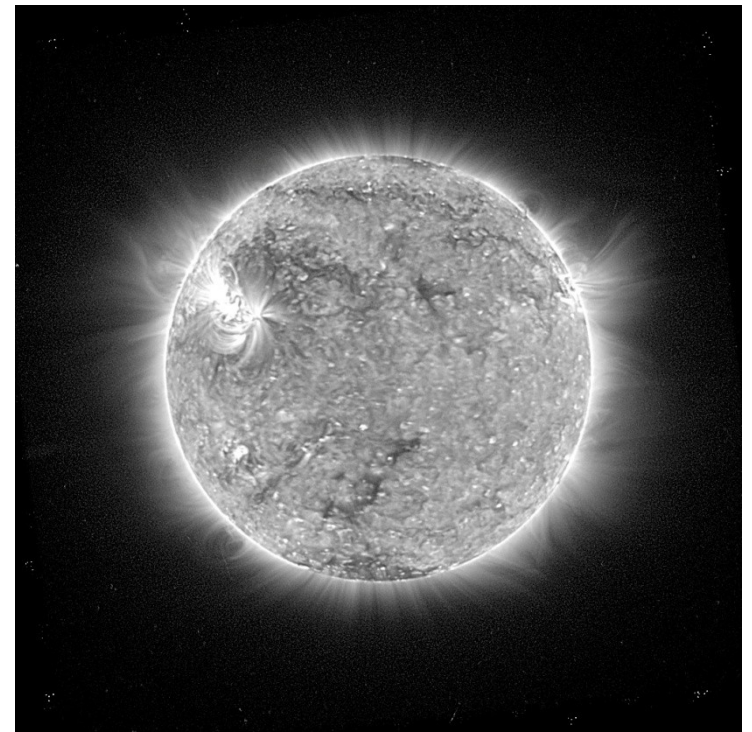


L'interface photosphère solaire/chromosphère et couronne: apport des éclipses et des images EUV

par:
Cyrille Bazin

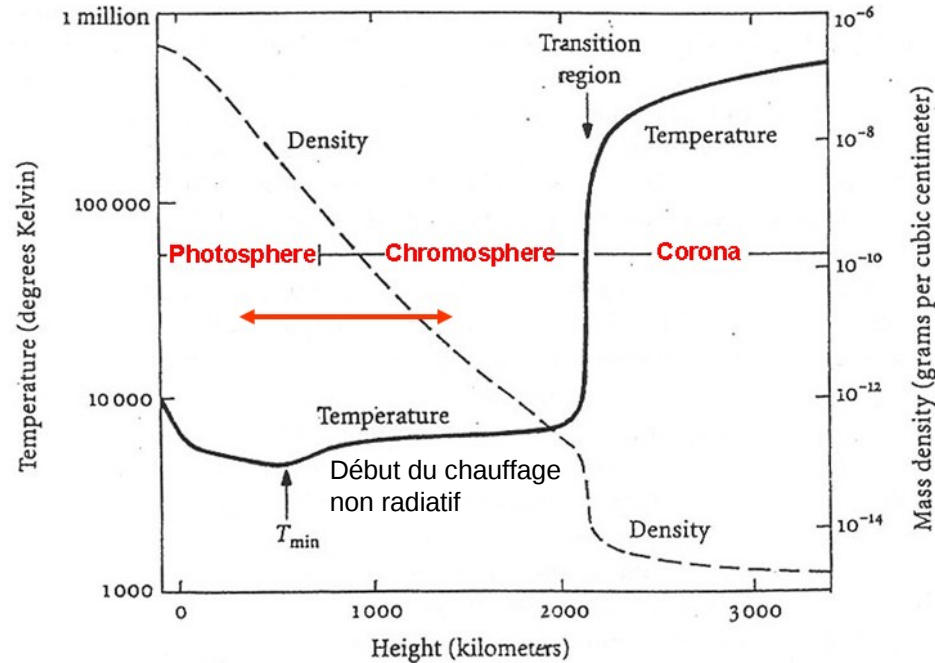


Plan de la présentation

- **Introduction**
 - *Définition du bord du Soleil: approche classique 1D*
 - *Observations historiques*
 - *Description des structures de l'interface*
- **Questions actuelles sur l'atmosphère solaire au dessus de T_{\min}^0**
 - *Structuration des couches superficielles et enveloppes: incompatibilité avec le modèle 1D VAL*
 - *Surabondance coronale en éléments « bas potentiel de ionisation » (« low FIP »)*
- **Méthodes modernes d'observation des couches extérieures et interface:**
 - *Technique du spectre éclair: éclipses de 2008, 2009, 2010 et 2012*
 - *L'imagerie spatiale EUV à l'aide des missions récentes*
- **Analyses des résultats obtenus aux éclipses**
 - *« Vrai » bord solaire, courbes de lumière, échelles de hauteur, enveloppes d'hélium*
 - *Mésosphère et analyses de corrélations « low FIP/high FIP »*
- **Discussion: raies « low FIP » et « high FIP » des interfaces et raies coronales:**
 - *Emissions EUV, raies d'émission de l'interface et alimentation de la couronne en masse*
 - *Régions de cavités coronales avec déficit en densité et interface protubérance –couronne*
 - *Tentative de prolonger l'analyse de l'interface Ph-C/I vers la couronne*
- **Conclusions**

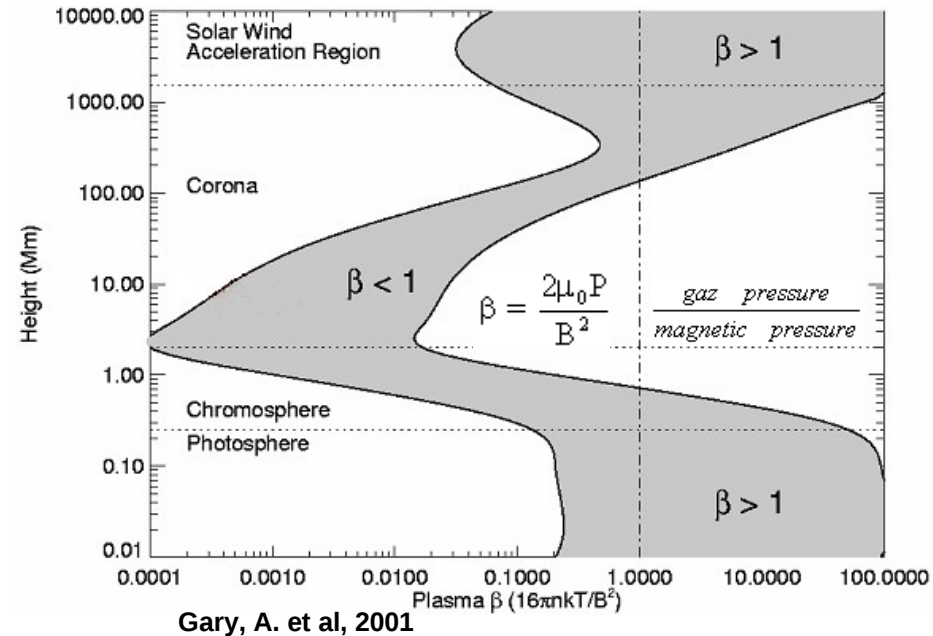
Introduction: Interface Photosphère- Chromosphère/Couronne et la chromosphère

L'approche classique du bord solaire: modèle 1D



By Vernazza, Avrett, Loeser 1976

Ce modèle uniforme et stratifié, est à l'équilibre hydrostatique; il ne permet pas d'aborder la question essentielle du chauffage non-radiatif au dessus de T_{min} ni encore moins le chauffage coronal



Gary, A. et al, 2001

Terminologie employée :

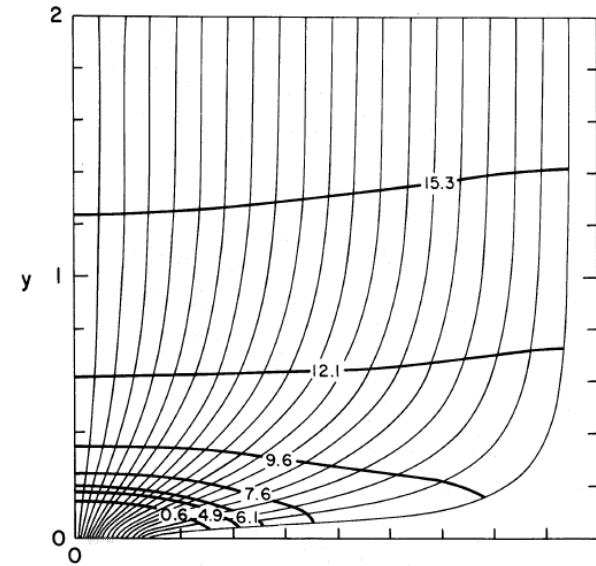
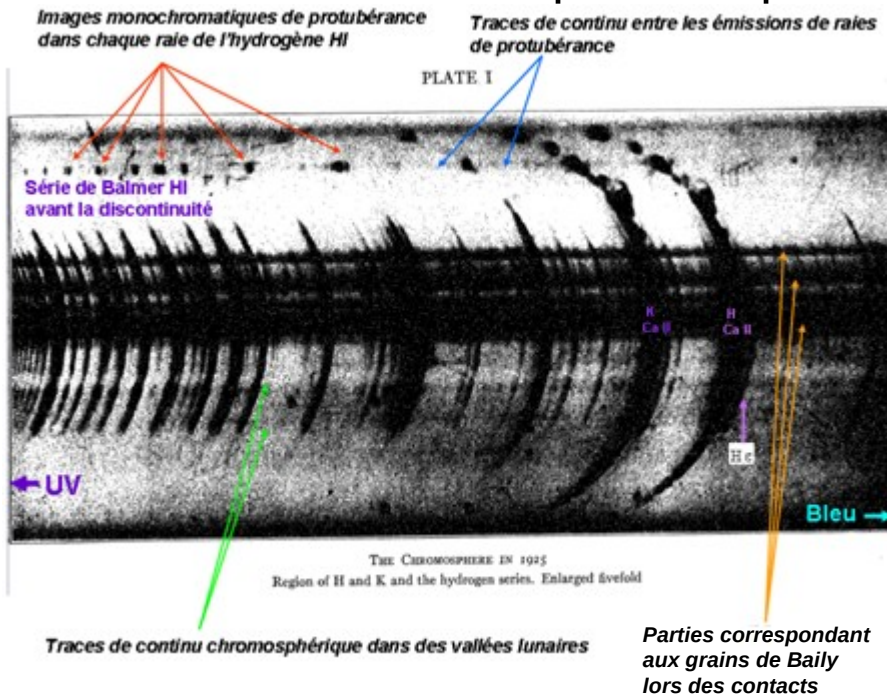
- Ph-C/l => interface photosphère-couronne
- Pr-C/l => Interface protubérance-Couronne
- Ch => chromosphère (très inhomogène)

Note: l'échelle de hauteur donnée par le modèle 1D est de l'ordre de 130 km (équilibre hydrostatique vers T ~ 6000 K et h = 700 km)

En réalité: plusieurs composantes co-existent dans les interfaces:

- à partir d'environ 1 Mm, le champ magnétique joue un rôle prépondérant (β < 1),
- par ailleurs, il y a pénétration probable de la couronne (ou de rayonnement X-EUV) jusqu'à 1000 km

Observations historiques: éclipses au sol, en avion et vols fusée EUV

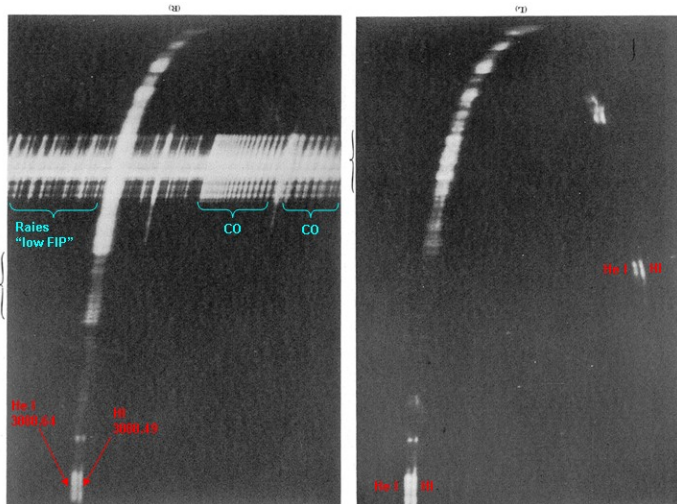


Gabriel et al 1971

Mitchell et al 1935 (dans l'UV):
1 spectre sans fente/contact sur plaque photo

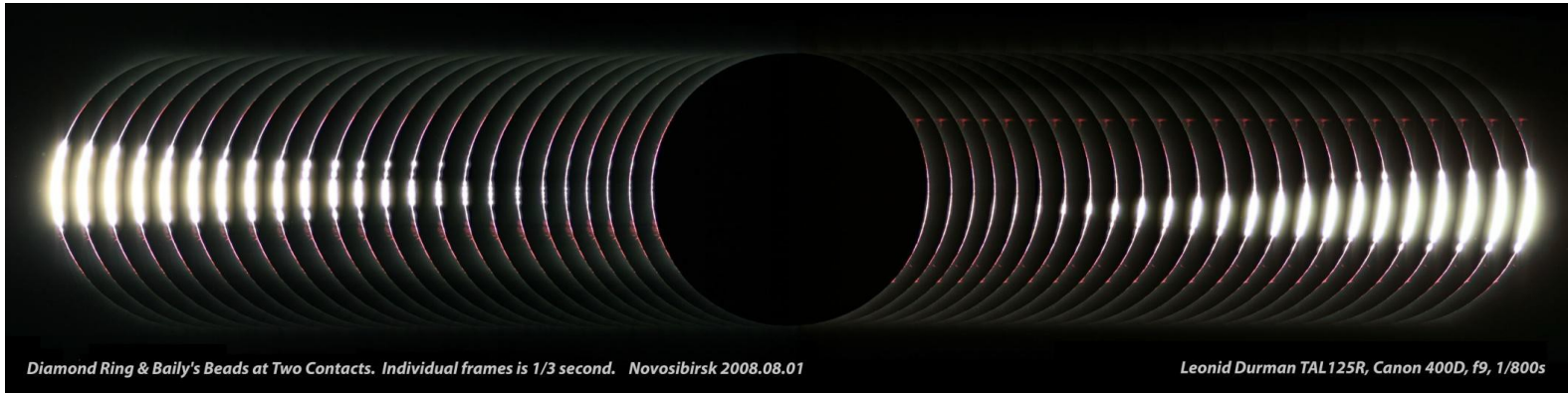
Quelques avancées scientifiques marquantes:

- Arcs plus intenses (H I; He; Ca II..) ⇔ raies formées dans la chromosphère
- Raie He II 4686 détectée (éclipses): photo-ionisation par les X-UV coronaux ? (encore controversé: rôle des e^- énergétiques ?)
- Milieu interspiculaire en « contact » avec la couronne: cellules de supergranulation et de méso-granulation
- Chromosphère composée de spicules dynamiques avec gaine, $h \gtrsim 1000$ km
- Modèles avec constriction (champ magnétique concentré aux frontières de supergranules)



Hiei, 1963 (dans l'UV): 2 spectres sans fente/contact

Introduction: l'observation des éclipses de Soleil permet de "découper" successivement les différentes couches de l'interface



occultation parfaite "dans l'espace": pas de lumière parasite:

Résolution spatiale remplacée par résolution temporelle
Mais: bord de la Lune édenté avec les fameux grains de Baily

Introduction: description des structures de l'interface

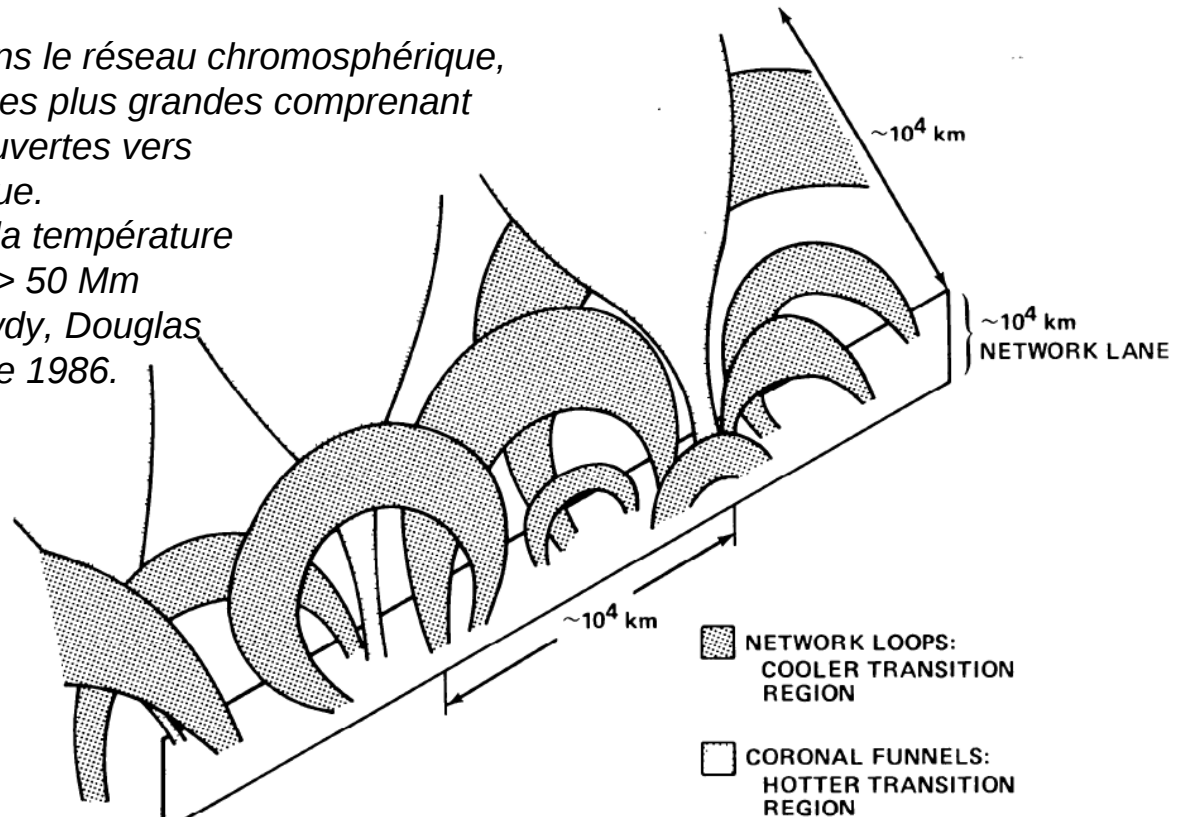
Boucles de Dowdy, J.F. et al

Image en 3 dimensions de la structuration
du plasma par le champ magnétique
dans une région « de transition » dite calme.
2 populations de structures magnétiques
sont présentes:

des boucles partout dans le réseau chromosphérique,
des cheminées coronales plus grandes comprenant
des lignes de champ ouvertes vers
la couronne plus étendue.

L'échelle de hauteur à la température
coronale ($T > 10^6$ K) est > 50 Mm

D'après James F. Dowdy, Douglas
Rabin, Ronald R. Moore 1986.



Questions actuelles plus précises sur l'atmosphère solaire au dessus de T_{\min}^0

1- Définir ce qu'est le bord du Soleil dans les conditions d'éclipse, c'est à dire sans lumière parasite superposée au vrai bord (grande résolution spatiale relative)

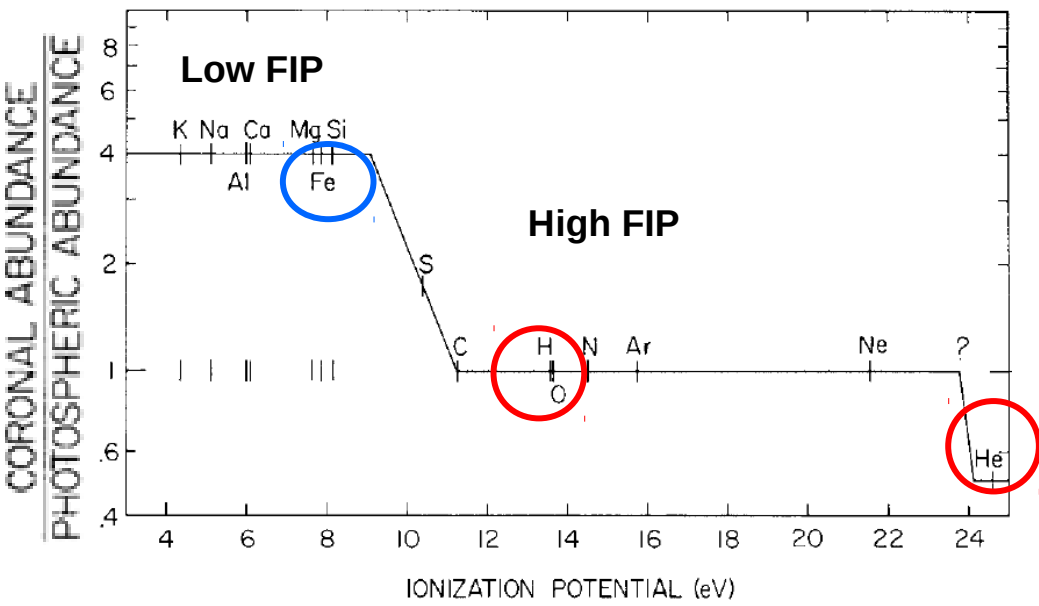
2- La couronne montrant une surabondance en éléments low FIP et l'origine de cet enrichissement est non établie!

3- Analyser où sont excités ou ionisés les éléments (Fe^+ , Ti^+ , $He^{+..}$), en distinguant les « low FIP » dans l'interface photosphère couronne Ph -C//

4- Comprendre l'importance de l'émergence du champ magnétique dans la chromosphère, pourquoi les raies de l'hélium optiquement minces sont vues comme des enveloppes dans les régions d'interfaces Ph-C// et qu'est-ce que la chromosphère représente ?

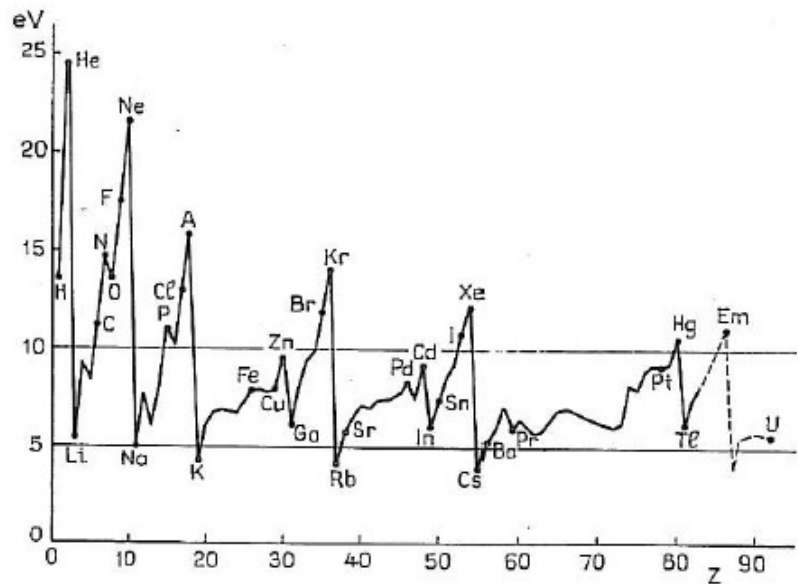
Surabondance coronale établie en éléments à bas potentiel de 1^{ère} ionisation (les « low FIP »)

U. Feldman and K.G. Widing:
comparaison photosphère-couronne



D'après Feldman, U. Widing, K.G. , 2003
Et bien d'autres études sur images EUV, spectre EUV
Et mesures in-situ dans le vent solaire.

Potentiels d'ionisation des éléments (en eV)
en fonction de leur numéro atomique Z.
D'après A. Dauvilliers 1962.



Questions actuelles: incompatibilité des modèles VAL hydrostatiques stratifiés avec les observations des structures dynamiques (spicules)

Schémas et images représentant les structures de l'interface

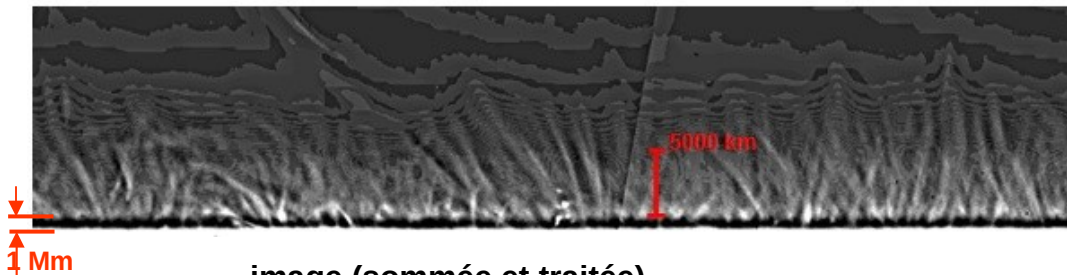
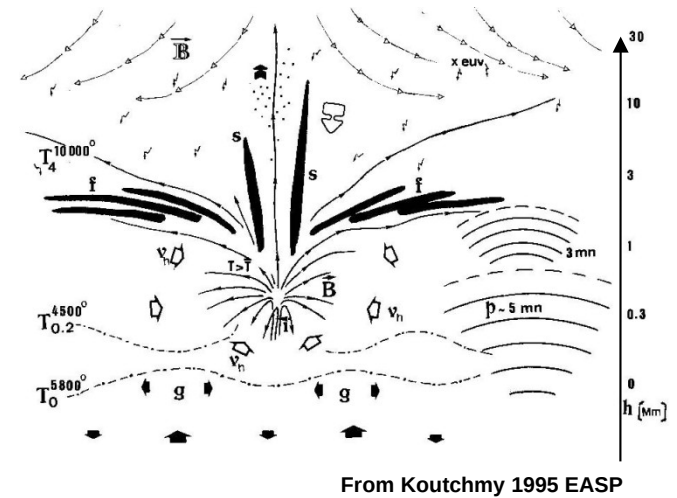
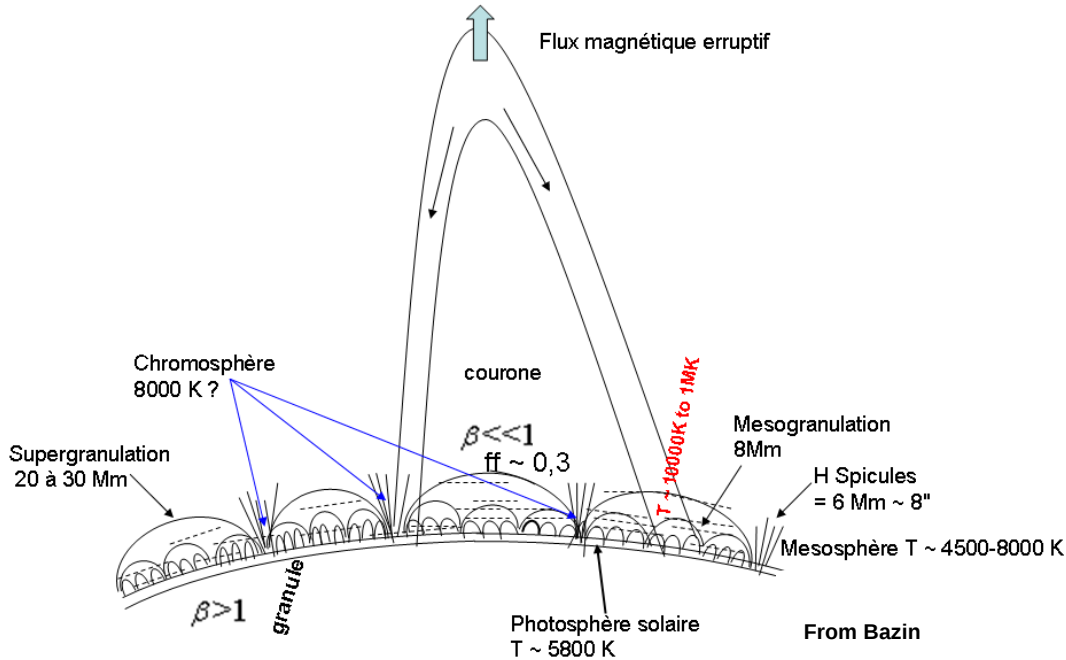
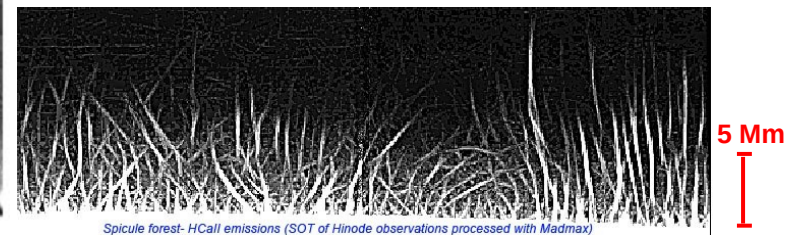


image (sommée et traitée)
dans la raie H - Ca II du bord solaire
SOT- Hinode (JAXA & NASA)

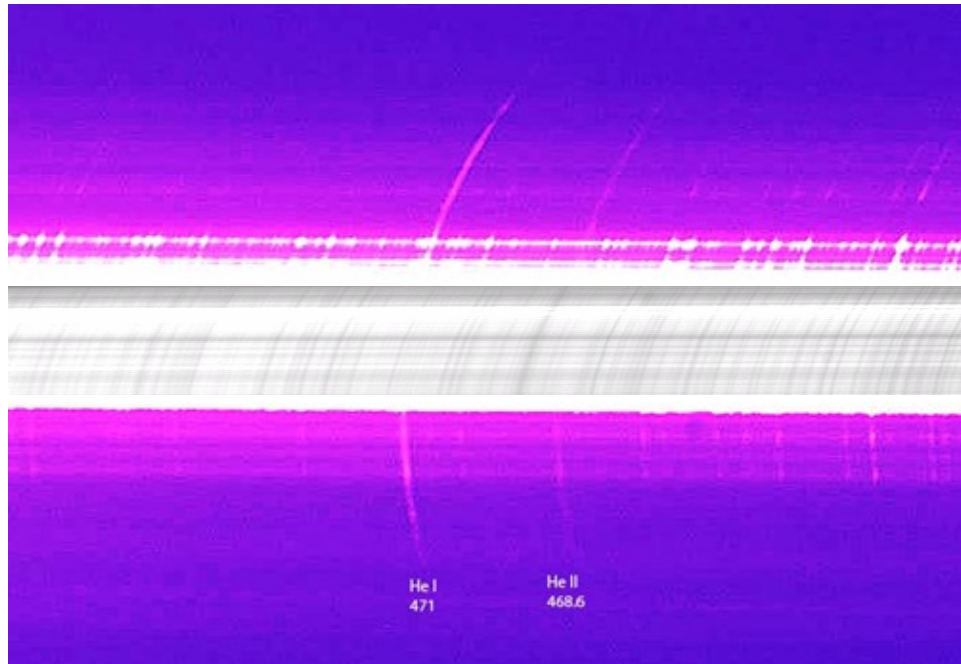


Limbe en H-Call avec le SOT de Hinode
traité sous Madmax pour renforcer la visibilité
Tavabi, Koutchmy 2013

Méthodes modernes d'observation des couches extérieures et interfaces

Grâce au gain apporté par les nouvelles caméras CCD et CMOS et grâce à la micro-informatique

- La méthode des spectres éclairs sans fente apporte:
- Une excellente résolution temporelle se traduisant par une résolution spatiale ultime;
- Une absence de lumière parasite et donc l'accès à la couronne solaire



*Extrait de la séquence spectrale obtenue
au voisinage du second contact (durée 10 s)
de l'éclipse totale de Soleil du 1er Août 2008 en Sibérie*

Spectre de grain de Baily
avec raies F
(avant ejection des filtres)

Enveloppe He I 4713 Å

Nouveauté:
Seconde enveloppe He II 4686 Å
(n'était pas établi auparavant)

Observations d'éclipses totales de 2006, 2008, 2009, 2010 et 2012 rapportées dans cette thèse

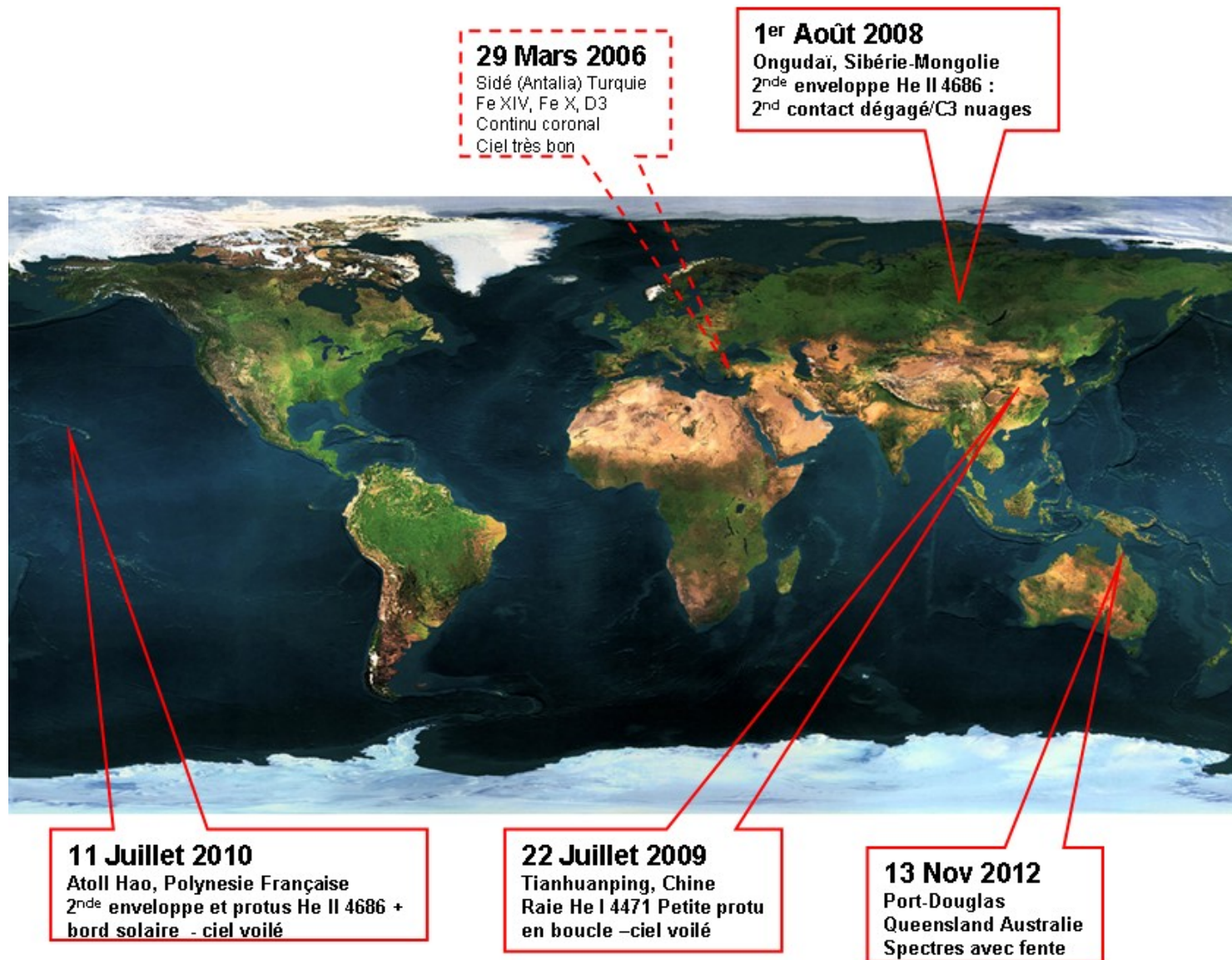
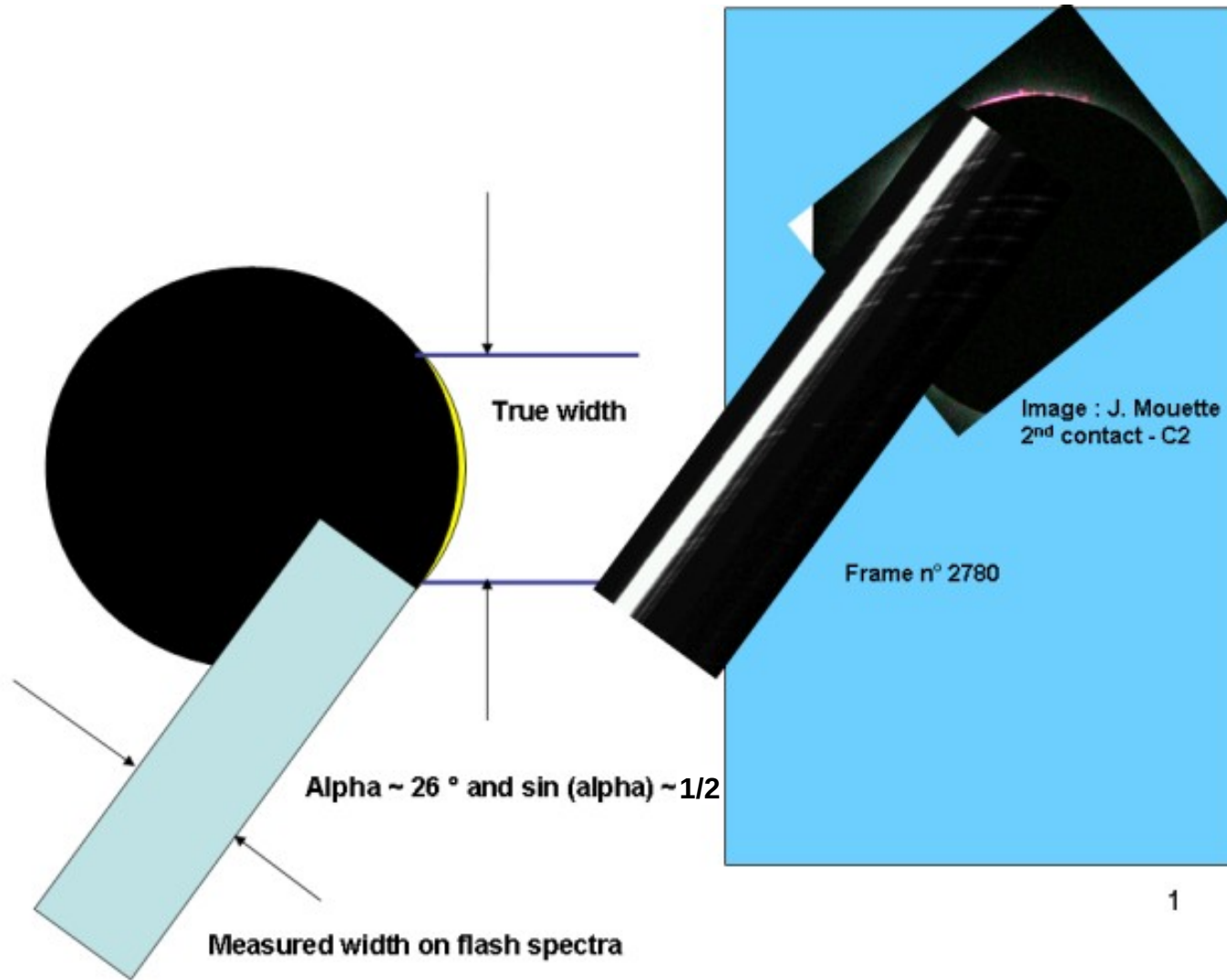
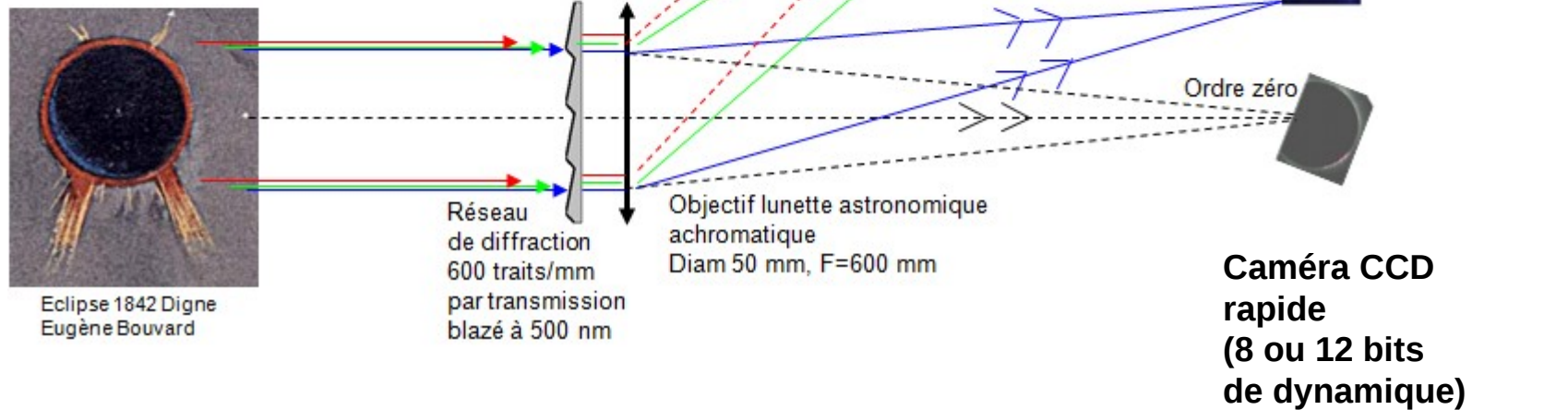


Schéma indiquant l'endroit où sont pris les spectres éclair lors des contacts (éclipse du 11 Juillet 2010)



Méthode du spectre éclair aux éclipses (spectroscopie sans fente):

Montage expérimental: réseau-objectif pour obtenir des spectres éclairs avec CCD à acquisition rapide durant les 2^{ème} et 3^{ème} contacts d'éclipses totales

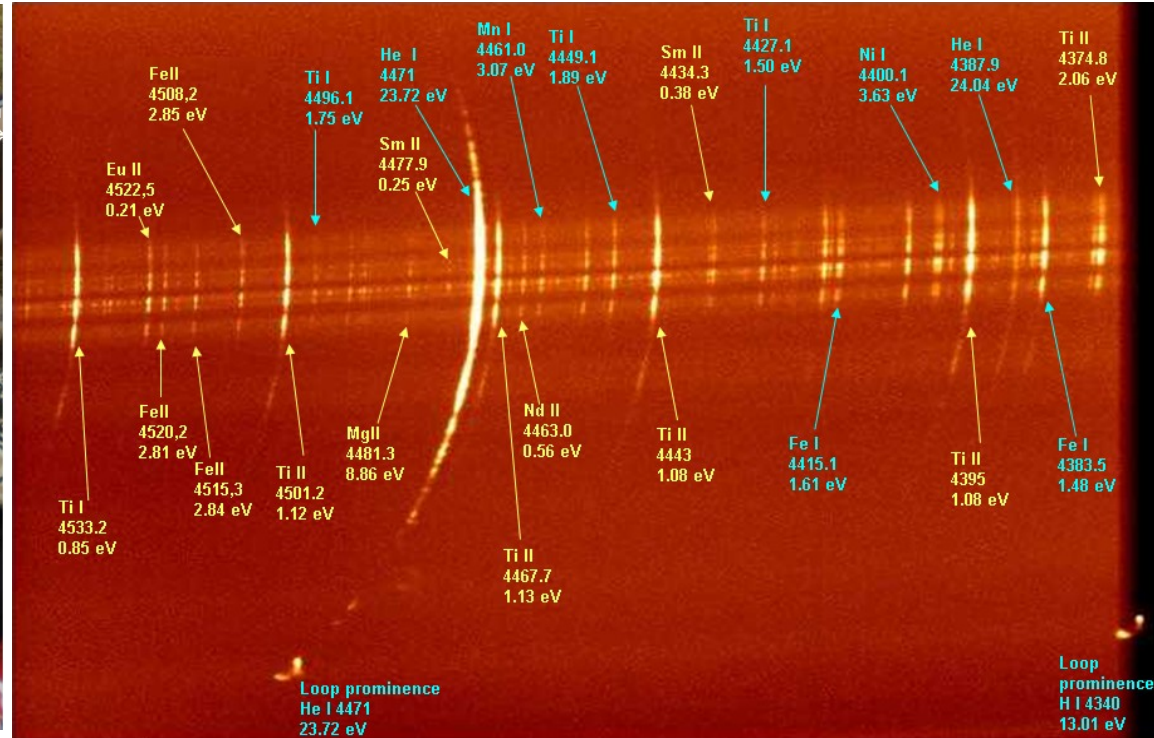
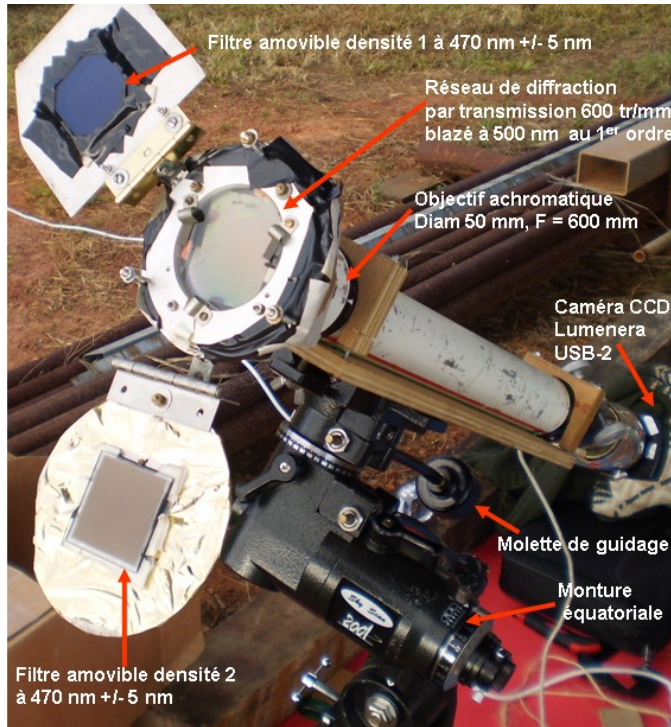


Domaine spectral limité 4700 +/- 120 Å
Caméra CCD Lumenera 8 et 12 bit, 15 images/s, pixels 4.6µm
Résolution spectrale 0.12 Å/pixel, spatiale 1.1 Mm/pixel
Utilisation d'un GPS pour la chronodatation des images,
Calcul des contacts avec éphémérides (P. Rocher, X. Jubier)

Méthode du spectre éclair: observations aux éclipses de 2008, 2009, 2010

100 à 150 spectres/contact (technologie CCD rapides)

Des spectres « éclairs » CCD à cadence rapide ont été obtenus pour la 1^{ère} fois durant plusieurs éclipses totales.



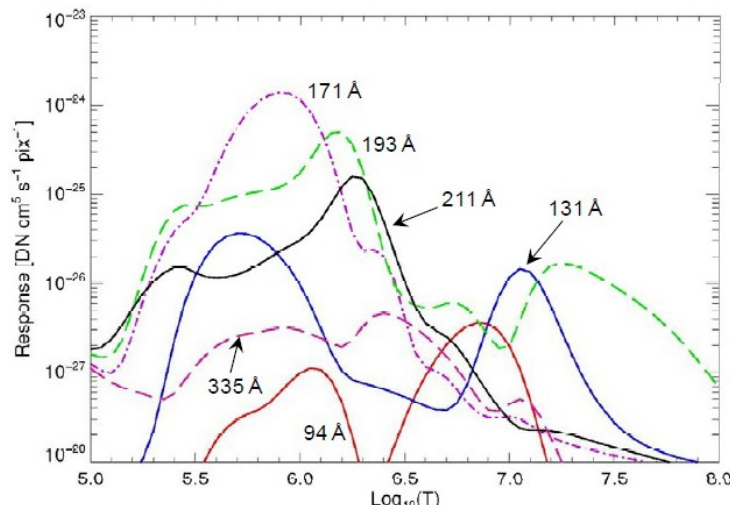
Montage expérimental:
enregistrement et étalonnage des spectres éclair sans fente durant les contacts d'éclipses

Au 3^{ème} contact, éclipse totale du 22 Juillet 2009 en Chine
L'interface est « découpée » en tranches durant la séquence temporelle

Méthodes modernes d'observation des couches extérieures et interfaces

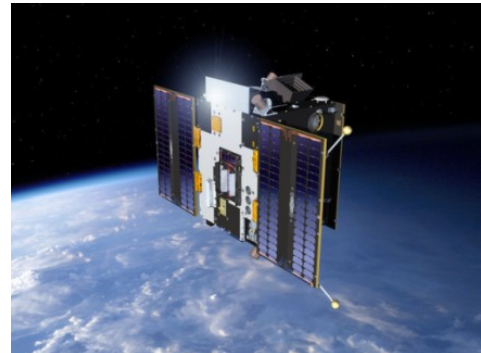
Images en lumière blanche et surtout, images EUV simultanément aux éclipses grâce aux missions spatiales: SWAP/Proba2, AIA/SDO, TRACE

- Températures de 0.7 à 1.5 MK (171 Å & 193 Å images) et plus,
- He II 304 Å à ~30000 K optiquement épaisse, images AIA (SDO), TRACE
- Images en Fe IX/FeX 174 Å (0.7 MK) des régions des cavités coronales: Images sommées (SWAP Proba2)



P. Cheimets et al 2009

Problèmes pour interpréter les images en terme de température (solutions non-univoques) pour les fonctions de contribution



SWAP Proba2 (ESA) 174



SDO/AIA



TRACE

Résultats obtenus aux éclipses (absence de lumière parasite):

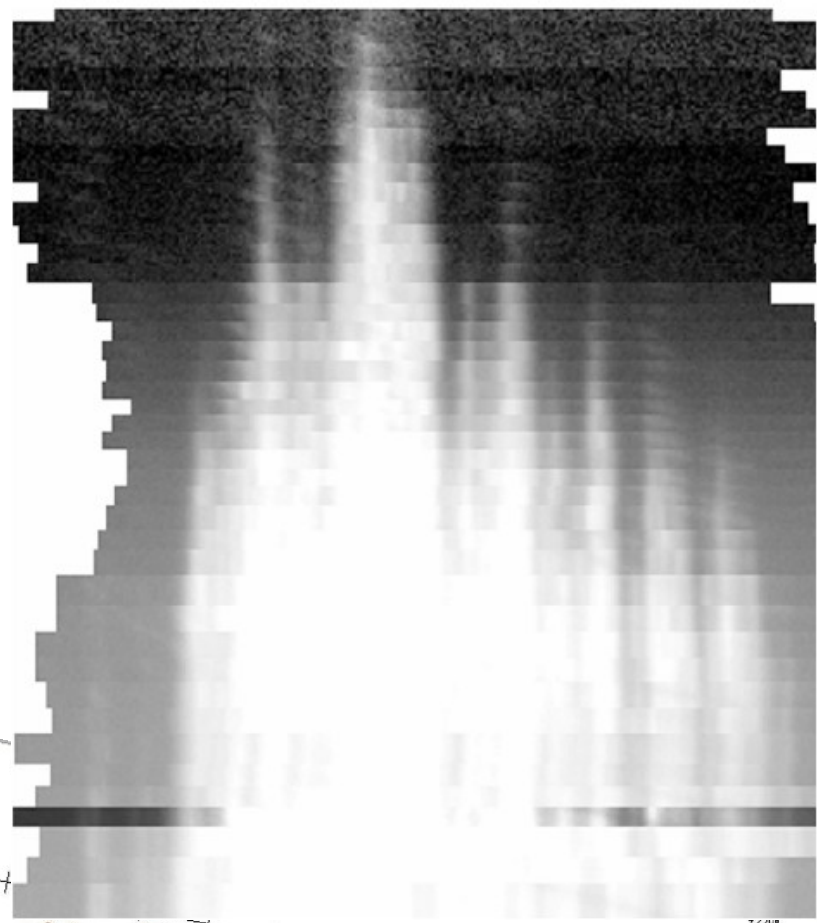
« Vrai » bord solaire observé au-delà du limbe édenté de la Lune au 3^{ème} contact, (« grain de Baily »)
 Eclipse du 11 Juillet 2010

C3 time-slice interval between each sample ~ 0,2 s

add 10 h 45 min TU :

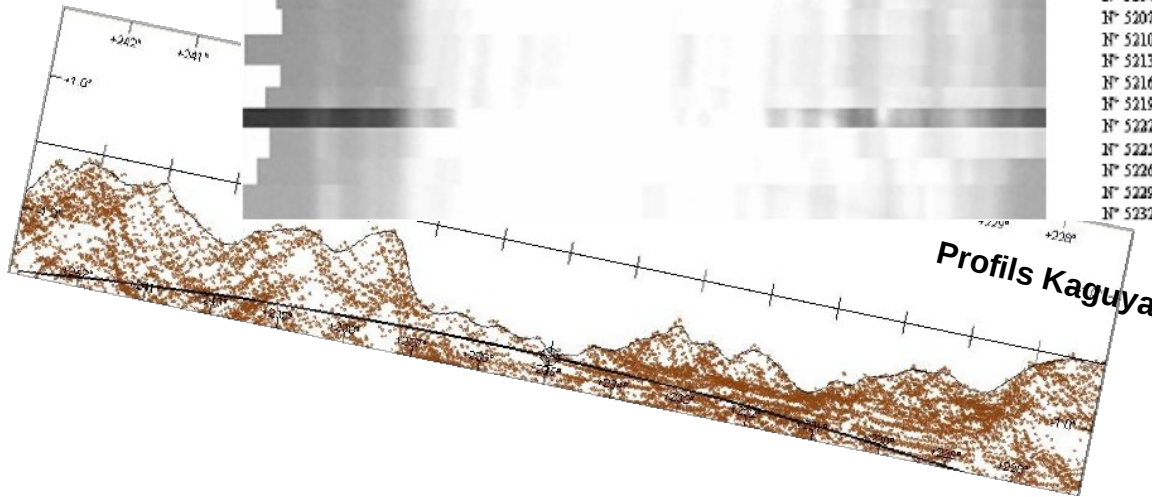
Arc seconds

Diagramme
 Temps – espace
 par tranche
 Quasi-monochromatique
 (Ici continu)



N° 5117 : 3,474 s	-0,989
N° 5120 : 3,672 s	-0,791
N° 5123 : 3,869 s	-0,594
N° 5126 : 4,067 s	-0,396
N° 5129 : 4,267 s	-0,196
N° 5132 : 4,463 s	0
N° 5134 : 4,727 s	0,264
N° 5137 : 4,925 s	0,462
N° 5140 : 5,122 s	0,639
N° 5142 : 5,254 s	0,791
N° 5143 : 5,320 s	0,857
N° 5146 : 5,518 s	1,055
N° 5149 : 5,716 s	1,253
N° 5155 : 6,112 s	1,649
N° 5158 : 7,035 s	2,572
N° 5161 : 7,233 s	2,77
N° 5162 : 7,562 s	3,099
N° 5165 : 7,760 s	3,297
N° 5167 : 8,090 s	3,627
N° 5170 : 8,288 s	3,825
N° 5173 : 8,486 s	4,023
N° 5174 : 8,816 s	4,353
N° 5177 : 9,014 s	4,551
N° 5180 : 9,211 s	4,748
N° 5183 : 9,409 s	4,946
N° 5186 : 9,607 s	5,144
N° 5189 : 9,805 s	5,342
N° 5192 : 10,003 s	5,539
N° 5195 : 10,201 s	5,737
N° 5198 : 10,728 s	6,257
N° 5201 : 10,926 s	6,457
N° 5204 : 11,124 s	6,657
N° 5207 : 11,322 s	6,857
N° 5210 : 11,520 s	7,057
N° 5213 : 11,718 s	7,247
N° 5216 : 11,915 s	7,447
N° 5219 : 12,113 s	7,647
N° 5222 : 12,443 s	7,977
N° 5225 : 12,641 s	8,177
N° 5226 : 13,037 s	8,567
N° 5229 : 13,235 s	8,767
N° 5232 : 13,432 s	8,967

← Disparition
 du dernier
 grain de
 Baily
 ← Valeur du diam.
 solaire moyen
 utilisé dans les
 éphémérides



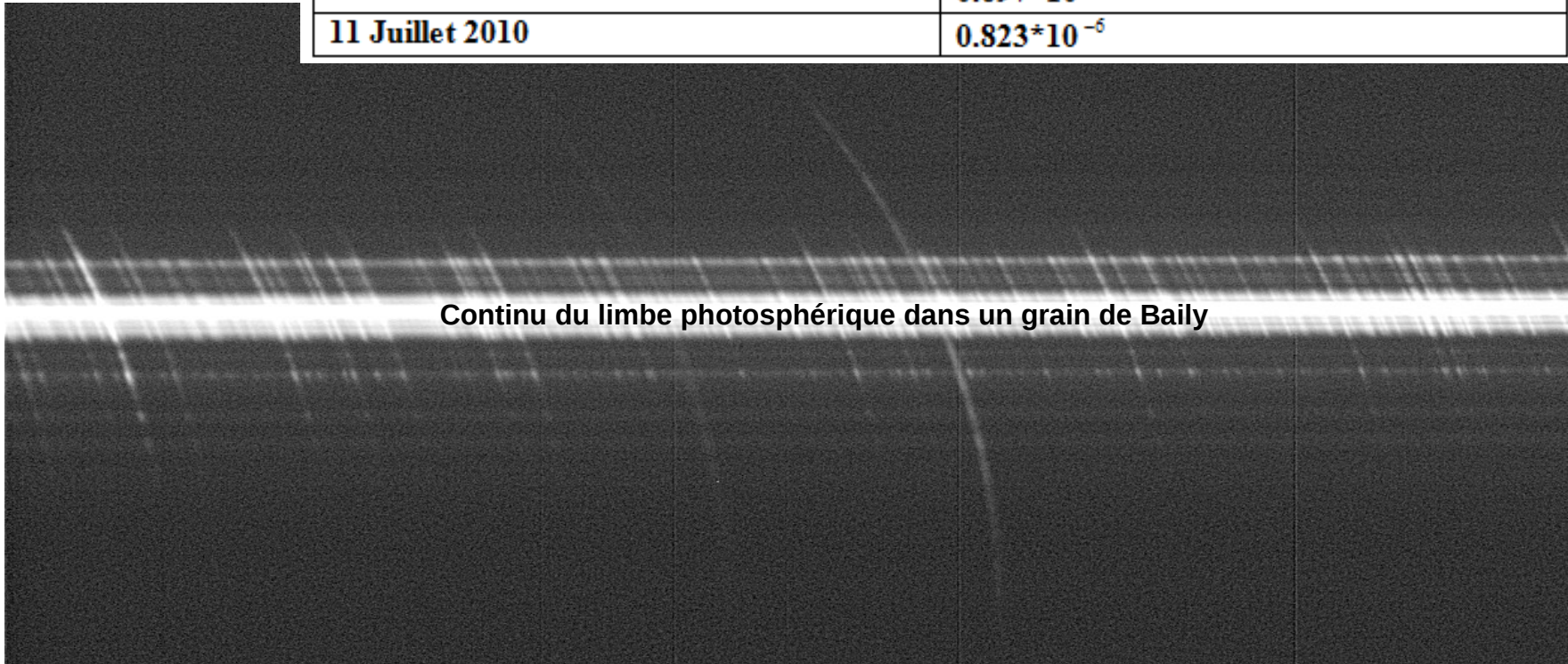
Profil de la Lune reconstruit
 pour la date de l'éclipse
 (P. Rocher)

Analyse des résultats obtenus aux éclipses: le vrai bord solaire

Objectifs: mesurer le vrai continu entre la myriade de raies d'émission et comparer avec les prédictions des modèles 1D : c'est nouveau !

- 1) Courbes de lumière $I = f(h)$; (I : unités disque solaire moyen, h : km)*
- 2) Echelles de hauteurs dans le continu, dans les raies du Fe II, He I et He II, etc..*

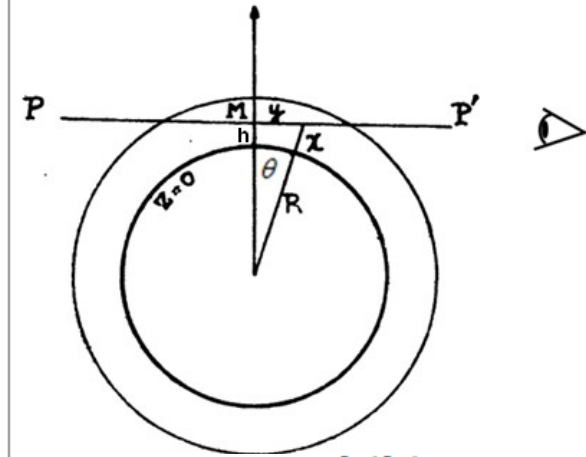
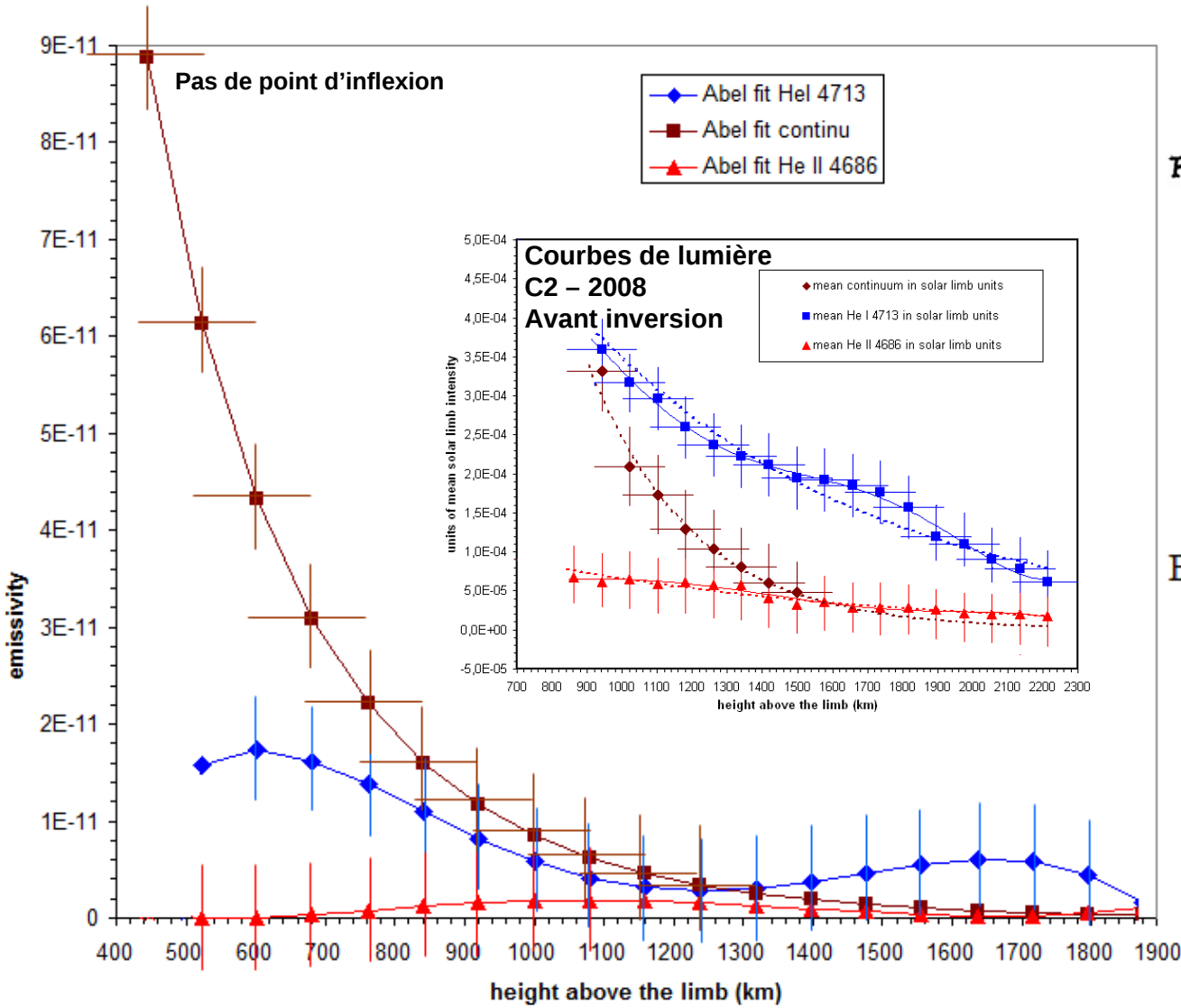
Eclipse étudiée	Correspondance 1 ADU-Unité disque solaire moyen
1er Août 2008	$5.76923 \cdot 10^{-6}$
22 Juillet 2009	$0.697 \cdot 10^{-6}$
11 Juillet 2010	$0.823 \cdot 10^{-6}$



Continu du limbe photosphérique dans un grain de Baily

26 spectres sommés correspondant à une altitude évaluée de 400 km et au dessus (limbe photosphérique du modèle 1D). 3^{ème} contact éclipse 2010

Courbes de lumière de l'hélium neutre et ionisé (« high FIP »): Interprétation et inversion d'intégrale d'Abel

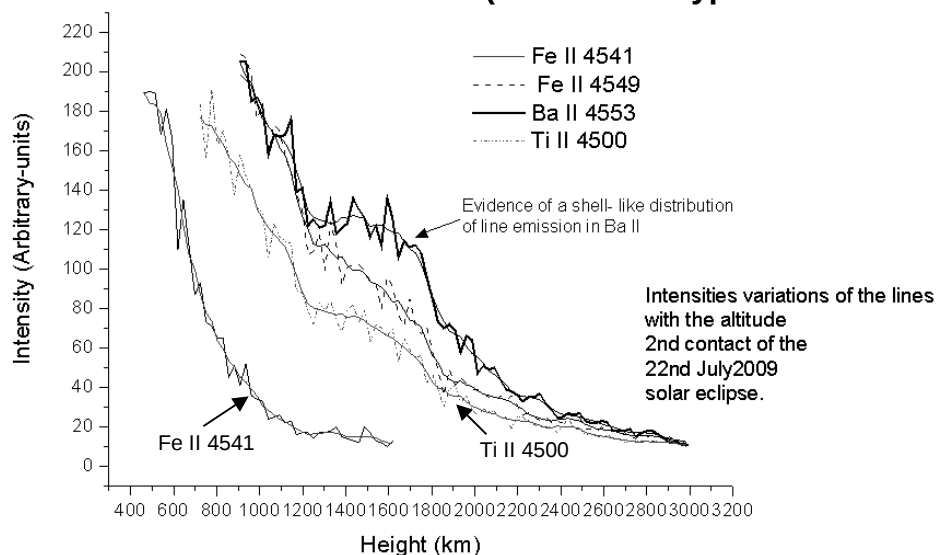


$$E(h) = \int_{h_0}^{\infty} \frac{\frac{dI(h)}{dh}}{2 * \sqrt{(R_0^2 - (R - h)^2)}} dh$$

$$\text{Emissivité} \sim \frac{dI(h)}{dh}$$

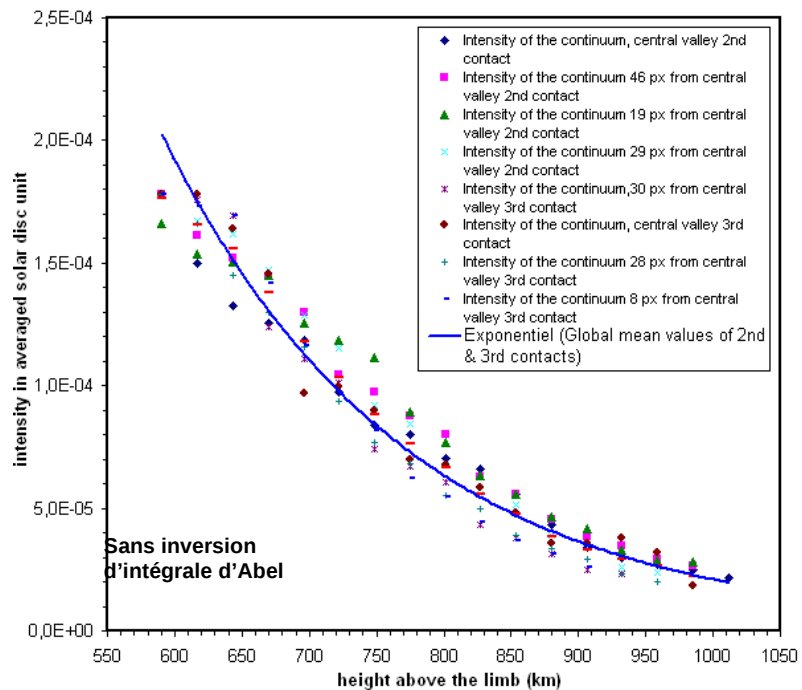
Emissivité déduite après inversion de l'intégrale d'Abel, à partir des courbes de lumière, ajustées par des courbes polynomiales, au 2^{ème} contact de l'éclipse totale du 1^{er} Août 2008

Echelles de hauteur déduites des spectres éclairés de l'éclipse du 22 Juillet 2009 (en faisant l'hypothèse d'une décroissance exponentielle)



Raies étudiées C2/2009	longueur d'onde (Å)	Echelles de hauteurs
Fe II	4541	319 ± 50 km
Fe II	4549	561 ± 60 km
Ba II	4554	554 ± 60 km
Ti II	4500	607 ± 60 km

Courbes de lumière des raies Fe II, Ti II, Ba II C2 du 22 Juillet 2009



Raies étudiées C3/2009	longueur d'onde (Å)	Echelles de hauteurs
He I	4471	1098 ± 50 km
Fe II	4541	263 ± 60 km
continuum H ⁻	4500	161 ± 10 km
Ti II	4500	569 ± 60 km

Les raies low FIP ont des échelles de hauteur: $300 < H < 600$ km qui correspondent au milieu interspiculaire. Les raies « high FIP » comme He I sont dominés par les macrospicules et montrent une distribution en « enveloppe », ainsi qu'une raie forte low FIP comme le Ba II (et, encore plus, les raies H & K,...)

Echelles de hauteur déduites des spectres éclairs de l'éclipse du 11 Juillet 2010

relevés effectués dans une vallée lunaire au 2ième contact

	Equations pour l'inversion d'Abel	Echelle de hauteur estimée
Continu 2 nd contact 2010	$y = 6,210533 * 10^{-5} e^{-0.007066255 h}$	141 ± 10 km ←
Fe II 4629 2 nd contact 2010	$y = .7529 * 10^{-9} * e^{-0.002882739h}$	346 ± 60 km
He I 4713 2 nd contact 2010	$y = 1.832821 * 10^{-9} * e^{-0.00219089h}$	456 ± 60 km ←
He II 4686 2 nd contact 2010	$y = 1.994827 * 10^{-10} * e^{-0.001766141 h}$	566 ± 80 km ←

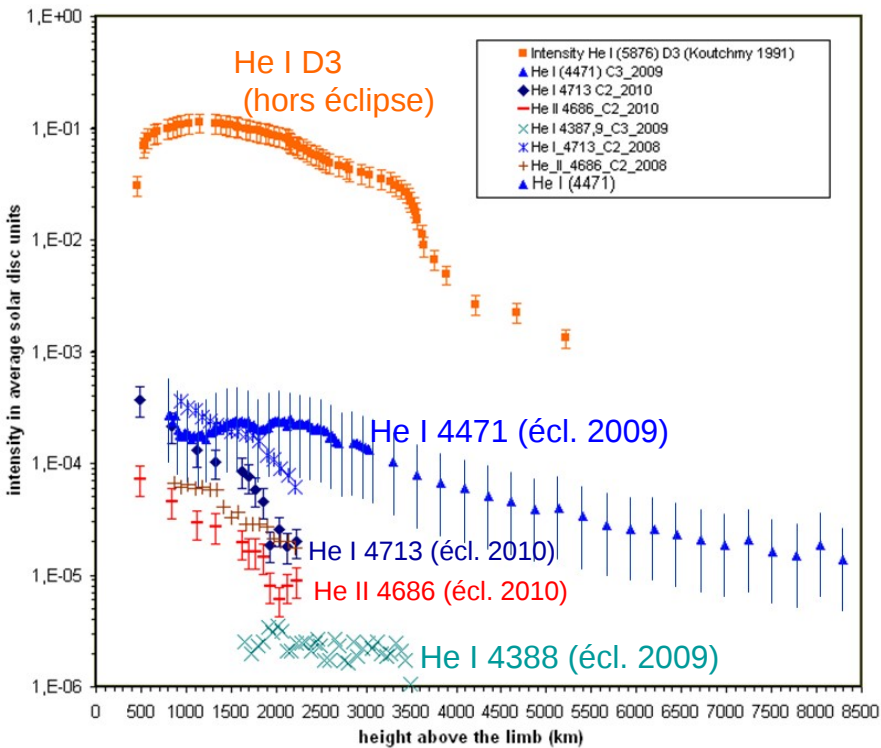
HETL

	Equation fit inversion d'Abel	Echelles hauteur estimées
Continu 4700 Å (éclipse 2010)	$E(h) = 2.279195 * 10^{-7} * e^{-0.005003543 h}$	199.8 ± 30 km
Continu 4815 Å (éclipse 1970) Athay Weart 1970	$E(h) = 2.324851 * e^{-0.0048 h}$	208 ± 60 km
Fe II 4629 Å (éclipse 2010)	$E(h) = 9.933578 * 10^{-8} * e^{-0.002894446 h}$	345 ± 40 km
Mg I 4702 Å (éclipse 2010)	$E(h) = 4.145651 * 10^{-7} * e^{-0.005664498 h}$	176 ± 30 km

Valeurs différentes des échelles de hauteurs:

- Conditions des contacts d'éclipses différentes,
- grains de Baily à géométrie variable, profil lunaire

Synthèse d'analyses d'enveloppes d'hélium – high FIP (raies optiquement minces)



Comparaisons des courbes de lumière de différentes raies d'hélium obtenues aux éclipses de 2008, 2009 et 2010 et la courbe obtenue par observation directe de la raie très intense D3 de He I à Sacramento Peak (Koutchmy 1990).

Date et contact de l'éclipse	Echelle de hauteur déduite après inversion d'Abel	Echelle de hauteur déduite après inversion d'Abel
	He I 4713 Å	He II 4686 Å
C2/ 2008	643 ± 70	696 ± 70
C2/ 2010	456 ± 60	566 ± 80
C3/ 2010	849 ± 80	953 ± 90

récapitulatif des échelles de hauteurs déduites sur les raies d'hélium, d'après les courbes d'ajustement en exponentielles décroissantes et après inversion d'intégrale d'Abel des courbes de lumière. (partie « interne » des courbes de lumière, en ignorant l'enveloppe)

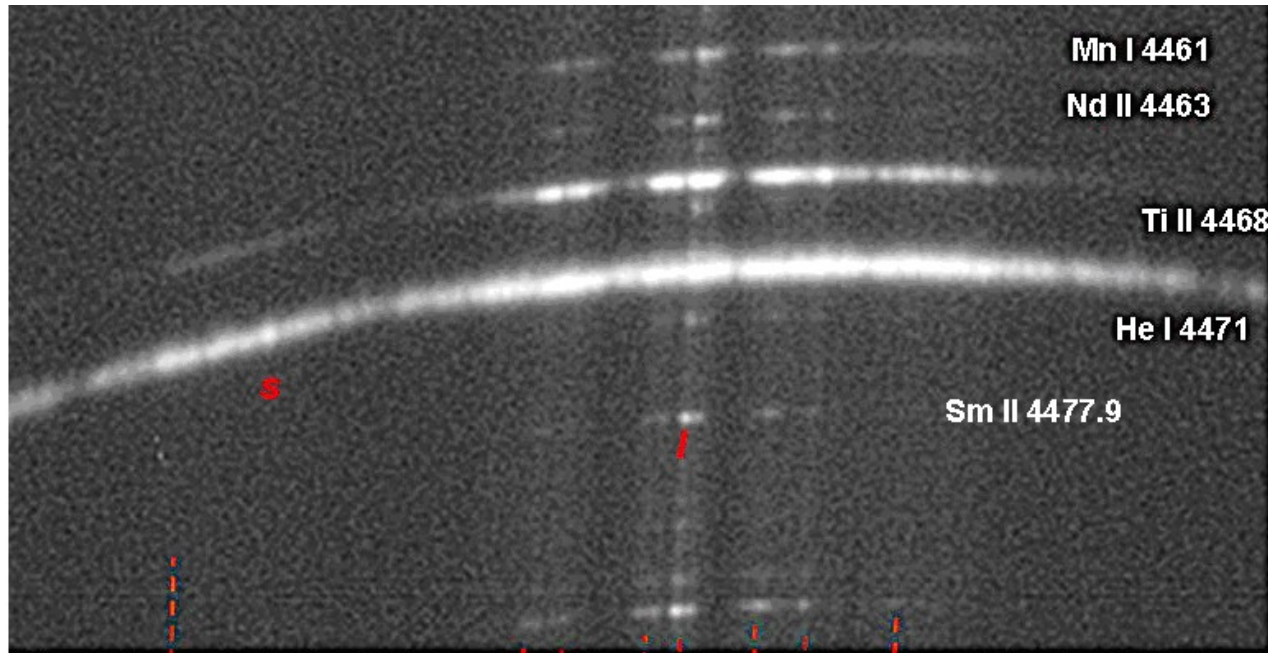
Dates et contact de L'éclipse étudié	Altitude du maximum d'émissivité He I 4471 Å	Altitude du maximum d'émissivité He I 4713 Å	Altitude du maximum d'émissivité He II 4686 Å	Altitude du maximum d'émissivité Ba II 4553 Å
C2 de 2008 (ciel sans voiles)	-	1670 ± 50 km	1150 ± 50 km 2nd enveloppe	-
C2 de 2009 (ciel voilé)	-	-	-	1550 ± 70 km
C3 de 2009 (ciel voilé)	1700 +/- 200 km	-	-	-
C2 de 2010 (ciel voilé)	-	1550 ± 100 km	1550 ± 100 km 2nd enveloppe	-
C3 de 2010 (ciel voilé)	-	1300 ± 100 km	-	-

altitudes des maxima des émissivités des courbes de lumière des raies He I 4471 Å, He I 4713 Å, He II 4686 Å et Ba II 4553 Å pour les éclipses totales de Soleil de 2008, 2009 et 2010.

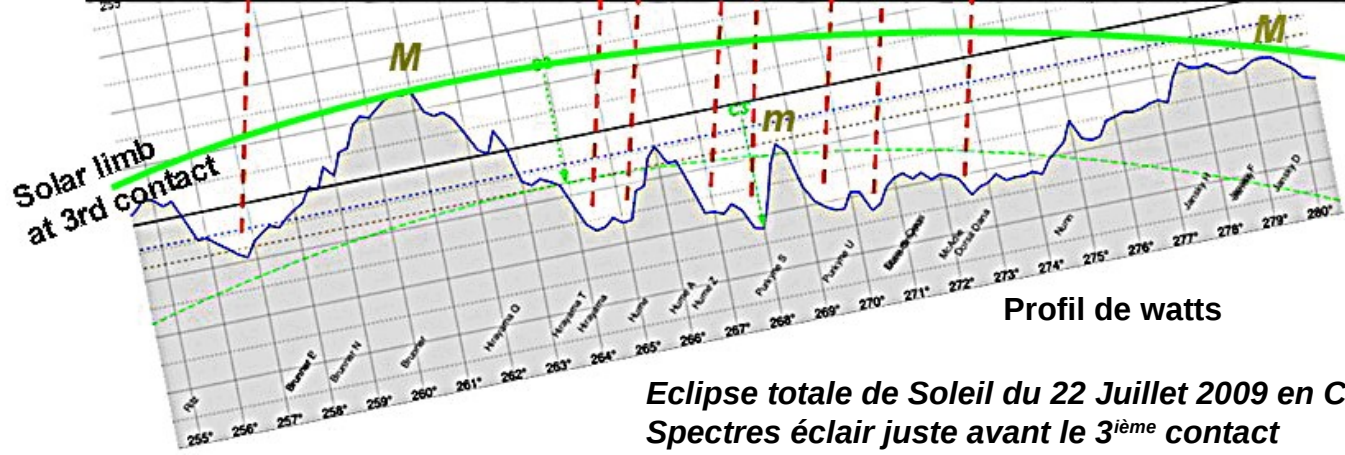
Origine commune des émissions dans les enveloppes:

- Photoionisation par la couronne EUV
- Électrons énergétiques en provenance de la couronne, conduits par les lignes de champ magnétique..

« Mésosphère » solaire et macrospicules (He I 4471 Å)
 Spectres éclair de 2009: sondages des couches de l'interfaces Ph-C/I
 et la chromosphère



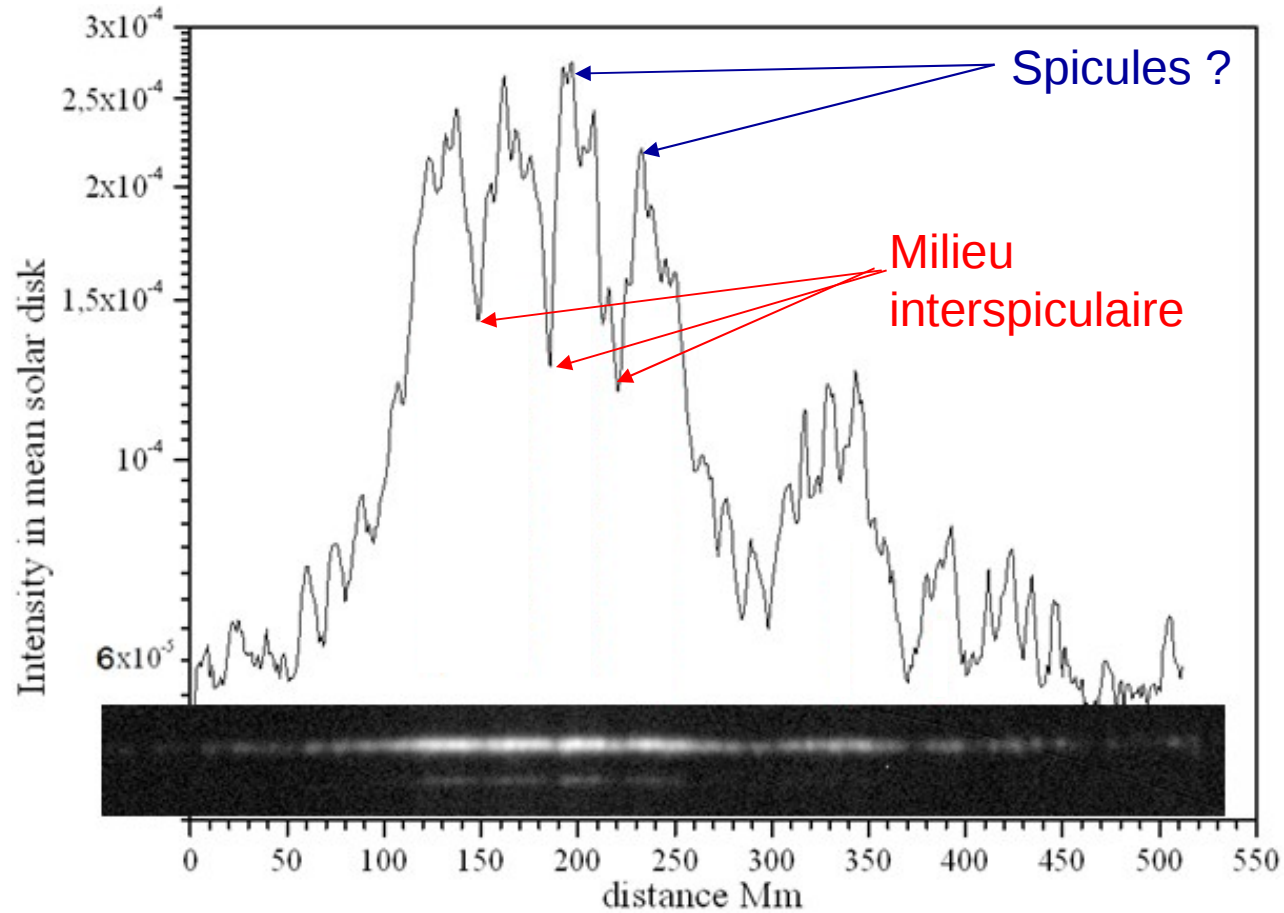
Des structures He I apparaissent au-dessus des montagnes de la Lune



Profil de watts

Eclipse totale de Soleil du 22 Juillet 2009 en Chine
 Spectres éclair juste avant le 3^{ème} contact
 Altitudes sondées 1776 -1555 km au dessus du limbe solaire

Raie He I 4471 : Spicules et macrospicules à $h > 2700$ km (éclipse 2009)



*L'intégration le long de la ligne de visée produit un effet de superposition des structures.
(3^{ème} contact de l'éclipse 22 Juillet 2009)*

Amélioration de la résolution et tentative d'analyses de corrélations He I (high FIP) / Ti II (low FIP) sur les renforcements chr.) (Eclipse du 22 Juillet 2009, 3^{ième} contact)

N° 2474 à 2486 \Leftrightarrow h = 1776 à 1461 km

He I 4471 (High FIP)

Ti II 4468 (Low FIP)

Taille de la plus petite structure :
8*2 Mm ??

N° 2338 à 2349 \Leftrightarrow h = 5353 à 5064 km

Renforcements
chromosphériques

Taille de la plus petite structure = 12*3Mm ??

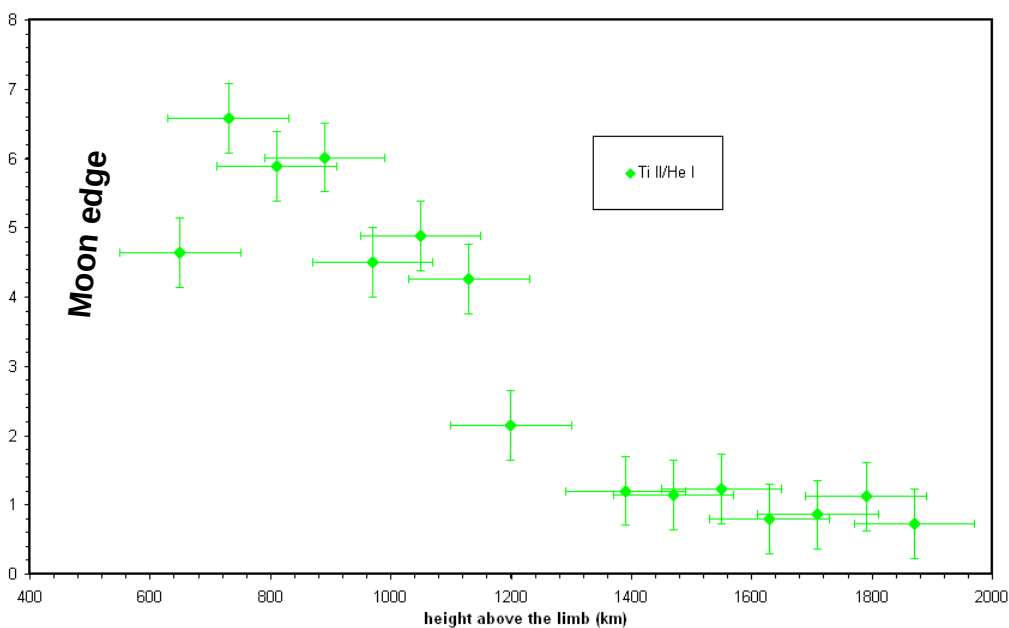
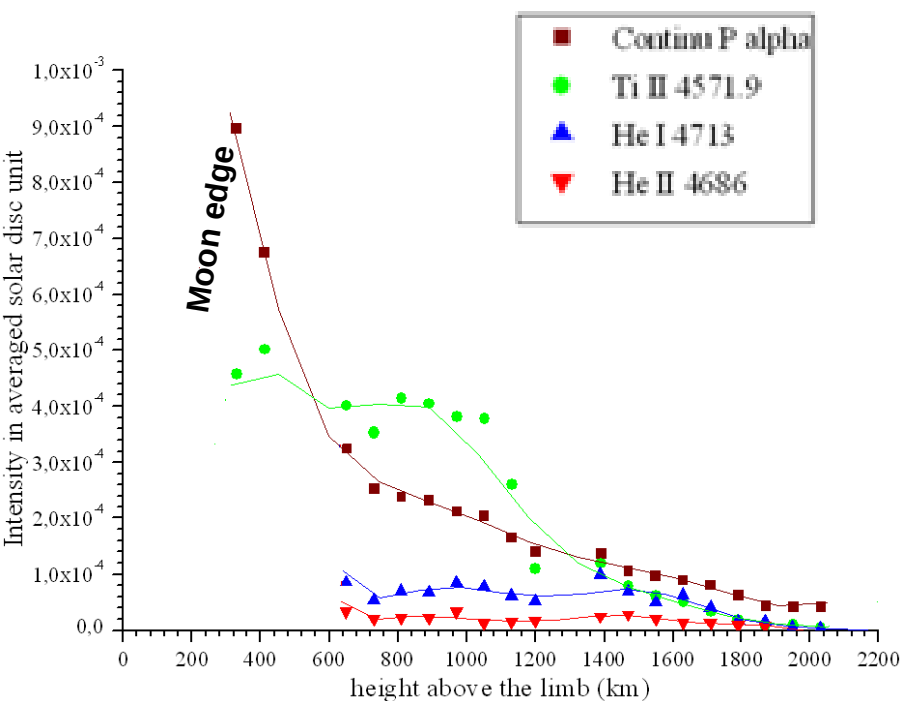
*He I 4471 Å pour sonder le milieu Interspculaire
et raie du Ti II 4468 Å après traitement avec masque flou*

- **Ti II dominé par les collisions (formé plus bas)**
- **He I formé plus haut dominé par la photo-ionisation par les EUV coronaux (ou e- rapides)**

Discussion:

raies « low FIP » et « high FIP » des interfaces

Analyse des rapports d'intensité de la raie du Ti II (« low-FIP »)
sur la raie He I (« high FIP »)
dans l'interface photosphère-couronne (Ph –C/I)

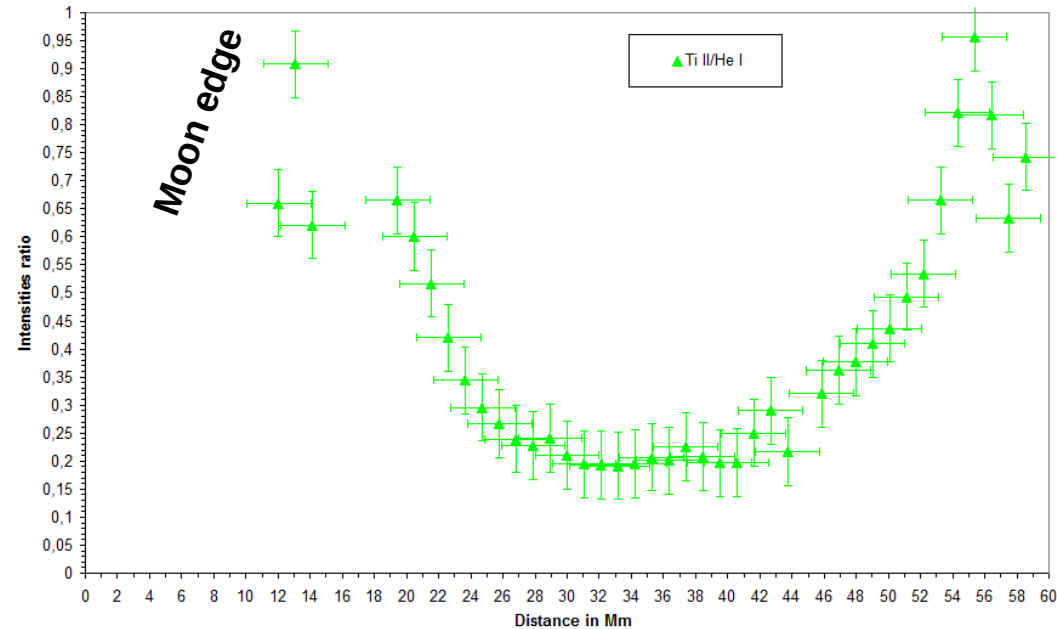
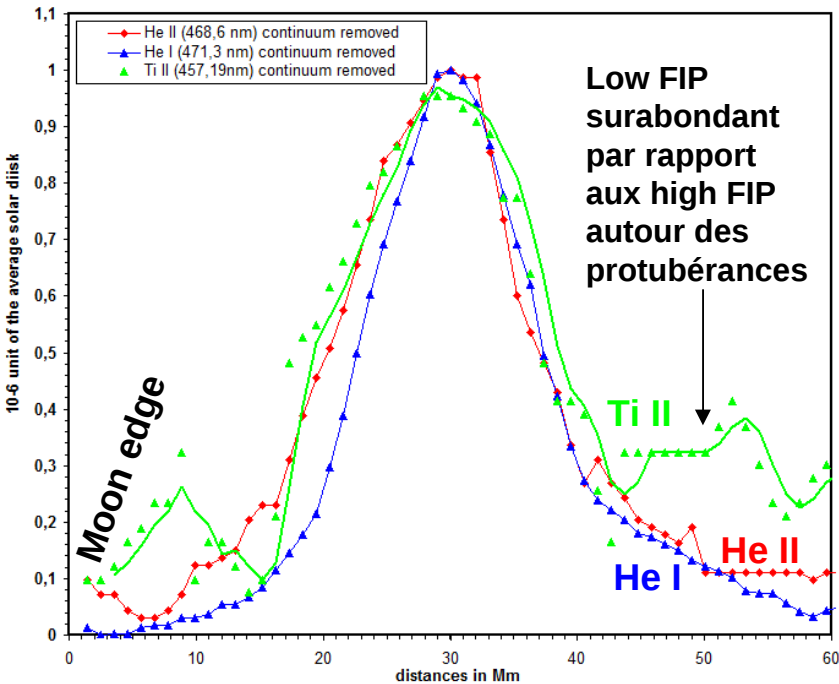


Profils d'intensité relevés sur les spectres éclairs
au 2nd contact dans les raies He I 4713 Å, He II
4686 Å, Ti II 4571.9 Å, en utilisant l'éclipse totale
du 11 Juillet 2010

Rapports d'intensité $I_{Ti II} / I_{He I}$
dédiés des profils
d'intensité

Discussion: Les observations montrent d'autres régions: Les protubérances qui « baignent » dans la couronne !

Analyse des rapports d'intensité du Ti II « low-FIP » sur He I « high FIP » dans l'interface protubérance-couronne (Pr –C/I) comparée à l'interface Ph-C/I



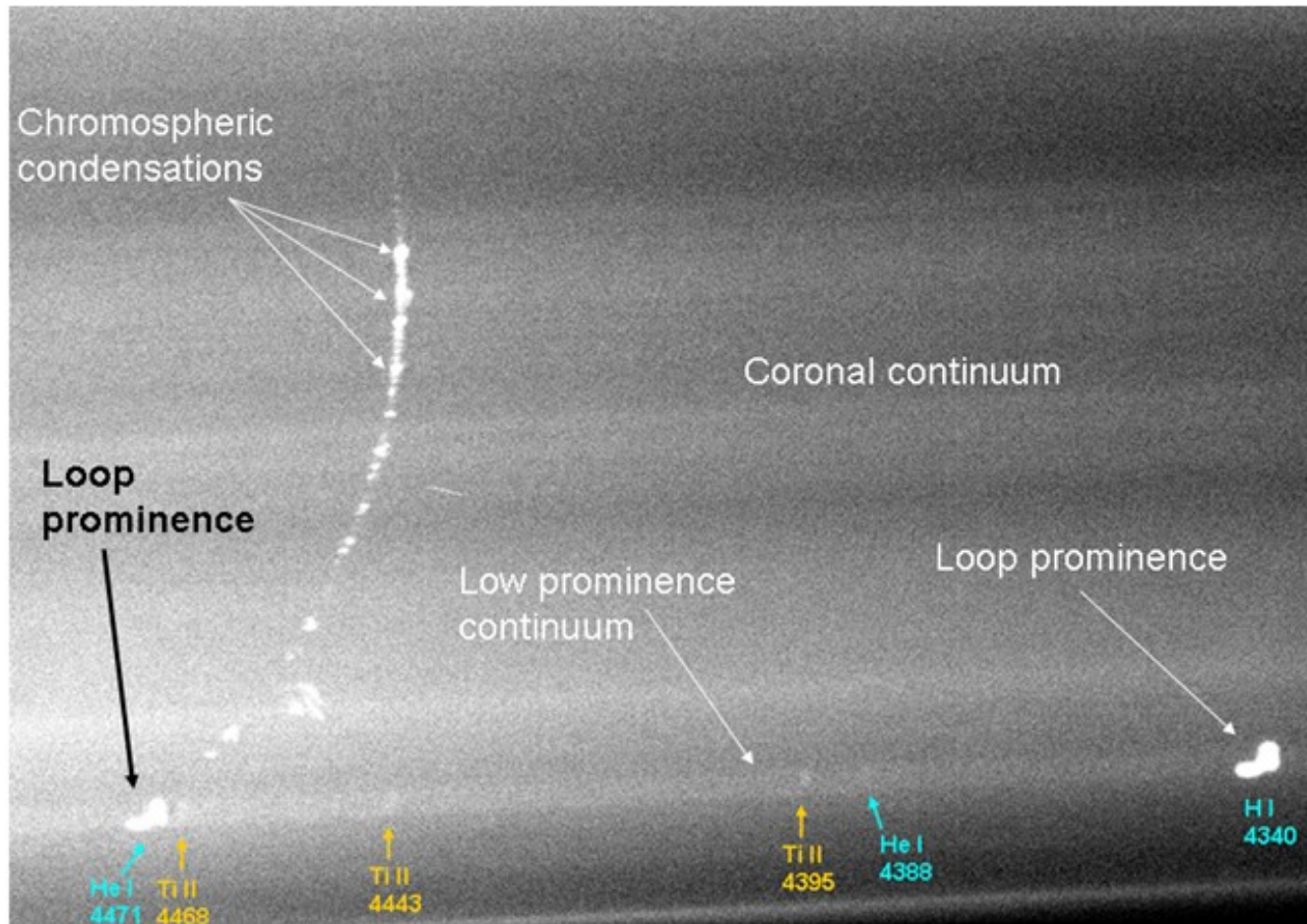
Profils d'intensité relevés et normalisés le long de la même protubérance N°2 dans les raies He I 4713 Å, He II 4686 Å, et Ti II 4571.9 Å en utilisant les spectres éclairs de l'éclipse totale du 11 Juillet 2010

Rapports d'intensité $I_{Ti II} / I_{He I}$ déduits des profils d'intensité
Renforcement du Titane: protubérance observée en émission dans cette raie

L'origine de la surabondance des éléments low FIP pourrait se situer très bas dans l'interface, grâce à un processus privilégiant leur diffusion ambipolaire à travers l'interface

Discussion:

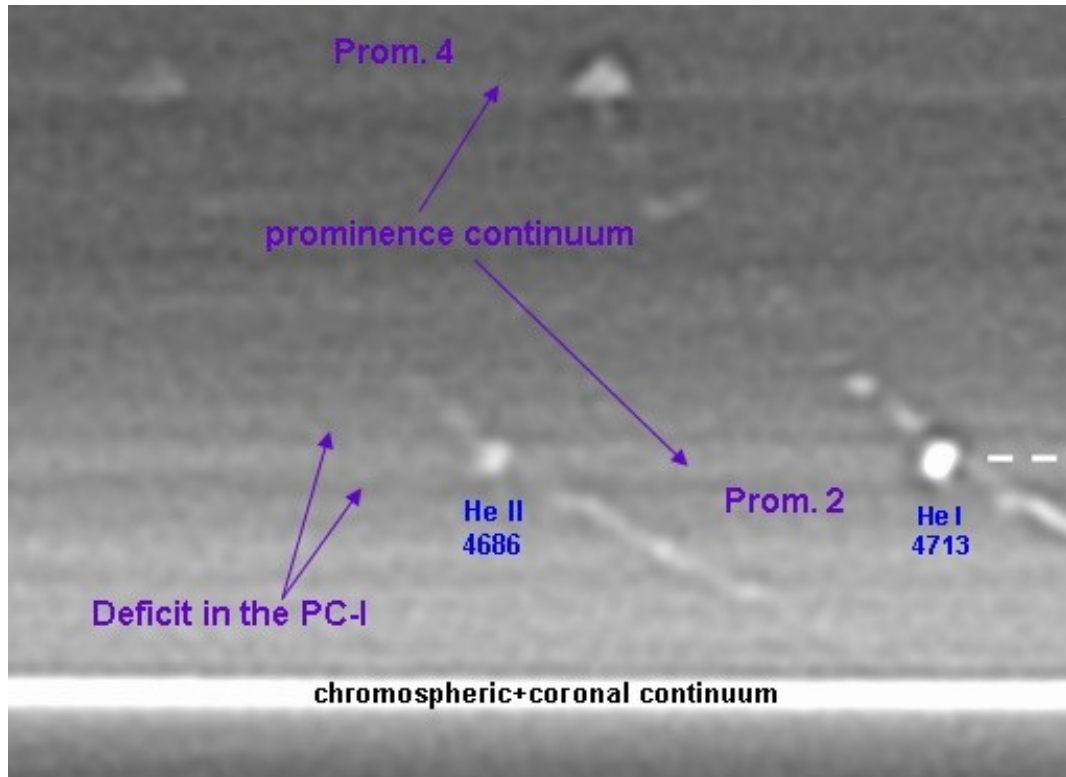
Protubérance « low FIP » et « high FIP » et interfaces Pr-C/I
(avant le 3^{ième} contact de l'éclipse du 22 Juillet 2009)



Identification des images d'une protubérance en boucle observée dans les raies du Ti II, He I et H I. $h \sim 7000$ km (ref bord solaire)

Analyse des protubérances et régions de cavités coronales avec déficit en densité (fin du 2^{ème} contact éclipse du 11 Juillet 2010)

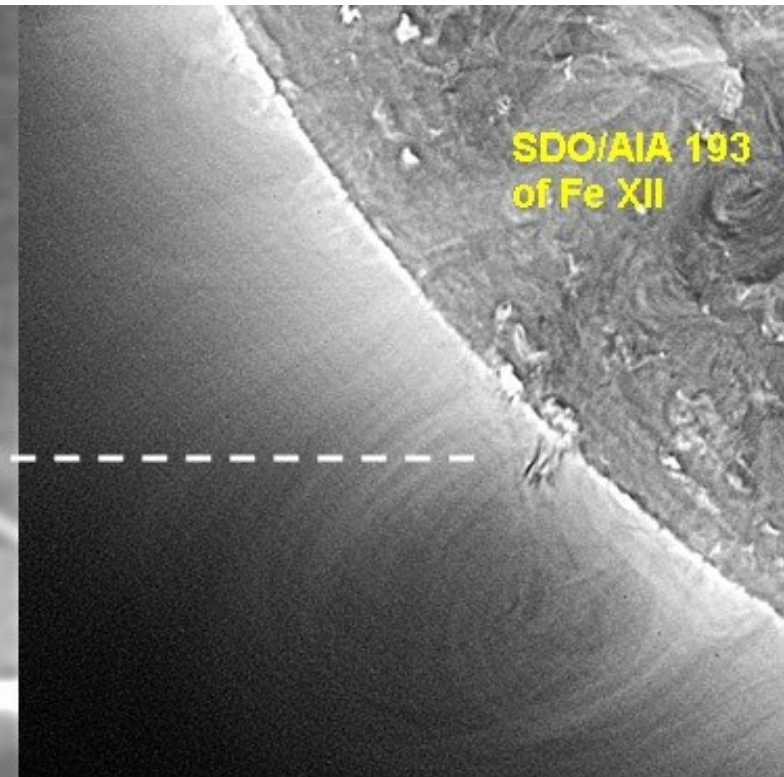
Spectre image agrandie 10X autour des raies
He II 4686 Å, He I 4713 Å et du continu en simultané



*Note: 80 spectres sommés et alignés
après le second contact de l'éclipse totale du 11 Juillet 2010*

Résultats exposés dans
Bazin et al, Solar Physics, 286, Issue 1, (2013)

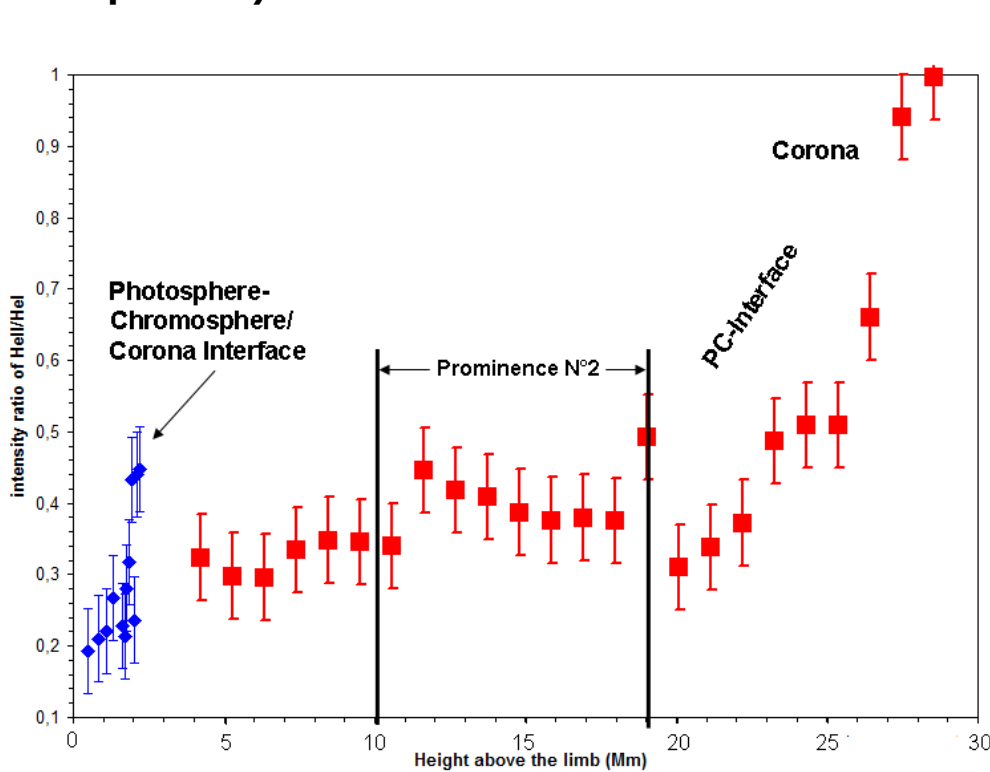
Image SDO/AIA sur la région de la cavité



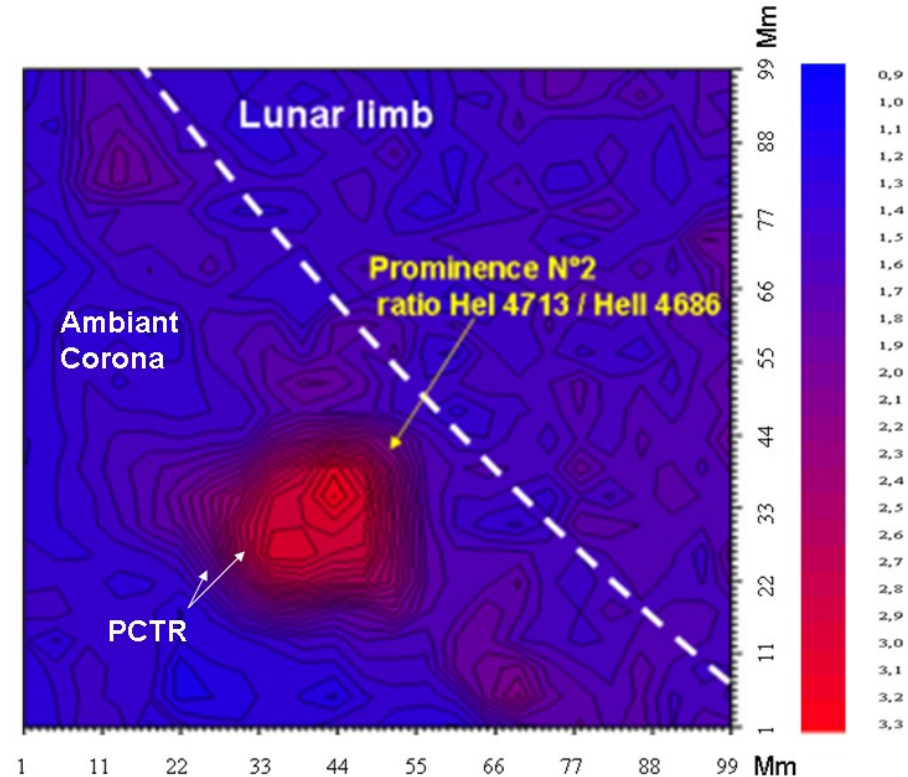
*Note: 12 Images sommées et renforcées
SDO/AIA Fe XII 193 Å (1.5 M K)
montrant des structures torsadées
au centre de la cavité coronale
+ **embrillancement du limbe: enveloppes EUV***

») Analyses des émissions de l'hélium (« high FIP):dans l'interface protubérance-couronne (Pr -C/I

variation des rapports d'intensités (liés aux états d'ionisation et à la température du plasma) en fonction de la distance radiale et cartographie 2D



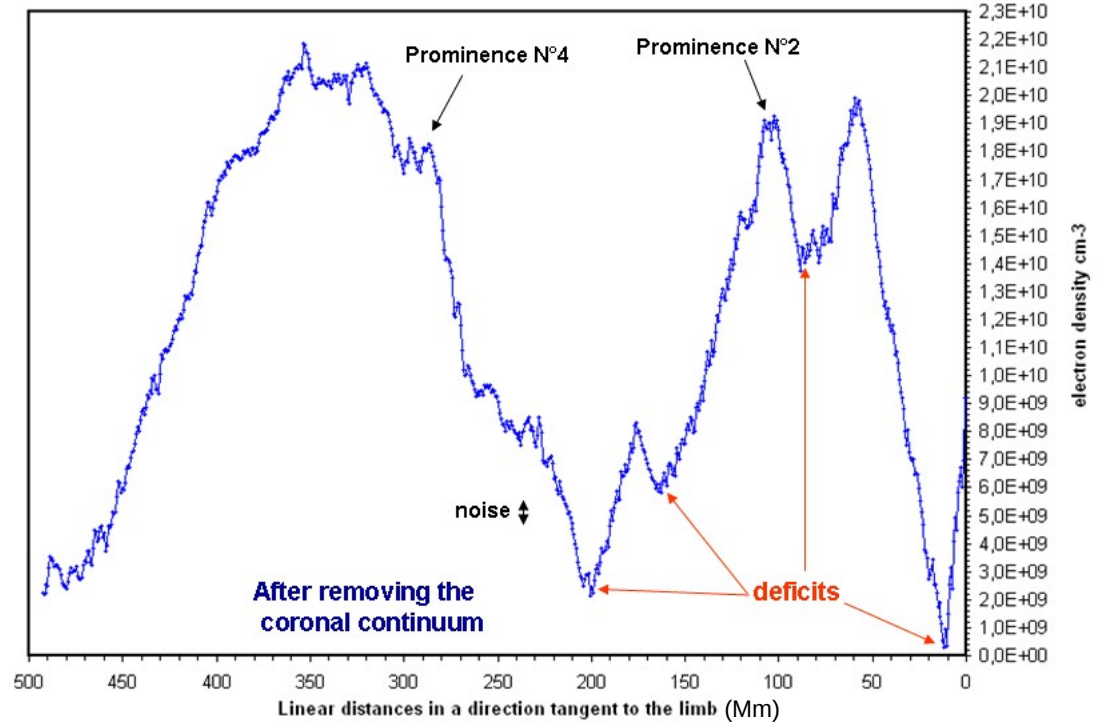
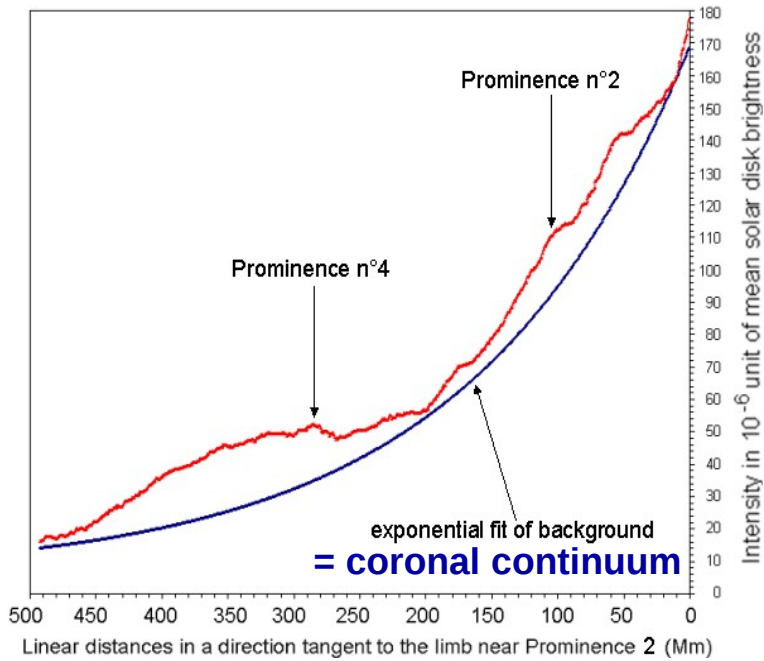
Rapport d'intensité des raies He II 4686 / He I 4713 au-delà du limbe dans une direction radiale et le long de l'interface protubérance-couronne P-CI observée après le 2nd contact: si les valeurs sont comparables, (jusqu'à env. 0.4), les gradients sont très différents



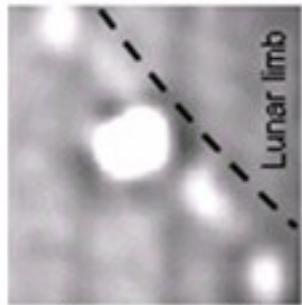
Cartographie 2D des rapports d'intensités He I / He II dans les régions au coeur des protubérances. Comparaison possible car raies()optiquement minces

Discussion des profils d'intensité le long du continu des protubérances

Evaluation des densités électroniques: 10^9 à $2 \cdot 10^{10} \text{ e}^-/\text{cm}^3$

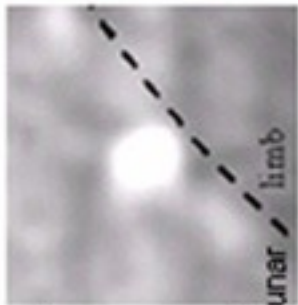


He I 4713 Å



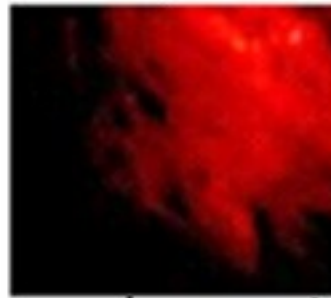
25 Mm

He II Paschen α 4686 Å



25 Mm

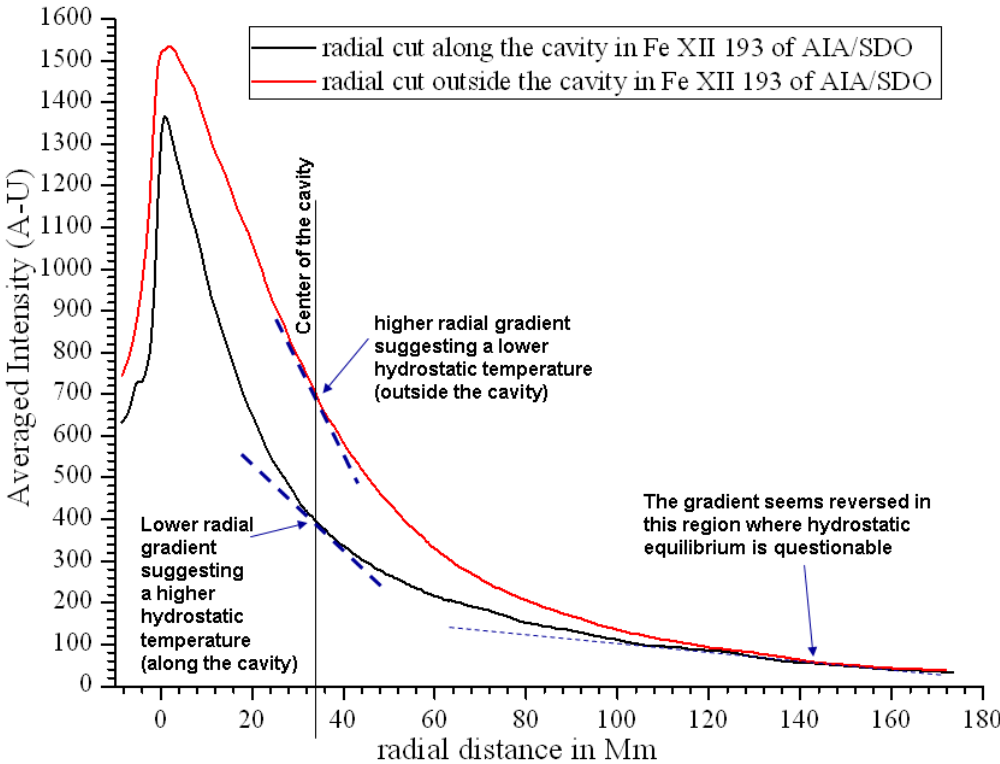
He II Ly α 304 Å



25 Mm

Comparaison des distributions d'intensités sur une protubérance

Tentative d'étendre l'étude de l'interface vers la couronne: cas des protubérances Fe XII à 193 A de SDO/AIA: cavité avec « renforcement » du chauffage



Echelles de hauteur en Ne² pour évaluer T_{hydrostatique}

- H₁=18 Mm (fit exp. 1^{er} ordre) en dehors de la cavité
- H₂= 9 Mm (fit exp. 2nd ordre) le long de la cavité
- H₃= 90 Mm (fit exp. 2nd ordre) le long de la cavité

Differential Emission Measure

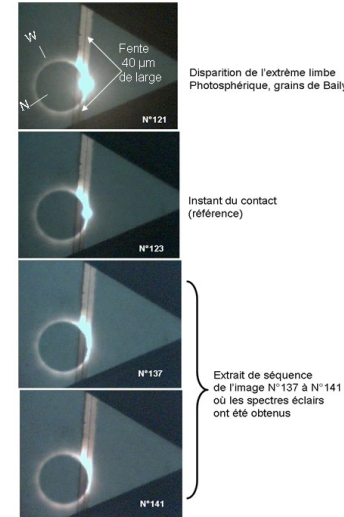
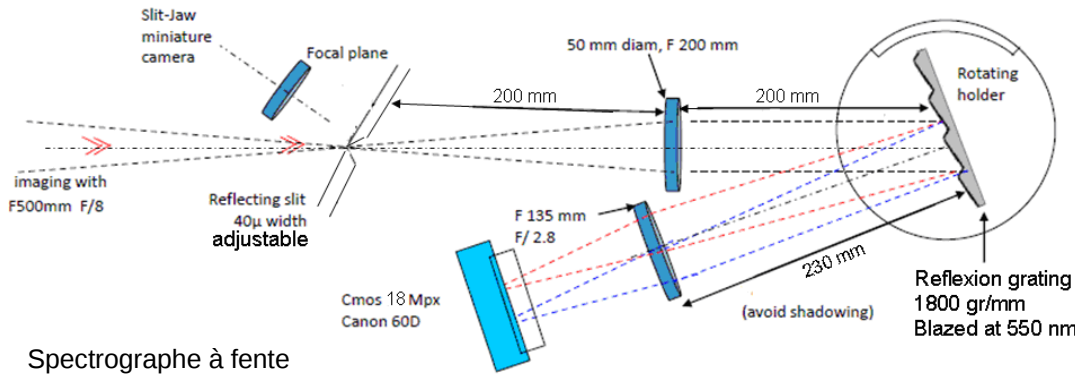
$$DEM = N_e^2 \frac{dh}{dT}$$

L'analyse suggère un chauffage intense dans les parties supérieures de la cavité car les gradients de densité deviennent très bas (T_{hydrostatique} associée très élevée)

Bazin, Koutchmy, Lamy, Tavabi

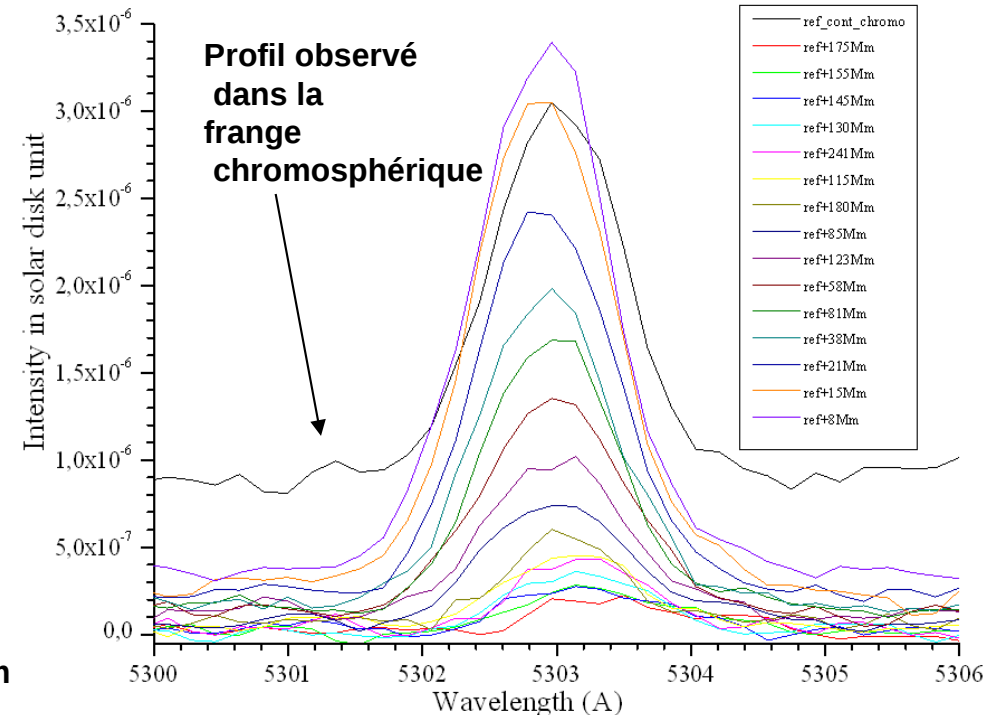
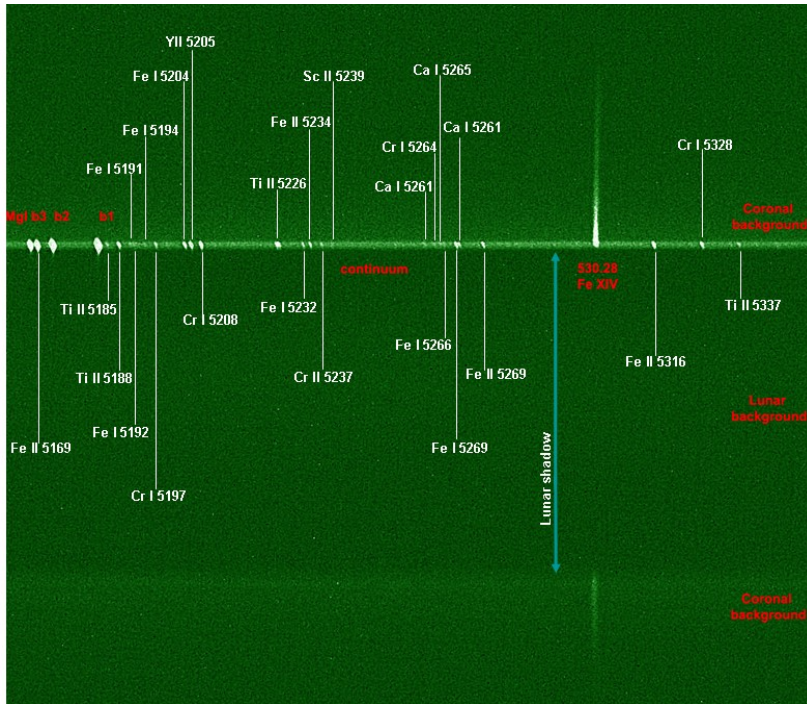
→IAU Symposium N°300 10-14 Juin 2013 : « Prominences and their role in space weather »

Analyse de l'interface Ph-C/I vers la couronne solaire à l'aide d'un spectrographe à fente (éclipse du 13 Novembre 2012)



Images "slit-jaw" position de la fente (disque solaire occulté)

Spectrographe à fente
S. Koutchmy, J. Certain éclipse du 13 Nov. 2013 Australie

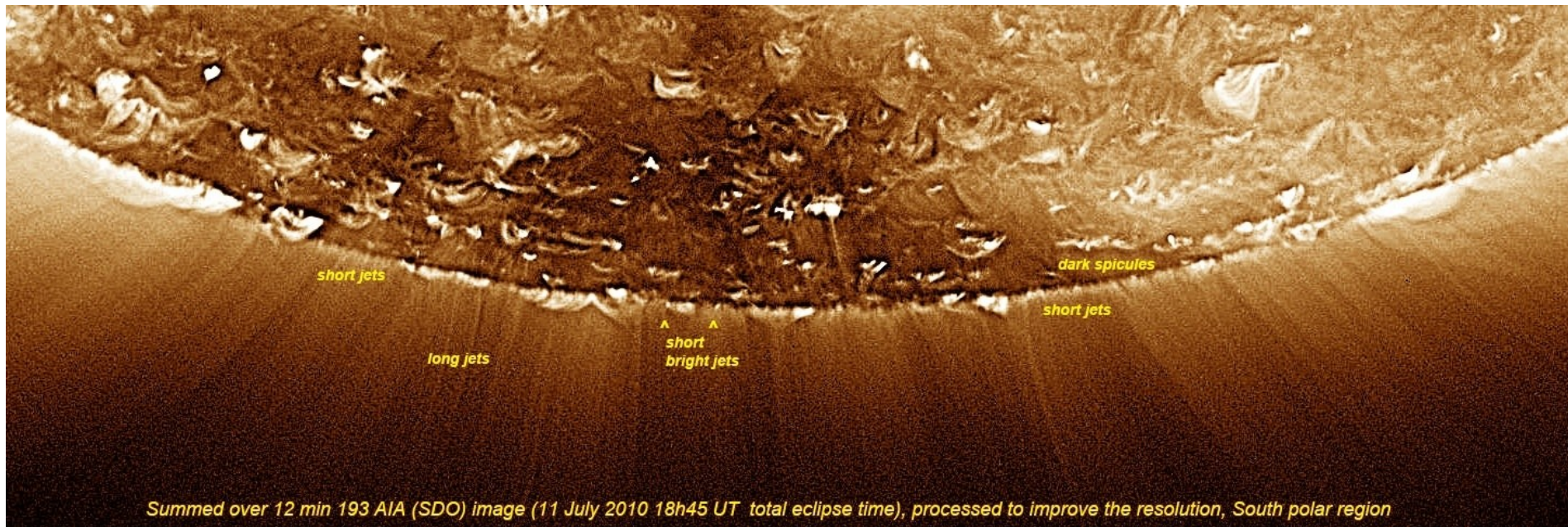


Profils transverses dans la raie du Fe XIV 5303

Emission de la raie coronale du Fe XIV 5303 jusqu'à qq Mm (aussi bas que les "low FIP"). 4 spectres/s

Imagerie EUV (Fe XII) à haute résolution:

Vue nouvelle (AIA/SDO) de la basse couronne (T ~ 1.5 MK) et de l'interface Ph-C/I



Limbe solaire à 193 Å dans le trou coronal observé à l'éclipse de 2010

Sommation de 12 images pour améliorer le rapport signal sur bruit, et déconvolution.

Spicules vus en absorption, plus haut: jets et boucles en émission

La très basse couronne est structurée à l'extrême, mais il est impossible de proposer un modèle statique: tout est dynamique et aux éclipses, seul un instantané est réalisé: c'est une limitation importante dans les observations d'éclipses

Résultats principaux

- Mise en évidence du rôle de la myriade de petites raies d'émission dans la définition ancienne du bord solaire et donc du diamètre. Grâce aux observations d'éclipses sans lumière parasite: mesures plus précises par chronodation des courbes de lumière du vrai continu; utilisation de profils lunaires plus précis (Kaguya).
- Courbes de lumière et calculs d'inversion des intégrales d'Abel pour déduire les émissivités des couches et les échelles de hauteur (décroissance exponentielle).
- Photométrie des enveloppes d'hélium et étude de leurs extensions: seconde enveloppe He II 4686.
- Interface photosphère- couronne visualisée sur les images en Extrême UV et étude de l'interface protubérance- couronne.
- Structuration de la très basse couronne révélée par les spectres à fente radiale et les images EUV de SDO/AIA

d'où:

- Meilleure compréhension de la structuration des couches profondes de l'atmosphère solaire, par comparaison des courbes de lumière de différentes raies (« low FIP » et « high FIP »), et rôle du champ magnétique pour expliquer la surabondance des éléments « low FIP »
- Analogie des interfaces photosphère-chromosphère et protubérance- couronne
- Application au problème du chauffage

Conclusions

- Les spectres éclairs sans fente et sans lumière parasite permettent de diagnostiquer les gradients de densité, les structurations dans les différentes couches montrant une interface complexe
- Les émissions des raies « low FIP » observées dans les protubérances montrent des similitudes avec l'interface photosphère -chromosphère –couronne
- La surabondance des éléments « low FIP » de la couronne solaire provient des basses couches
- Le phénomène d'enveloppes chromosphériques est lié à l'influence du rayonnement XUV de la couronne solaire (photo-ionisation) et/ou à l'effet d'électrons rapides.

Publications dans des revues internationales

- Bazin, C, Koutchmy, S. and Tavabi, E. *Prominence Cavity Regions Observed using SWAP174 A filtergrams and simultaneous eclipse flash spectra*, Topical Issue of **Solar physics**, **286**, Issue 1, (2013) 255-270
- Bazin, C, Koutchmy, S.:2013, *Helium shells and faint emission lines from slitless flash spectra* in **Journal of Advanced Research** **4**, Issue 3, 307- 313
- Bazin, C., Koutchmy, S., Tavabi, E.:2010, *The HeI and He II chromospheric shells and the transition region*, Solar Wind and Space Environment Interaction, In: Hady, H., Damé, L. (Eds.). Cairo University Press, Proceedings of the **IAGA II** symposium, doi:10.1012/S120027852004, 19- 26
- Koutchmy S., Bazin C., Prado J-Y., Lamy Ph., Rocher P. *The variation of the solar diameter and irradiance : Eclipse observation of July 11, 2010*, **MTPR 10**, International Conference, Cairo, invited keynote lecture, Conference Proceedings, Lotfia El Nadi Ed.
- Sigismondi, C. Raponi, A. Bazin, C. and Nugent, R.:2012, *Towards a Unified Definition of Solar Limb during Central Eclipses and Daily Transits* in **International Journal of Modern Physics**: Conference Series, **12**, issue 1, 405- 413
- Bazin, C. Koutchmy, S. Lamy, P., Tavabi, E. Weiller, S. 2013 “*Observation of the prominence cavity region using eclipse slitless flash spectra and space borne EUV filtergrams*, **IAUS-300 Proceedings**, in « Nature of prominences and their role in space weather », Malherbe & Schmieder Ed.

Merci

pour votre attention

Calcul de la densité électronique dans le continu entre les protus

He II 4686 et He I 4713

- Éclipse totale du 11 Juillet 2010
- Continu coronal et background soustrait
- Longueur d'intégration de la protu prise à $L = 10000$ km
- Facteur de dilution

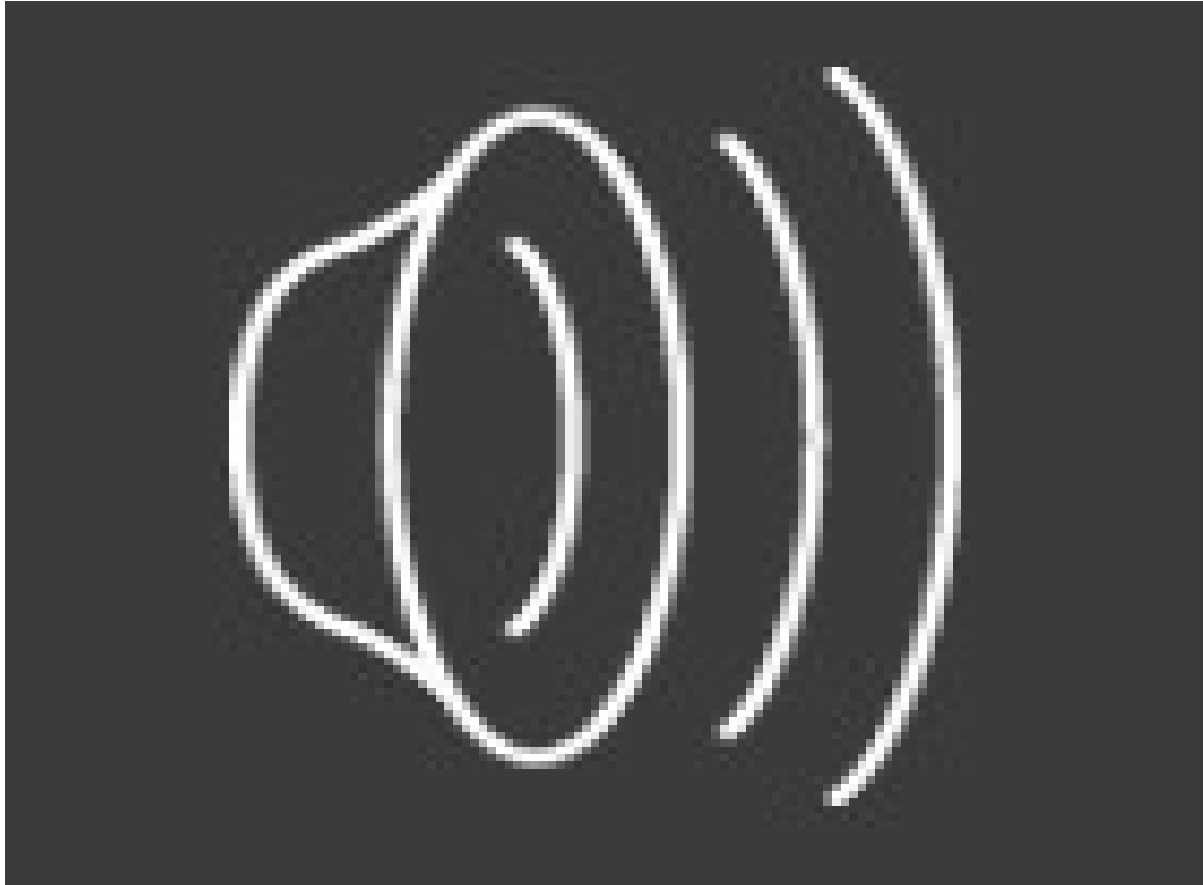
$$W(r) = I(\theta) * [1 - (1 - R_{\text{sol}}^2 / r^2)^{1/2}] \quad (\text{November-Koutchmy 1996})$$

$$I(\theta) = 0.02 + 0.98 \cos(\theta) - 0.19 \cos^2(\theta) \quad (\text{cf Allen 1973, p171})$$

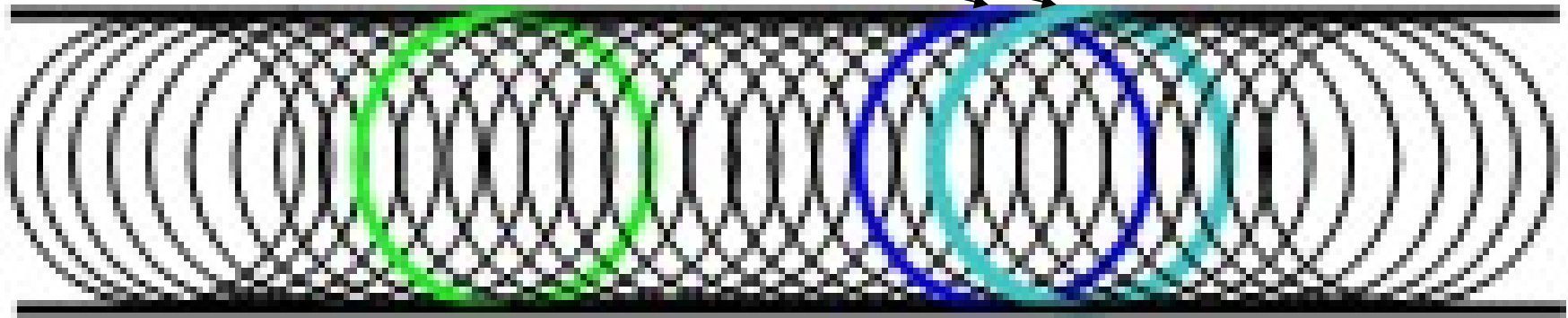
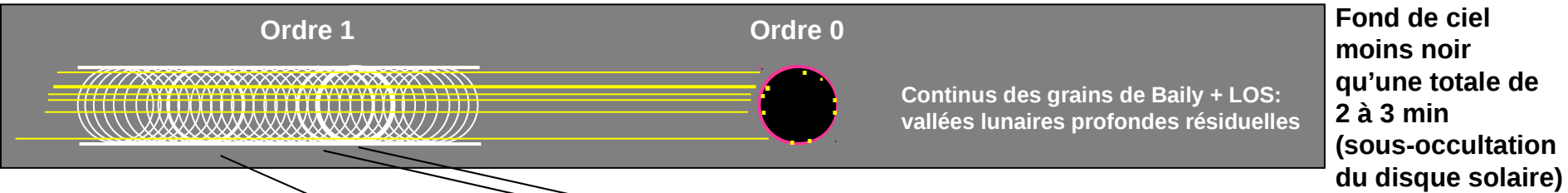
pour $\lambda = 470$ nm, $r > R_{\text{sol}}$

- (d'après Schlowski 1965) : La protu est à $h = 10000$ km $\Rightarrow W(10000) = 0.4$
- $\Sigma e^- = 1.2 * 10^{24}$ (moyenne dans l'espace sans tenir compte de la polarisation)
- $N_e(h) = (B(h) / B_{\text{sol}}) / (2 * 0.4 * 1.2 * 10^{24} * 10^9)$
- $B / B_{\text{sol}} = f(h)$ est la courbe de lumière initiale

Exemple de séquence extraite du spectre éclair au 2nd contact de 2008



**“Pseudo-simulation” éclipse perlée, durée 15 +/- 5 s en Ouganda 3 Nov. 2013:
raies low FIP et high FIP en anneaux**

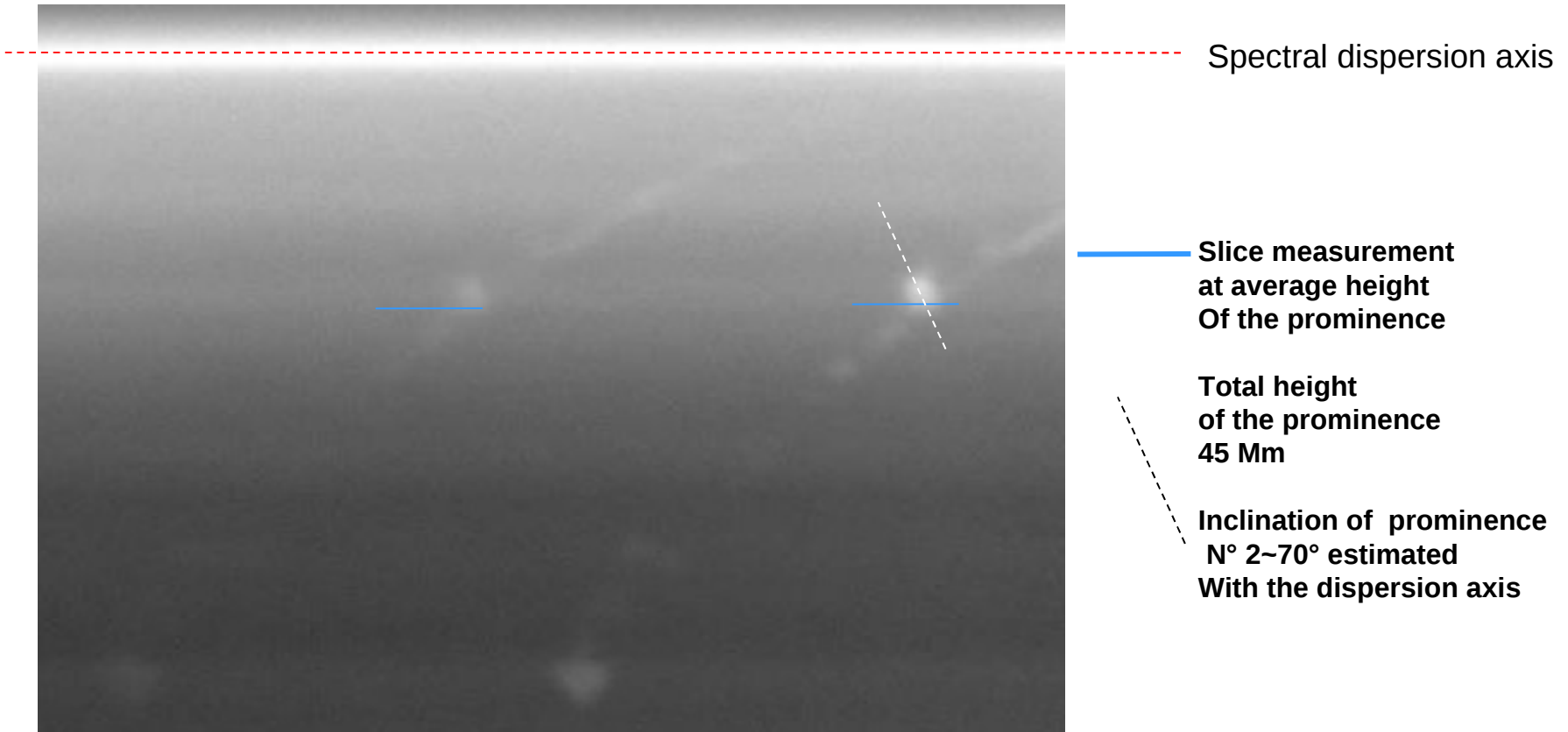


Fe II 4629 He II 4686 He I 4713

Myriade de raies d'émission en anneaux

- Mesures des diamètres des atmosphères “low FIP” et high FIP
=> Pour déduire des diamètres solaires dans chaque raie + chronodotation
- Continus des protubérances ?
- Conditions d'éclipse différentes, mais même instrument utilisé
- Etude des enveloppes d'hélium optiquement minces jusqu'aux régions polaires

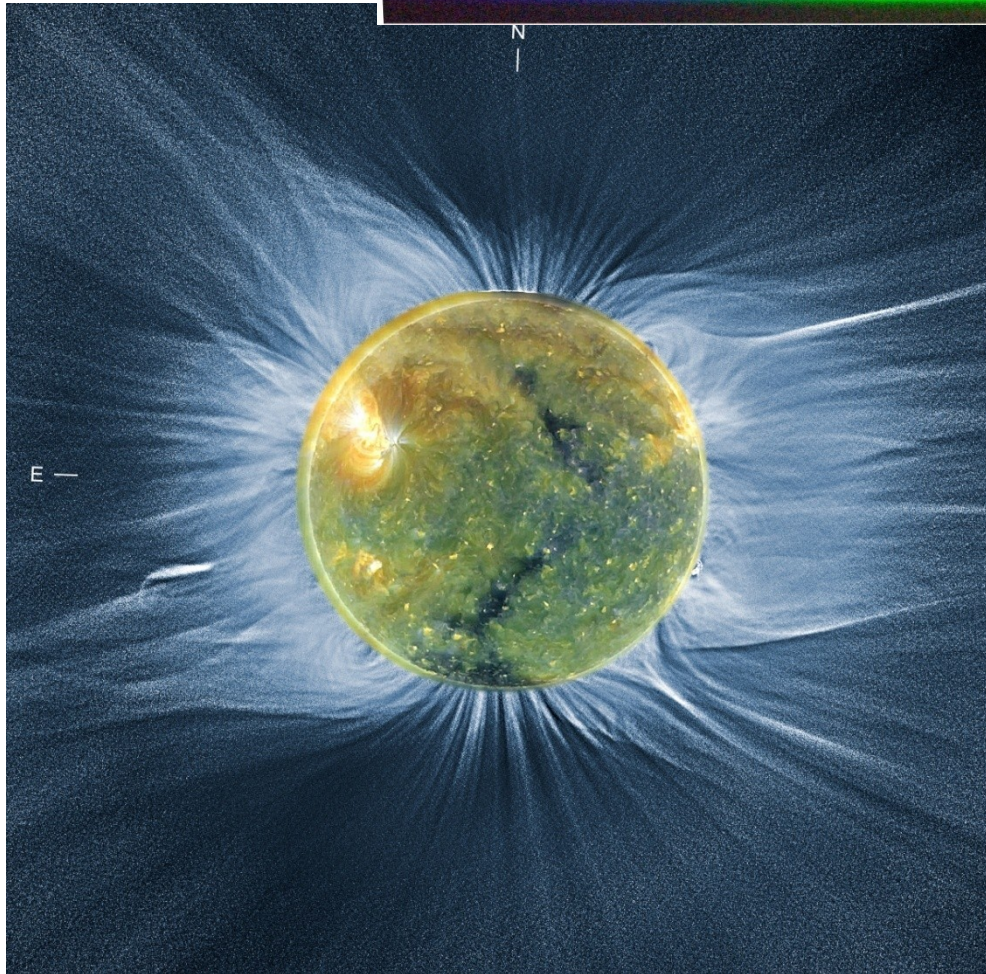
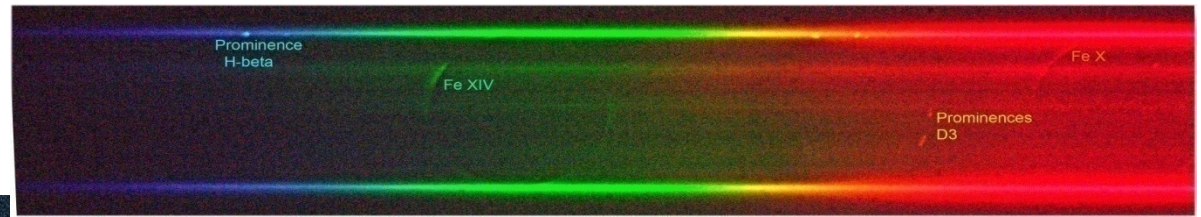
Prominence location where the profiles were taken : (from July, 11th 2010 eclipse)



Intensity scale : 1 adu = 0,823. 10^{-6} solar disk units

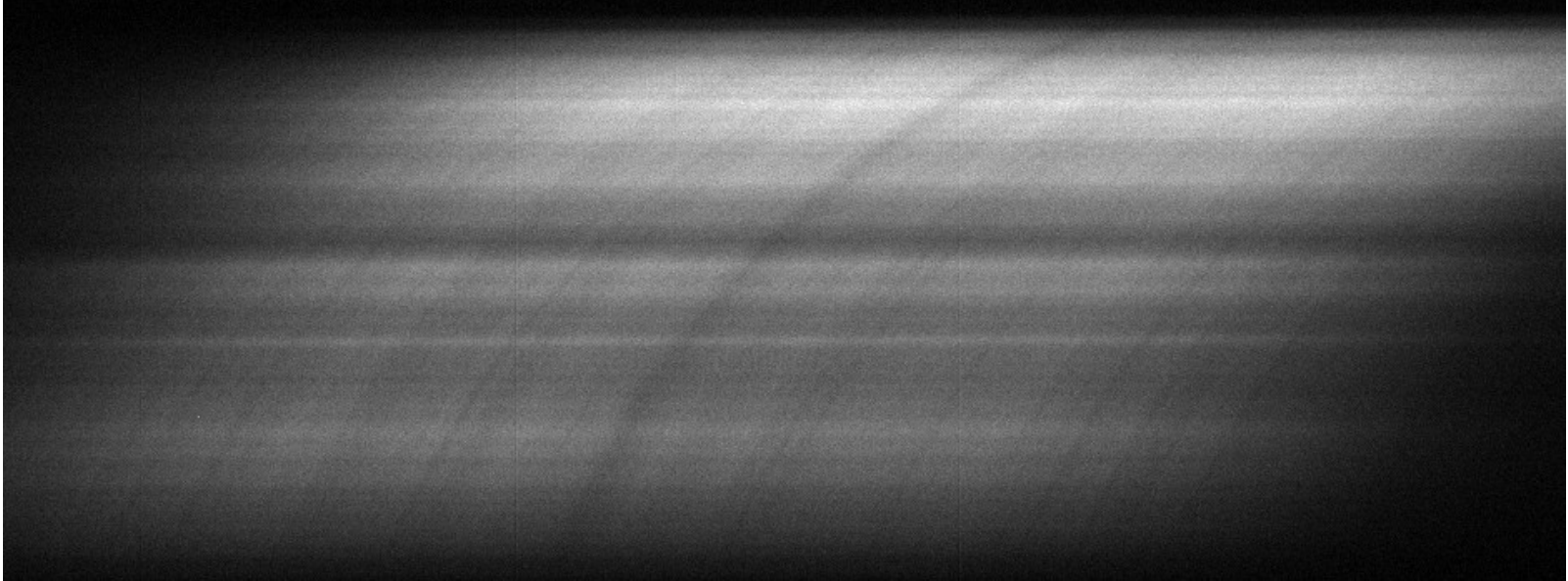
After calibration on the continuum in single frames and averaging (removable filter)

Coronal
slitless spectrum
(from S. Kuzin)

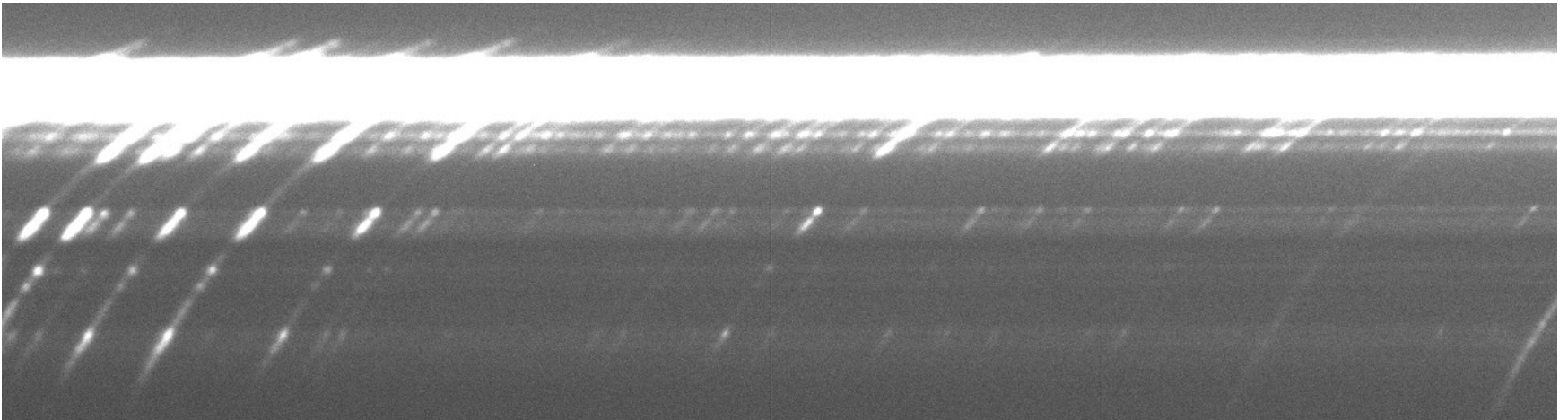


Reconstructed coronal
Image (from J. Mouette)

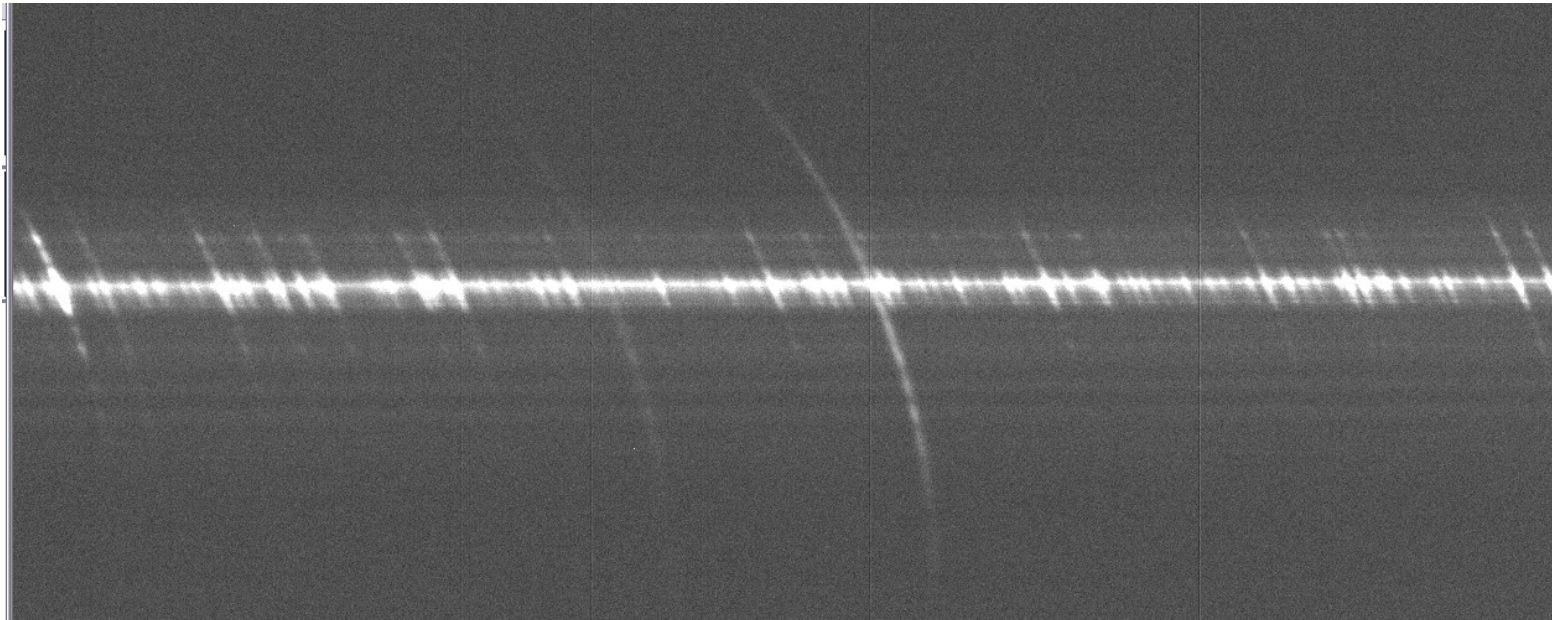
Total solar eclipse
of 11 July 2010
Hao, French Polynesie



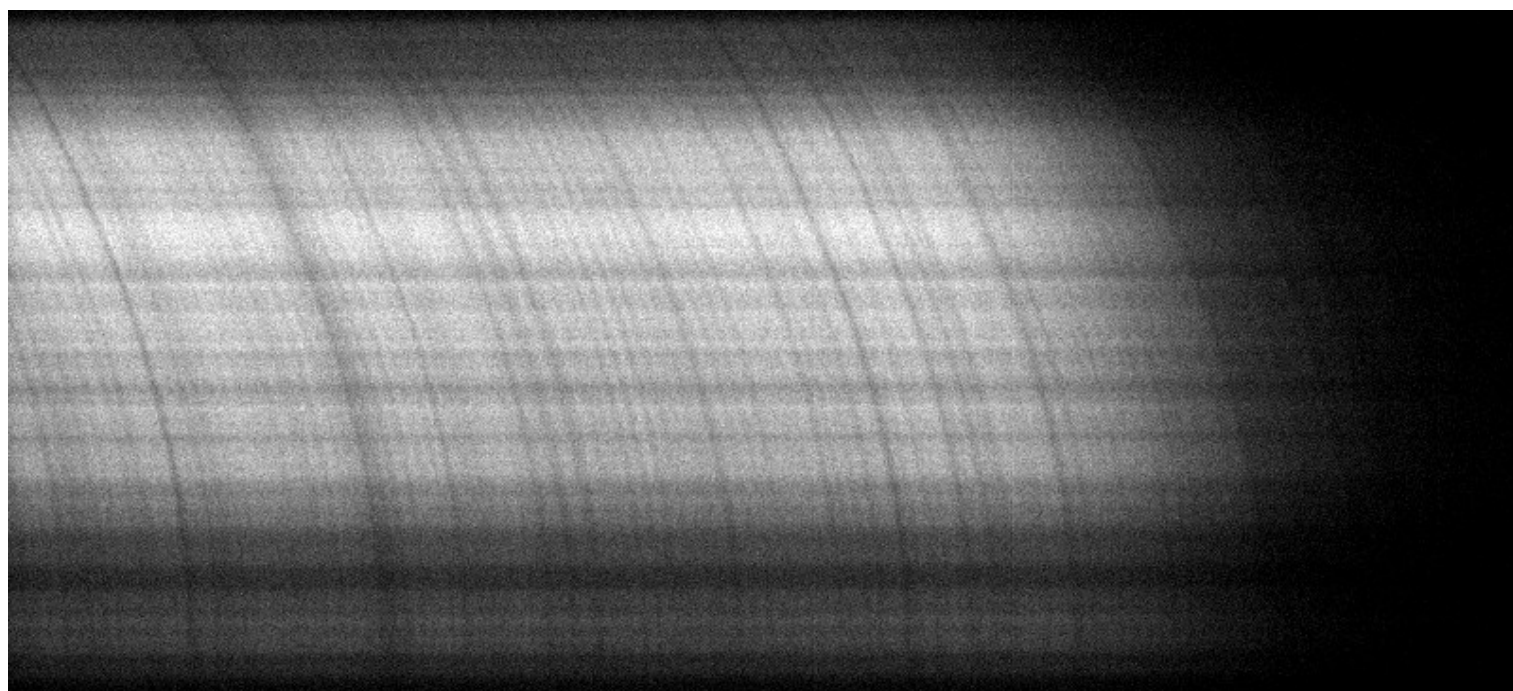
Avant éjection C2 eclipse 11 Juillet 2010 (frame 2599)



Frame 2790 après éjection filtres, à C2



Somme 5120-5125



5310 après C3

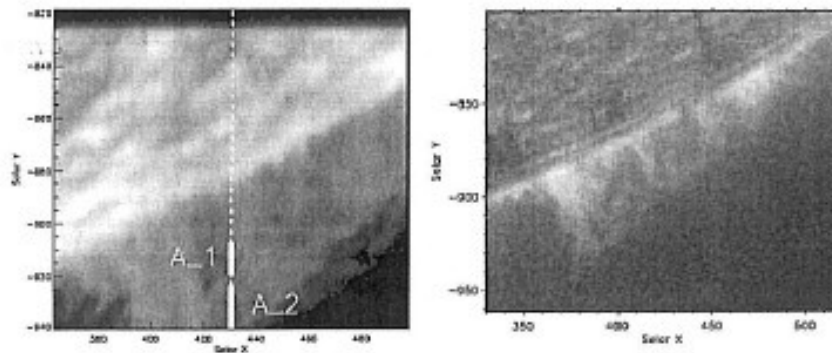


Fig. 1. Left: H-Lyman β image of the prominence obtained by rastering the area with the SUMER slit. The position of the spectrometer slit used is marked at the centre of the raster by the dashed line. The two white thick segments, named A_1 and A_2, mark the two portions of the slit used for the present analysis (see text). Right: the same prominence, but on a different scale, in a Big-Bear Solar Observatory H- α image obtained on 8 October 1999. On this image we can see the whole extent of the feature.

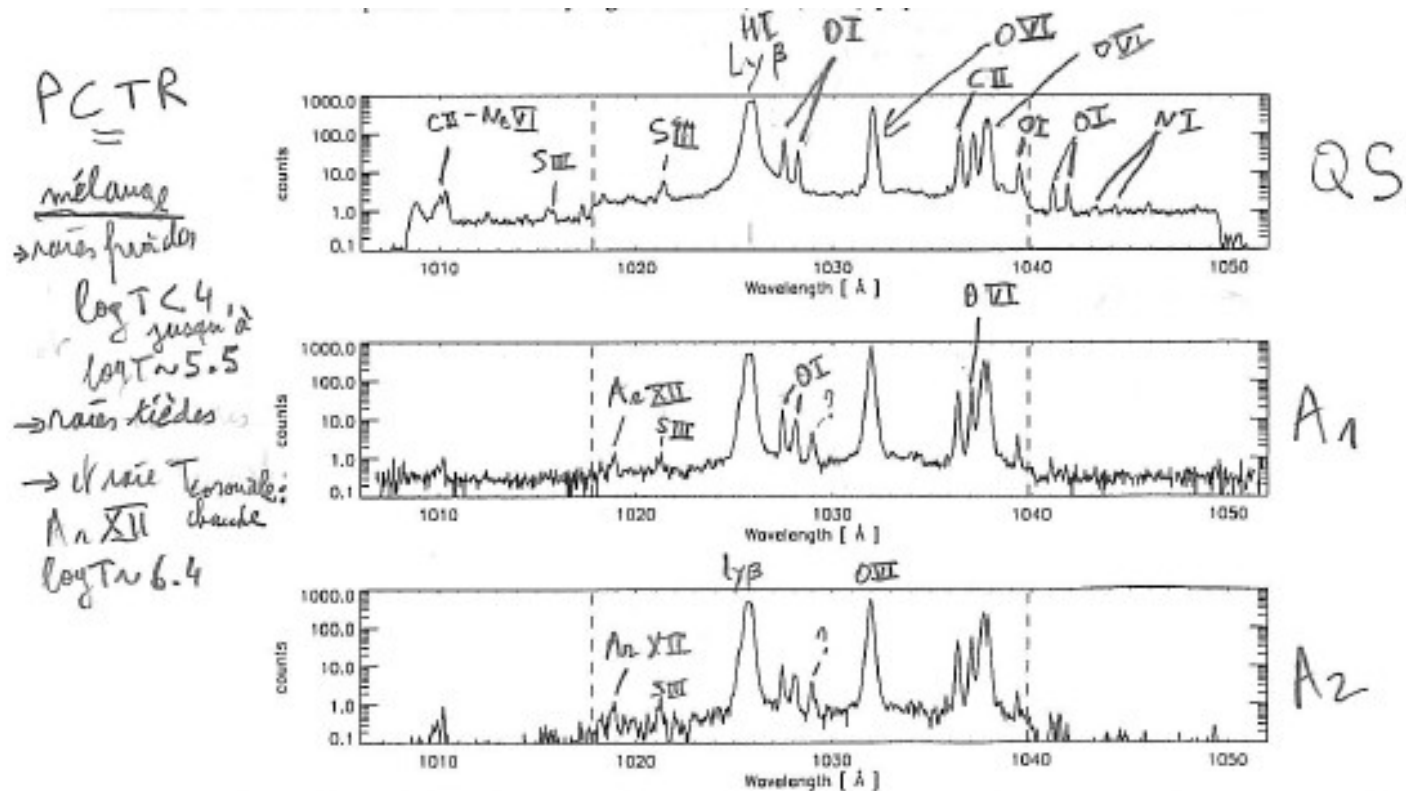
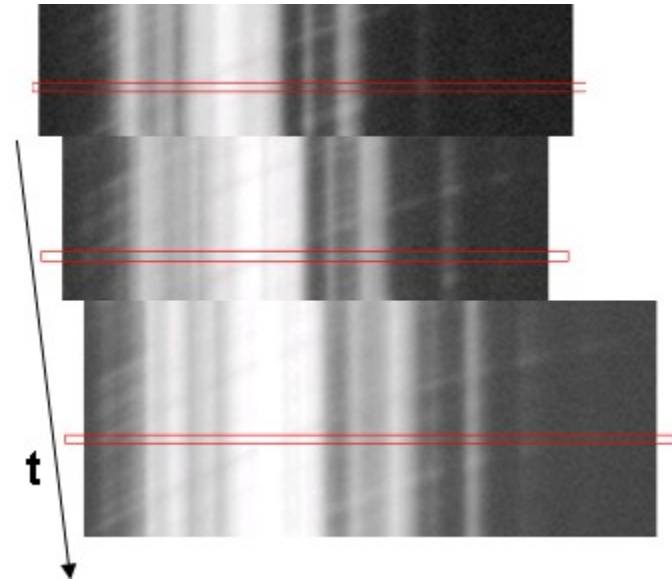
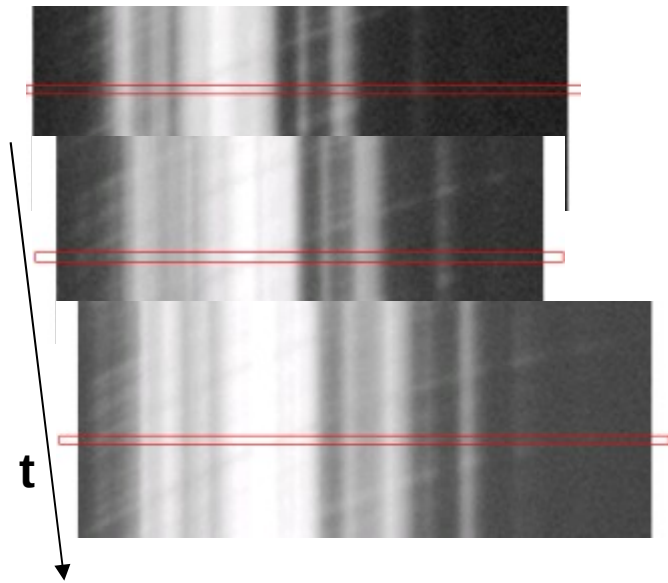
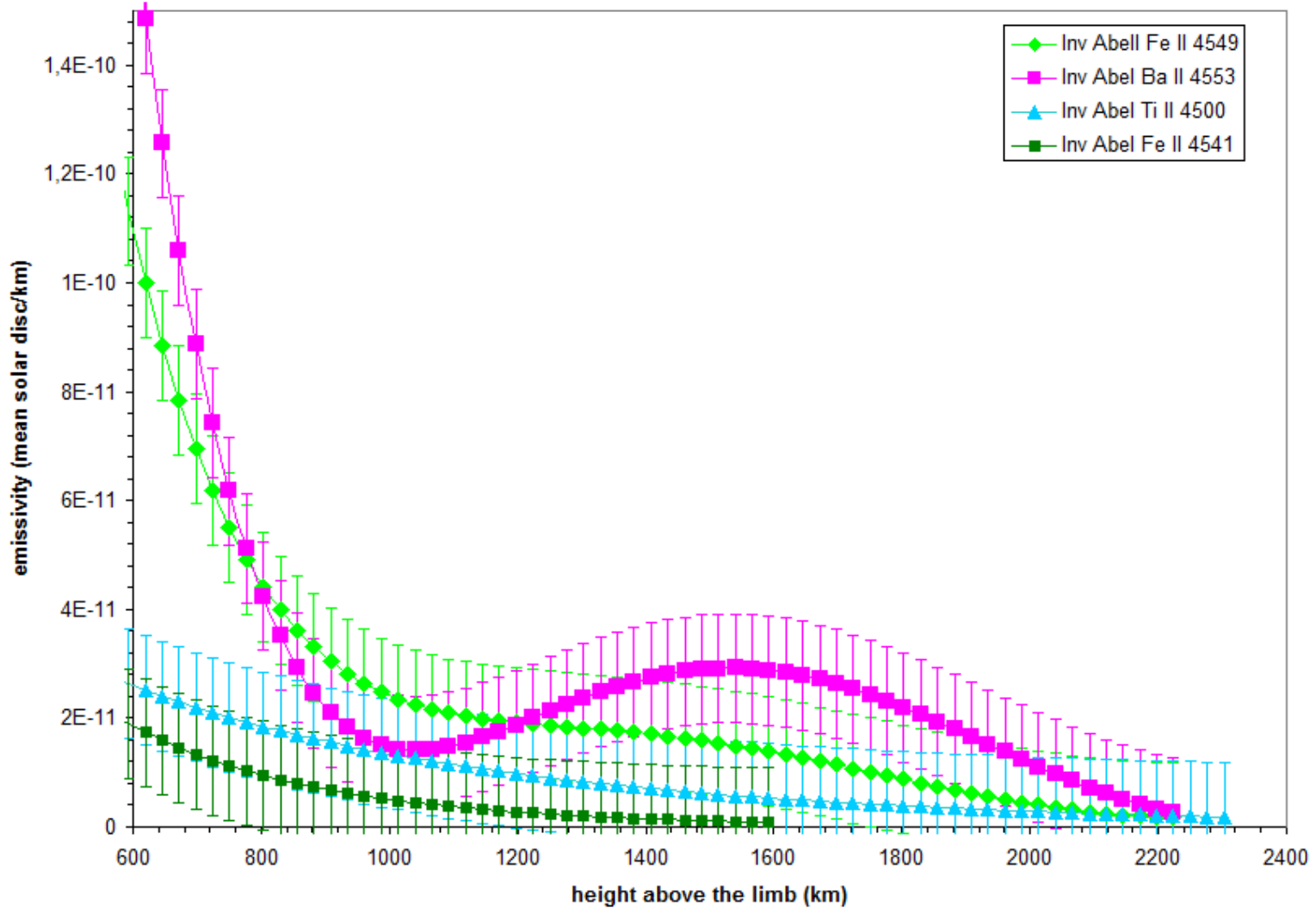


Fig. 2. Example of a 45 Å wide window of SUMER averaged spectra. Top panel: QS data; second panel: prominence data over the slit section A_1; third panel: averaged prominence data over the slit section A_2. The vertical dashed lines limit the central KBr part of the detector (Wilhelm et al., 1995).

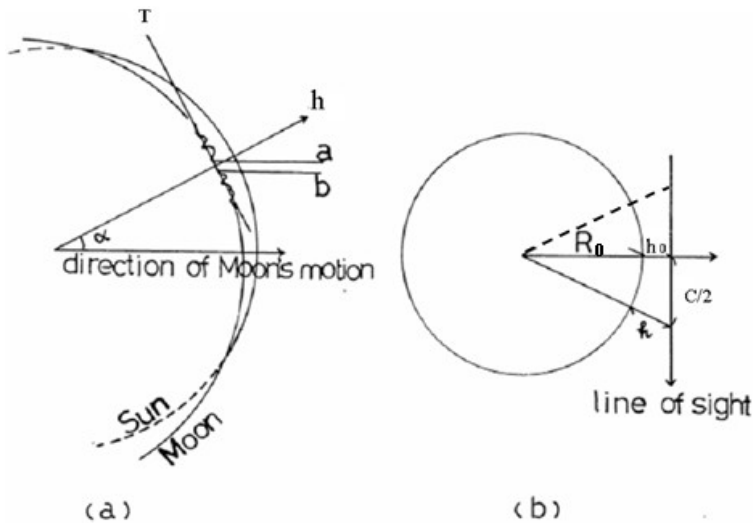


III-1) 22th July 2009 eclipse in China : spectral lines at the 2nd contact



Emissivités des raies Fe II, Ti II, Ba II C2 du 22 Juillet 2009

Calculs d'intégrale d'Abel, échelles de hauteurs



(a) Eclipse geometry. (b) The coordinate system used for discussions of eclipse data.

$$C = \sqrt{(R_0^2 - (R_0 - h)^2)} = \sqrt{2R_0h - h^2} \text{ or } h \ll R_0, C \sim \sqrt{2R_0h}$$

Où R_0 est le rayon solaire pris à 696 Mm

h est la hauteur de mesure pris au dessus du limbe solaire au dessus de la référence h_0 du bord solaire prise à $\tau_{5000} = 1$

Il faut ensuite effectuer le calcul de la dérivée des flux par rapport à la hauteur pour l'inclure dans le calcul d'inversion afin d'utiliser l'expression suivante :

$$E(h) = \int_{h_0}^{\infty} \frac{\frac{dI(h')}{dh'}}{2 * \sqrt{(R_0^2 - (R_0 - h')^2)}} dh' \sim \int_{h_0}^{\infty} \frac{\frac{dI(h')}{dh'}}{2\sqrt{2R_0h'}} dh'$$

La quantité $\frac{dI(h)}{dh}$ permet de donner une bonne approximation des émissivités ou brillances.

Calculs d'intégrale d'Abel, échelles de hauteurs

L'intégration est effectuée par une approximation avec la méthode des rectangles sur les tableaux de valeurs de rangs i à $i+1$:

$$(Y_{i+1} - Y_i) * (X_{i+1} - X_i)$$

Où Y_i représente la valeur $\frac{dI(h)}{2 * \sqrt{(R_0^2 - (R_0 - h)^2)}}$ et X_i est l'altitude $R_0 - h$ en km et le pas i est donné pour chaque spectre.

De façon analogue, la dérivation est réalisée de la manière suivante : $(Y_{i+1} - Y_i) / (X_{i+1} - X_i)$

	A	B	C	D	E	F	G
1	height (km) C3	He I 4713 C3	derr He I 4713 C3	Abel He I 4713 C3	He II 4686 C3	derr He II C3	Abel He II C3
2	2130	21.4803	0.064086066	=C2*(A2-A3)/(2*(696000*2-(696000-A2)*2)*0.5)			
3	2008	29.2988	0.100536932	0.000167464	6.8309	0.013560795	2.2588
4	1832	46.9933	0.220482716	0.000176943	9.2176	0.0127006173	0.0001
5	1751	64.8524	0.026186364	4.67056E-05	19.5051	0.017769318	3.1699
6	1575	69.4612	0.113797531	9.84858E-05	16.3777	0.034545679	2.9899
7	1494	78.6788	0.263664815	0.00015619	13.5795	0.001524074	9.0289
8	1440	64.4409	0.117097987	0.000389906	13.4972	0.019884564	6.6219
9	1142	99.3361	0.122941975	0.000124934	19.4228	0.018268889	1.8586
10	1061	89.3778	0.170621951	0.000182099	20.9042	0.061223171	6.5341
11	979	75.3868	0.117861728	0.000129351	15.8839	0.04877037	5.3524
12	898	84.9336	0.001016049		19.8343	0.028449383	3.2599
13	817	84.8513	0.101369512	0.000123279	17.5299	0.02709878	3.2966
14	735	76.539	0.103637037	0.000218761	19.752	0.022556296	4.7612
15	600	90.53	0.3106825	0.000430106	16.7069	0.0473225	6.5512
16	520	115.3846			20.4927	0.020791579	7.3429
17	330	123.1208	0.373093333	0.002872608	24.4431	0.07407	

C2 à CN représente la colonne de la dérivée des intensités par la hauteur, c'est-à-dire $\frac{dI(h)}{dh}$

Où le numéro de la ligne de la colonne varie de 2 à N

Calculs d'intégrale d'Abel, échelles de hauteurs

Application aux décroissances exponentielles

Intensité des raies à la hauteur h

$$I = I_0 e^{-\beta h}$$

h' hauteur d'un point arbitraire sur la ligne de visée

s la distance comptée sur cette ligne

R rayon solaire

$$s^2 = (R+h')^2 - (R+h)^2 \sim 2R(h-h') \quad (\text{chromosphère faible devant } R)$$

$$I(h) = \int_{-\infty}^{\infty} \varepsilon(h') ds = \sqrt{2\pi R} \int_h^{\infty} \frac{\varepsilon(h') dh'}{\sqrt{h'-h}} \quad \text{Intégrale d'Abel}$$

La solution est :

$$\varepsilon(h) = - \frac{1}{\pi\sqrt{2\pi R}} \frac{d}{dh} \int_h^{\infty} \frac{i(h') dh'}{\sqrt{h'-h}} \Rightarrow \varepsilon(h) = \varepsilon(0) e^{-\beta h} \quad \text{où } \varepsilon(0) = I_0 \sqrt{\frac{\beta}{2\pi R}}$$

Coefficient d'émission de toute raie à une hauteur h quelconque

Avec β échelle de hauteur prise à la valeur $I = \frac{I_0}{e}$

et déduite des courbes de lumière dans les raies d'après les observations

Sobolev, 1990
Wildt, R. 1947

L'inversion d'intégrale d'Abel d'une décroissance exponentielle
Conserve le terme d'échelles

Echelle hydrostatique de hauteur

Potentiel gravitationnel $\varepsilon = - \frac{GM_{\odot}m}{r}$ ($G = 6.67 \cdot 10^{-8} \text{ Newton} \cdot \text{cm}^2 \text{ g}^{-2}$, $M_{\odot} = 1.989 \cdot 10^{23} \text{ g}$, m masse d'une particule dans la couronne).

$$F = mg_{\odot} \Rightarrow g_{\odot} = \frac{GM_{\odot}}{R_{\odot}^2} = 274 \text{ ms}^{-2}$$

$$\varepsilon_{\text{grav}} \textcircled{\otimes} = -mg_{\odot} \left(\frac{R_{\odot}^2}{r} \right)$$

$$\text{Force de gravité} = F_{\text{grav}}(r) = - \frac{d\varepsilon_{\text{grav}}(r)}{dr} = -mg_{\odot} \left(\frac{R_{\odot}^2}{r^2} \right)$$

La pression p est définie comme une force par unité d'aire dA (dimension Newtons $\times \text{cm}^{-2}$).

Le gradient de pression $\frac{dp}{dr} = \frac{F}{dA \times dr} = \frac{F}{dV}$ peut être exprimé comme le produit d'une force

avec la densité de particules n (cm^{-3}) $\Rightarrow \frac{dp}{dr} = F \cdot n$. Il est possible de déduire l'équilibre de pression ou l'équation du moment en multipliant la force $F_{\text{grav}}(r)$ par la densité de particules n .

$$\frac{dp}{dr}(r) = \frac{dp_{\text{grav}}(r)}{dr} = F_{\text{grav}}(r) \times n(r) = -mn(r)g_{\odot} \left(\frac{R_{\odot}^2}{r^2} \right)$$

En physique des plasmas, et dynamique des fluides, $\rho = mn$ (densité de masse) :

$m(g)$ est la masse moyenne de particules, et n (cm^{-3}) est la densité de particules. Pour un gaz totalement ionisé, comme la couronne solaire, la densité de masse est composée de la densité électronique N_e et la densité d'ions N_i . $\rho = mn = m_e N_e + m_i N_i \sim \mu m_H N_e$, avec μ

poils moléculaire moyen de l'ion, m_H masse de l'hydrogène. On néglige m_e

$\mu = 1$ pour H et $\mu = 4$ pour He

$$\frac{dp}{dr}(r) = - \mu m_H N_e(r) g_{\odot} \left(\frac{R_{\odot}^2}{r^2} \right)$$

Echelle hydrostatique de hauteur

Or $p = nk_B T$ (pression coronale, additionner pression des e- et pression des ions, en faisant l'hypothèse que la densité électronique et densité ioniques égales, $N_e = N_i$)

D'où, $p(r) = 2 N_e(r) k_B T_e(r)$

La densité électronique N_e peut être remplacée dans l'équation du moment (gaz parfaits)

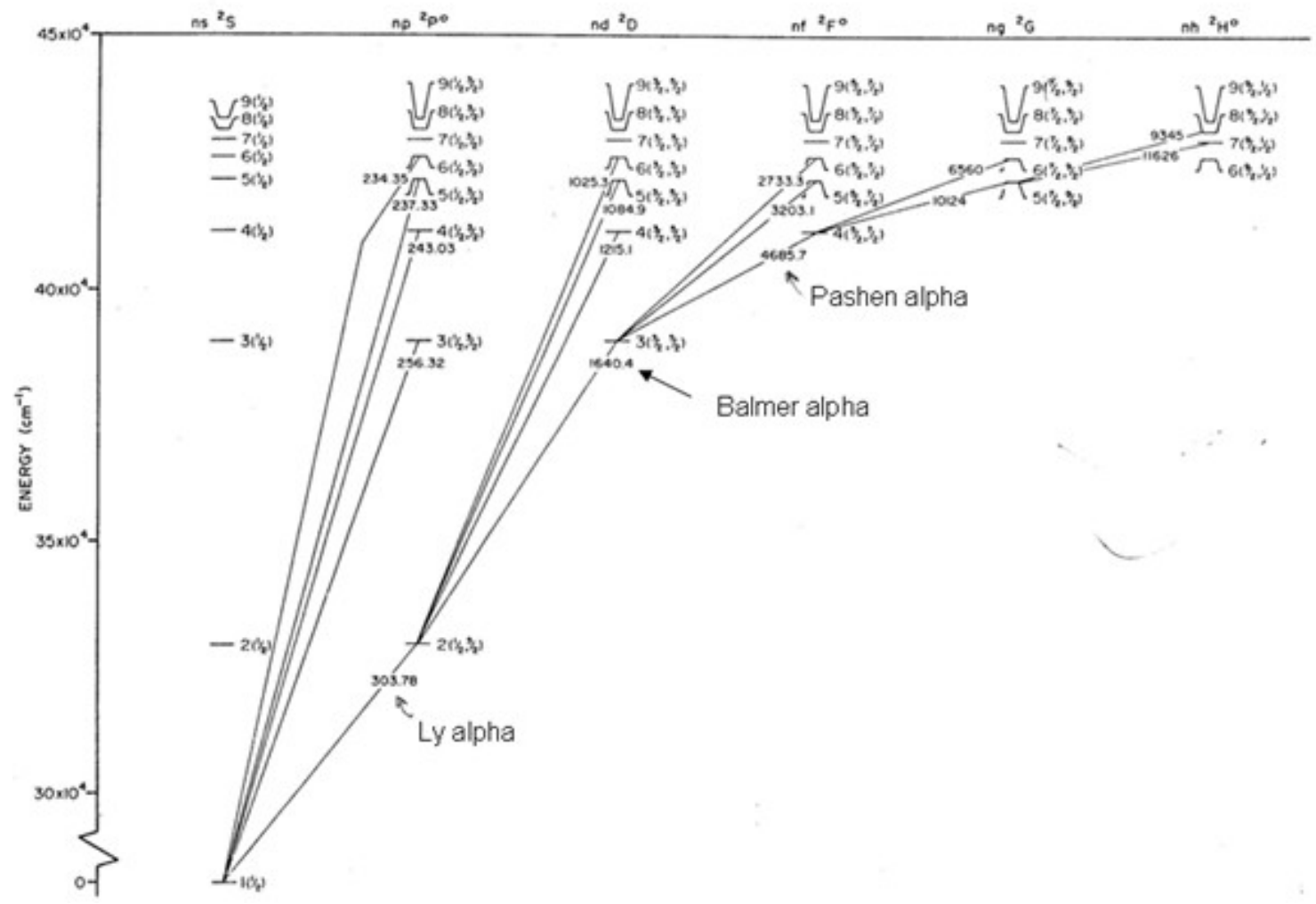
$$\frac{dp}{dr}(r) = -p(r) \frac{\mu m_H g_\odot}{2k_B T_e(r)} \left(\frac{R_\odot^2}{r^2} \right)$$

Avec $h = r - R_\odot$

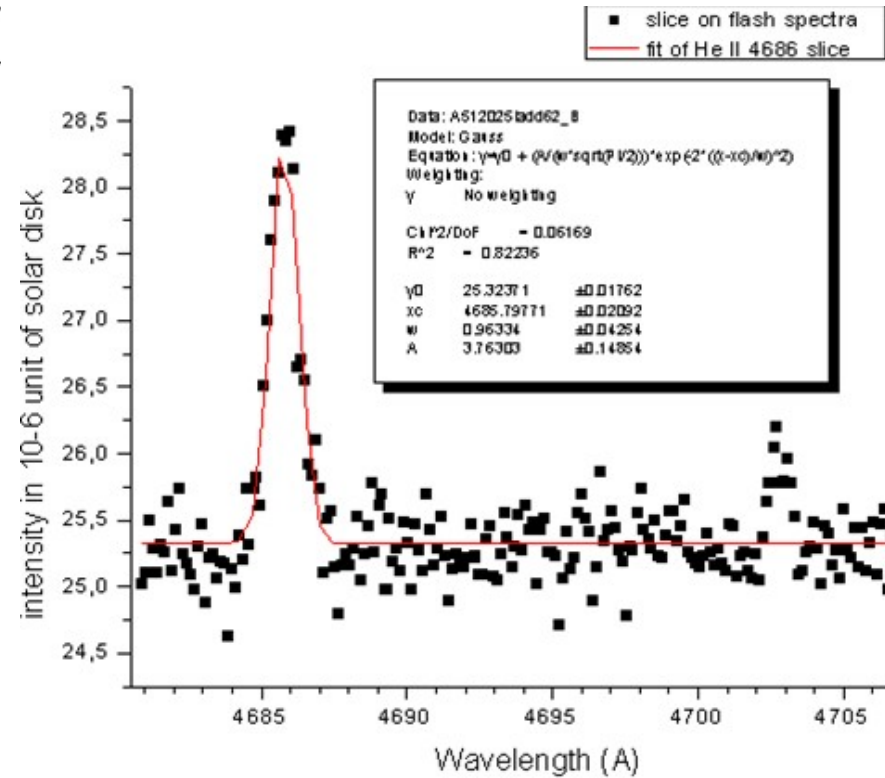
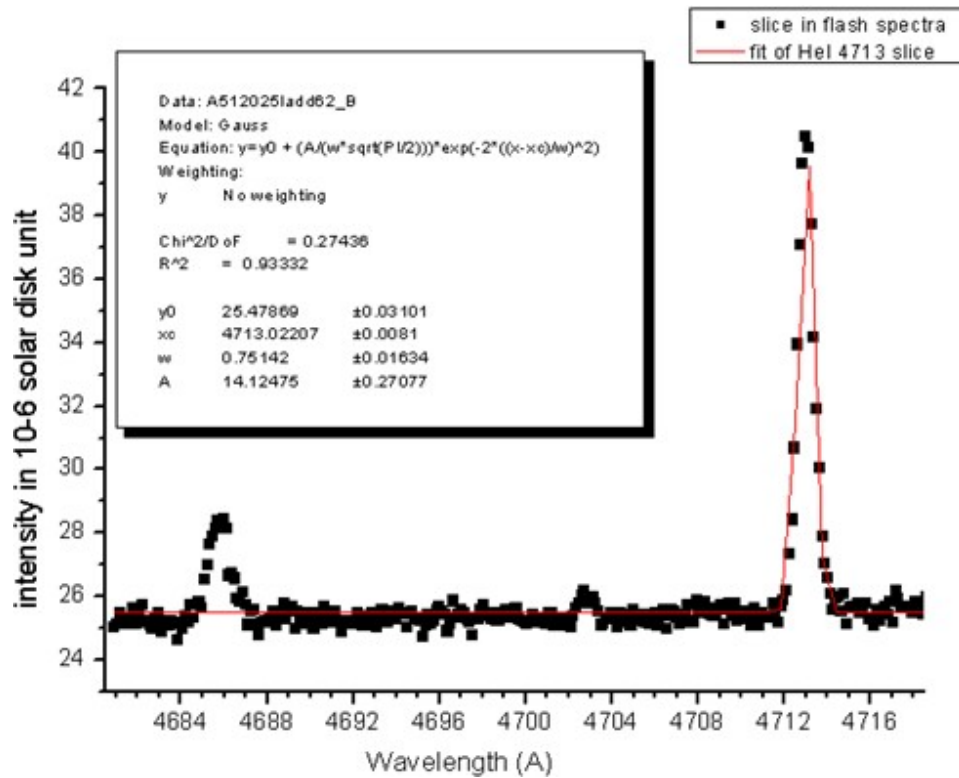
$$\frac{dp}{dh}(h) = -p(h) \frac{\mu m_H g_\odot}{2k_B T_e(h)} \left(1 + \frac{h}{R_\odot} \right)^{-2} \Rightarrow \lambda_p(T_e) = \frac{2k_B T_e}{\mu m_H g_\odot} \sim 47 * 10^9 \left(\frac{T_e}{1MK} \right) = 47 \text{ Mm/1MK}$$

$$P(h) = p_0 \exp \left[- \frac{(h - h_0)}{\lambda_p(T_e) \left(1 + \frac{h}{R_\odot} \right)} \right]$$

He II GROTRIAN DIAGRAM (1 electron, Z=2)
(HI sequence, Configuration: n1)



profils des raies de He I 4713 et He II 4686 avec un spectrographe sans fente



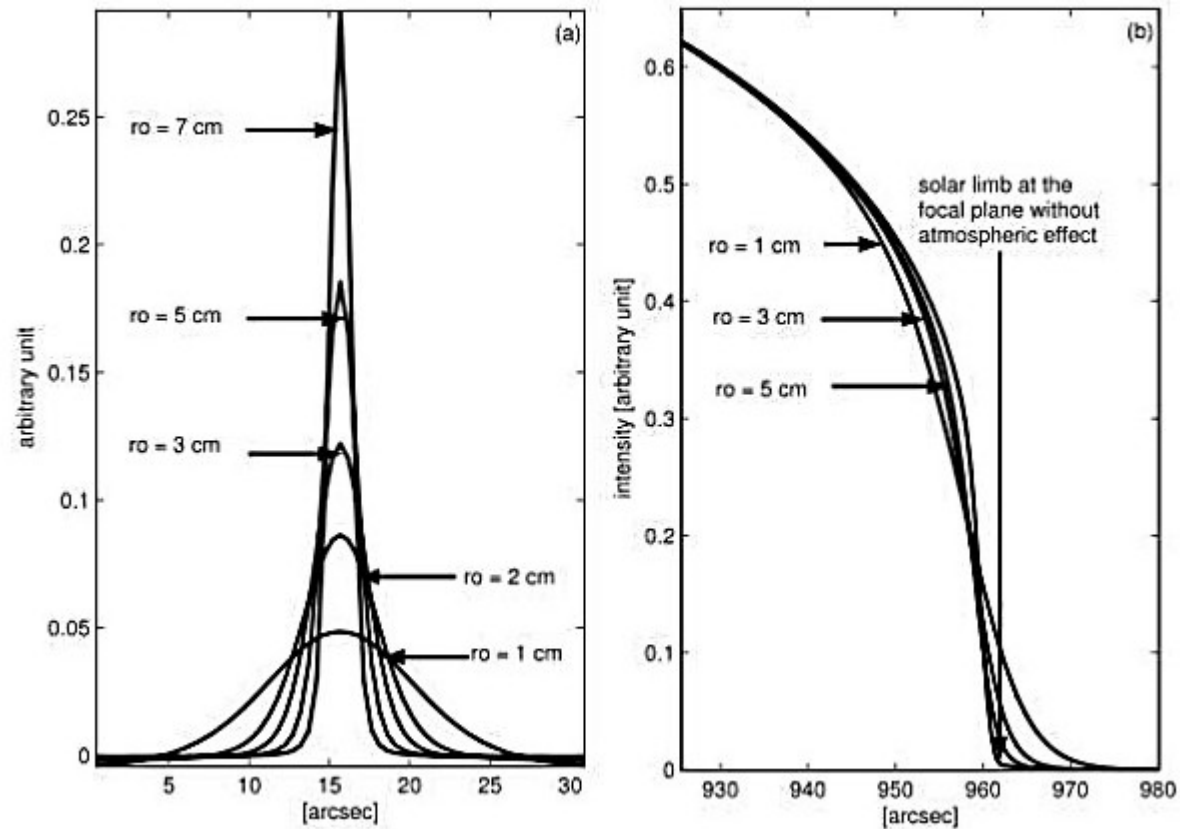


Figure 6: (a) PSF for several values of Fried's parameter r_0 according to the Kolmogorov turbulence model, through a telescope having the instrumental characteristics of the DORaySol instrument; (b) effect of atmospheric turbulence on the solar limb. From Djafer, et al. [5].

Djafer et al 2008 ApJ

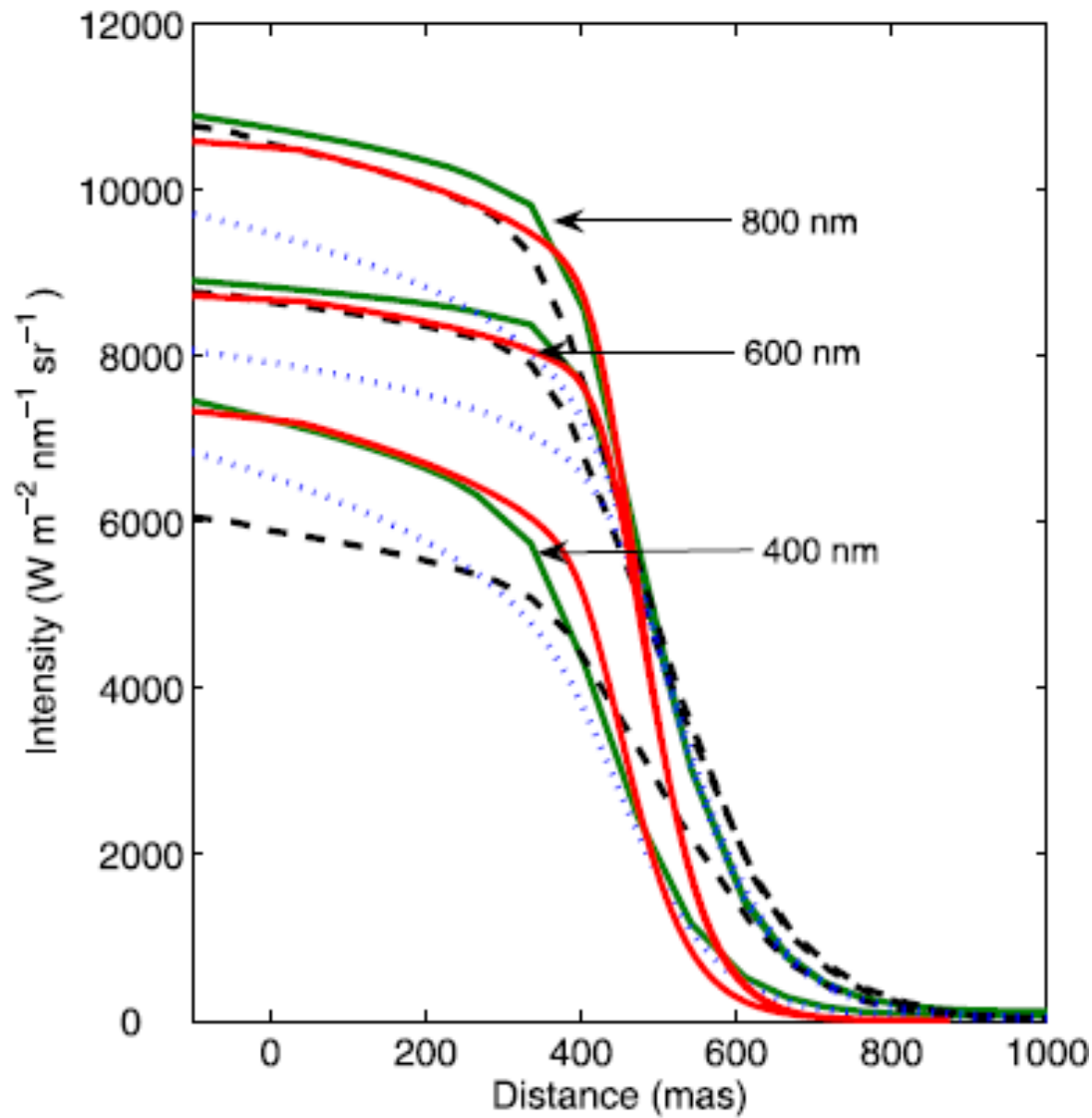


Figure 9 Limb shapes for three wavelengths predicted by SH09 (red), FCH09 (black), VAL-C (blue), and COSI (green) for 400, 600, and 800 nm.