

# SunStars : Connexions en physique solaire et stellaire

14-18 mai 2018 Banyuls sur mer (France)

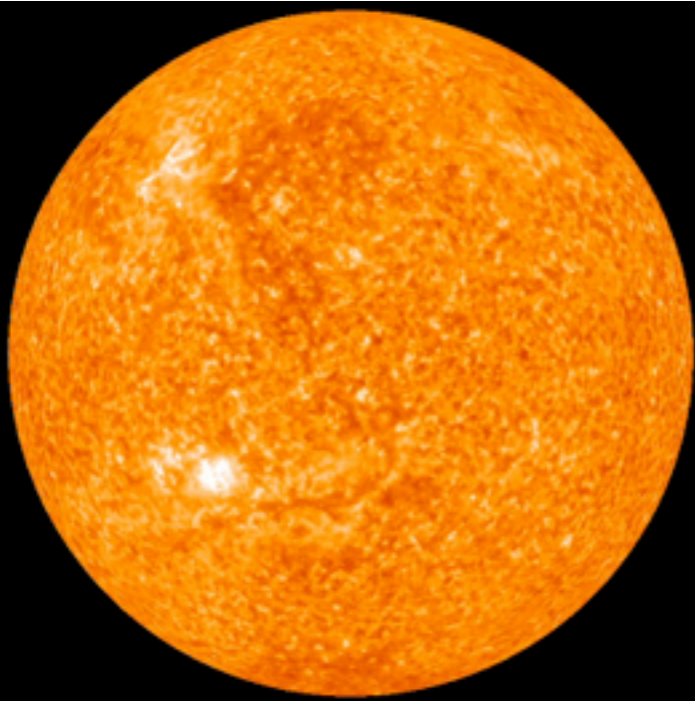
## lundi 14 mai 2018

HEURES	ÉVÉNEMENT
08:45 - 10:15	Signature observationnelle de l'activité solaire/stellaire - M. Kretzschmar
10:15 - 10:45	Pause café
10:45 - 12:15	Activité stellaire dans les séries temporelles - M. Deleuil
12:30 - 14:00	Déjeuner
14:00 - 15:30	Vitesses radiales et exoplanètes - N. Meunier
15:30 - 16:00	Pause café
16:00 - 17:30	TP activité stellaire - N. Meunier & M. Deleuil
18:00 - 19:00	Cocktail
19:30 - 21:00	Dîner

## mardi 15 mai 2018

HEURES	ÉVÉNEMENT
08:45 - 10:15	Sismologie: principes physiques - J. Ballot
10:15 - 10:45	Pause café
10:45 - 12:15	Sismologie: résultats et perspectives - F. Baudin
12:30 - 14:30	Déjeuner
14:30 - 15:00	Tour de table - Tout le monde
15:00 - 16:30	TP sismologie - J. Ballot & F. Baudin
16:30 - 17:00	Pause café
17:00 - 18:30	TP sismologie - J. Ballot & F. Baudin
19:30 - 21:00	Dîner

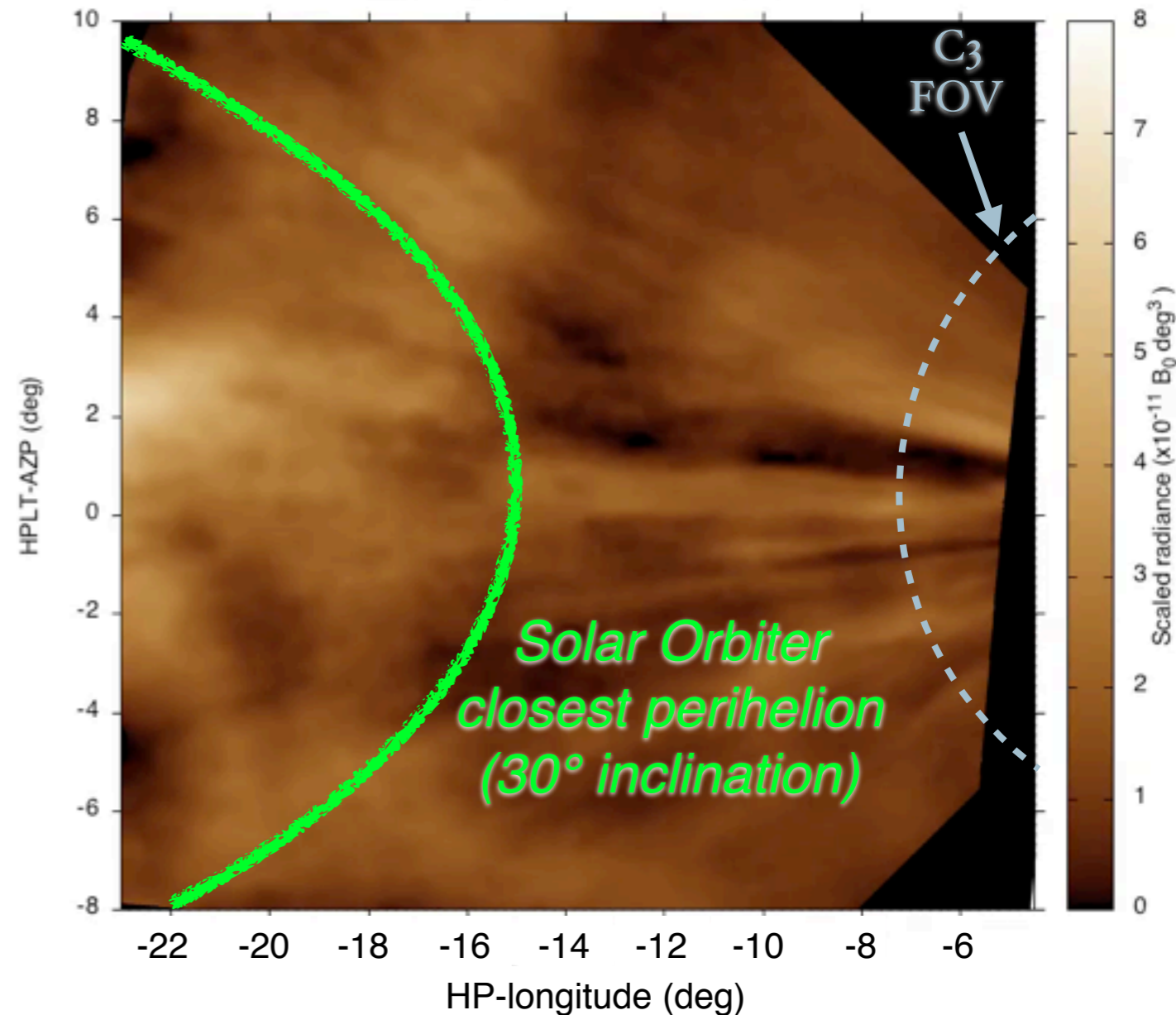
- ◆ Ce soir lundi à 18:00: dégustation de Banyuls et vins locaux
- ◆ Mardi 14:30: tour de table (présentation de tout le monde)
- ◆ Mercredi soir: diner de gala ..



# Cycles solaire et stellaires

*M. Kretzschmar  
LPC2E, CNRS & University of  
Orléans, France*

HI- $\tau$  (processed & radial-filtered)



# PLAN

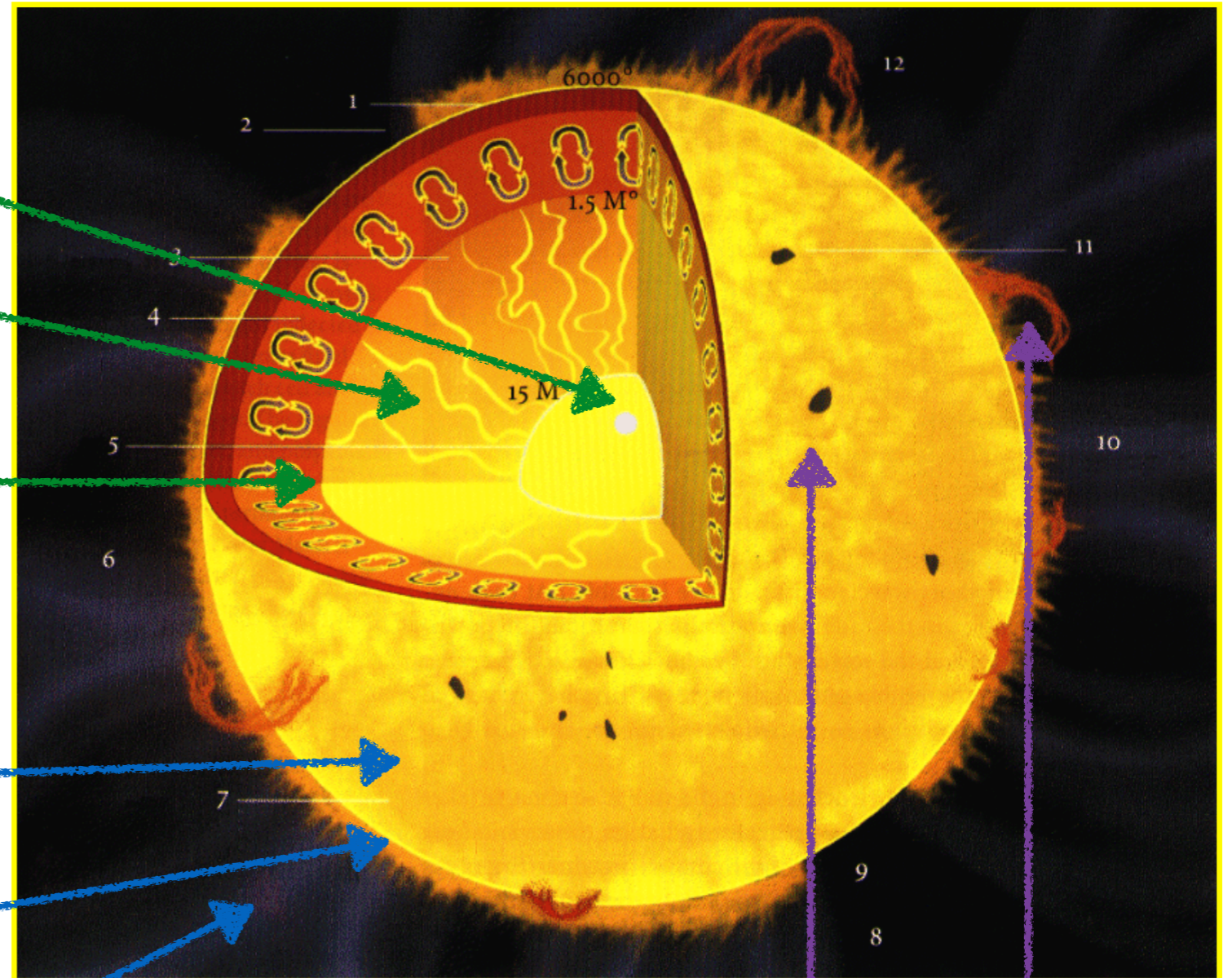
- ◆ **Basiques du Soleil: Atmosphère solaire: structure, mouvement, champ magnétique.**
  
- ◆ **Activité et cycle du Soleil**
  - ✿ Cycle solaire
  - ✿ Effet des structures sur la variation d'irradiance
  
- ◆ **La variabilité solaire comparée aux étoiles « solar like »**
  - ✿ Observations au sol de la variabilité stellaire (visible, Ca II K, Mount Wilson, Lowell Obs)
    - ▶ Indice S et  $R'_{HK}$
    - ▶ Les type de variabilité observés
    - ▶ Correlation photosphere/chromosphere.
    - ▶ Gap de Vaughan&Preston



# STRUCTURE SOLAIRE

- ◆ Coeur
- ◆ Zone radiative
- ◆ Zone convective

- ◆ Photosphère
- ◆ Chromosphère
- ◆ Couronne/vent solaire

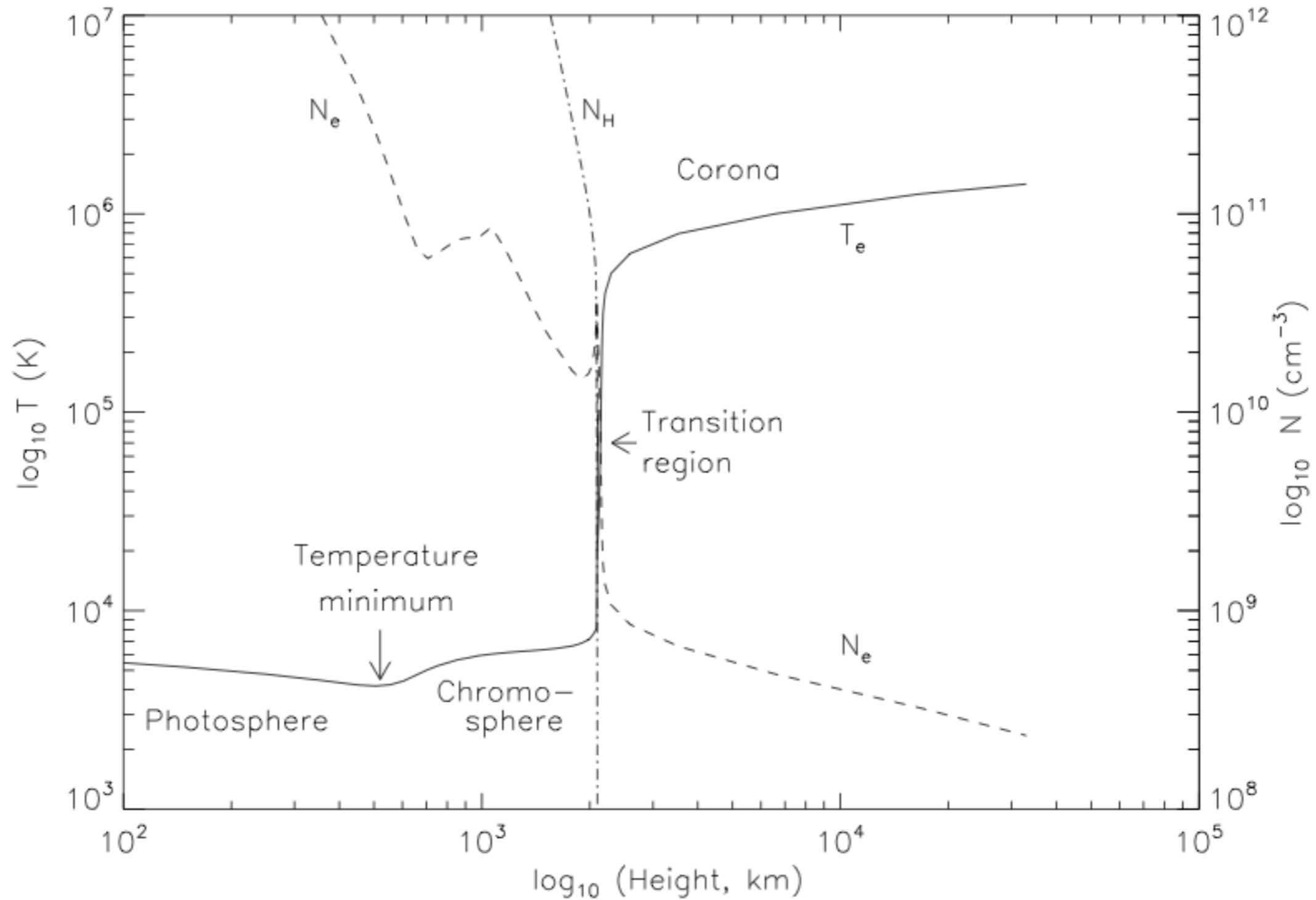


◆ Tâche

◆ Protubérance

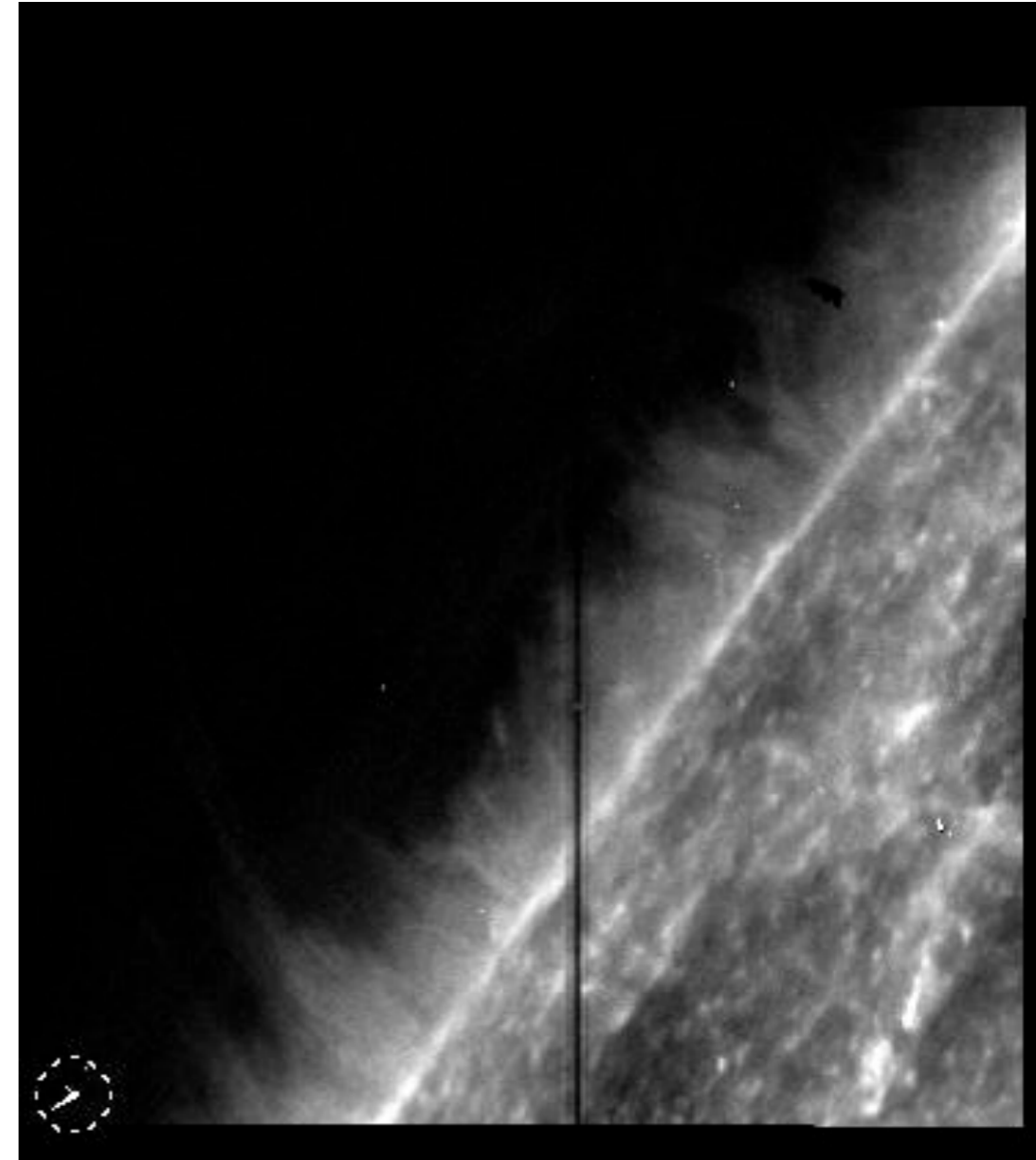
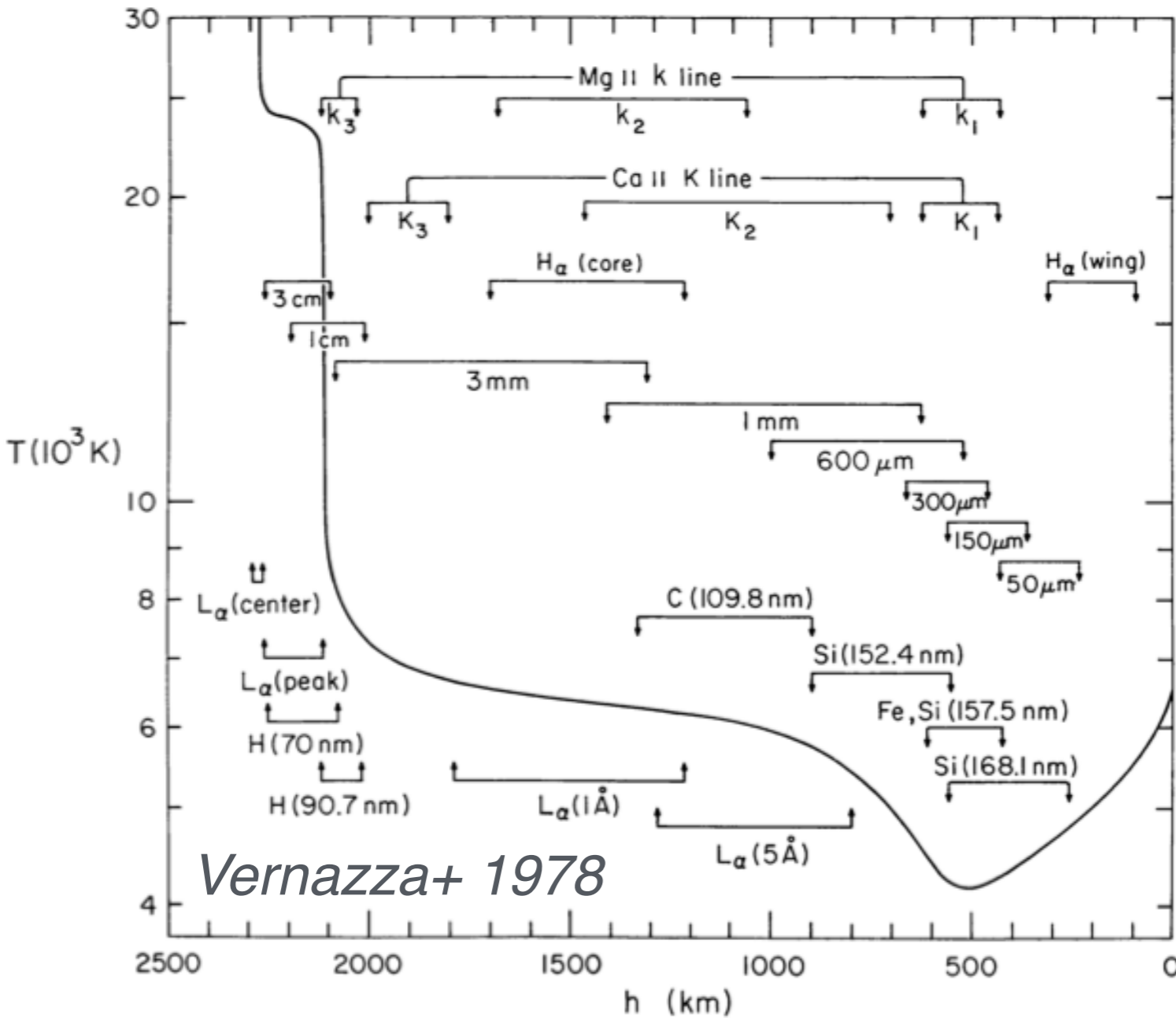


# ATMOSPHERE SOLAIRE



♦ Note: Le Soleil n'est pas 1D

# Emission et atmosphère



- ◆ Le coeur d'une raie est émis plus haut que ses ailes
- ◆ Le Soleil n'est pas 1D



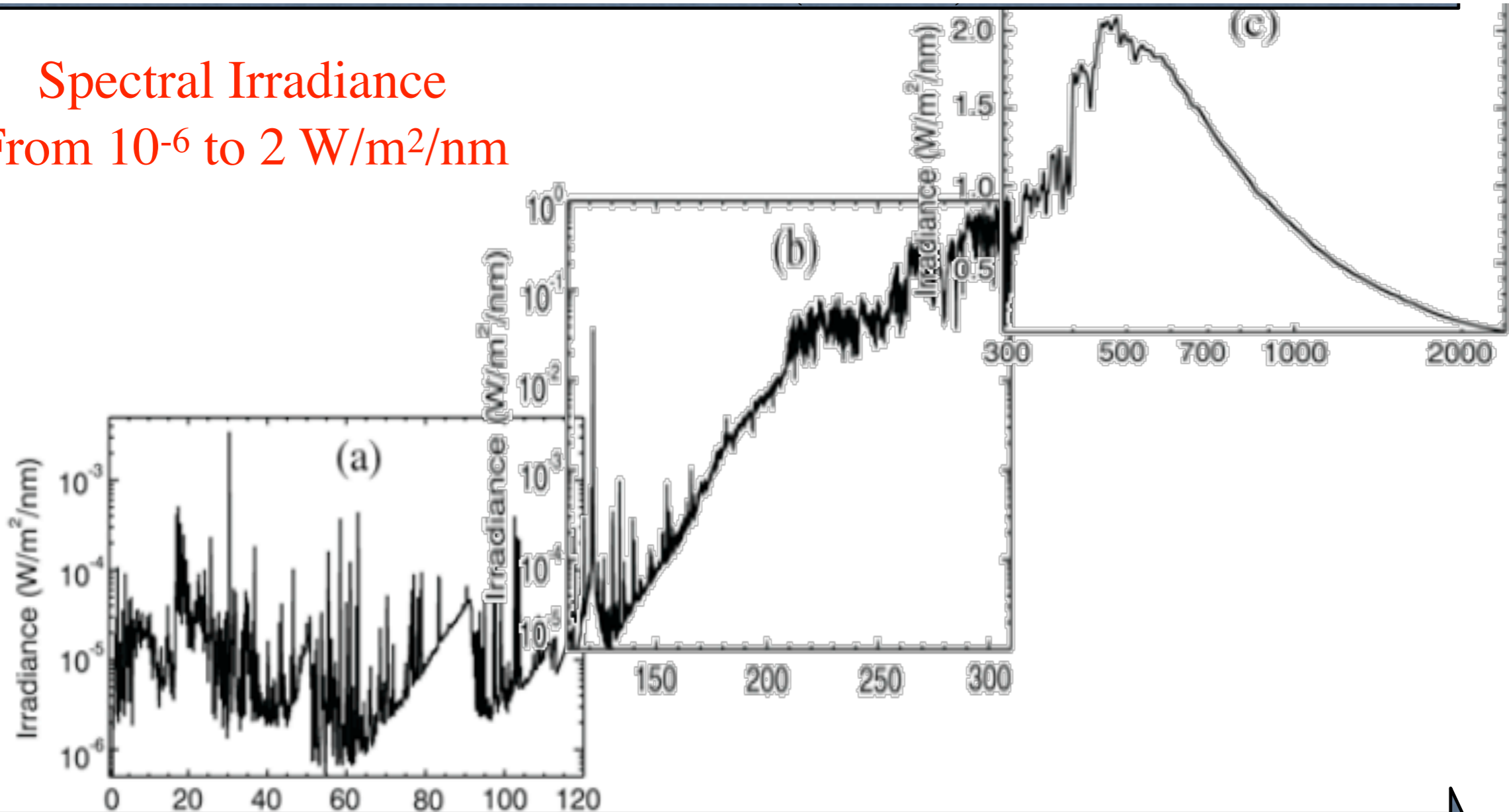
# LE SPECTRE D'IRRADIANCE SOLAIRE

Couronne&TR

Chromopshère

Photosphère

Spectral Irradiance  
From  $10^{-6}$  to  $2 \text{ W/m}^2/\text{nm}$



- ◆ Corps noir à 5700K jusqu'à 400nm environ
- ◆ Forêt de raies en émission et absorption
- ◆ Continu libre-lié

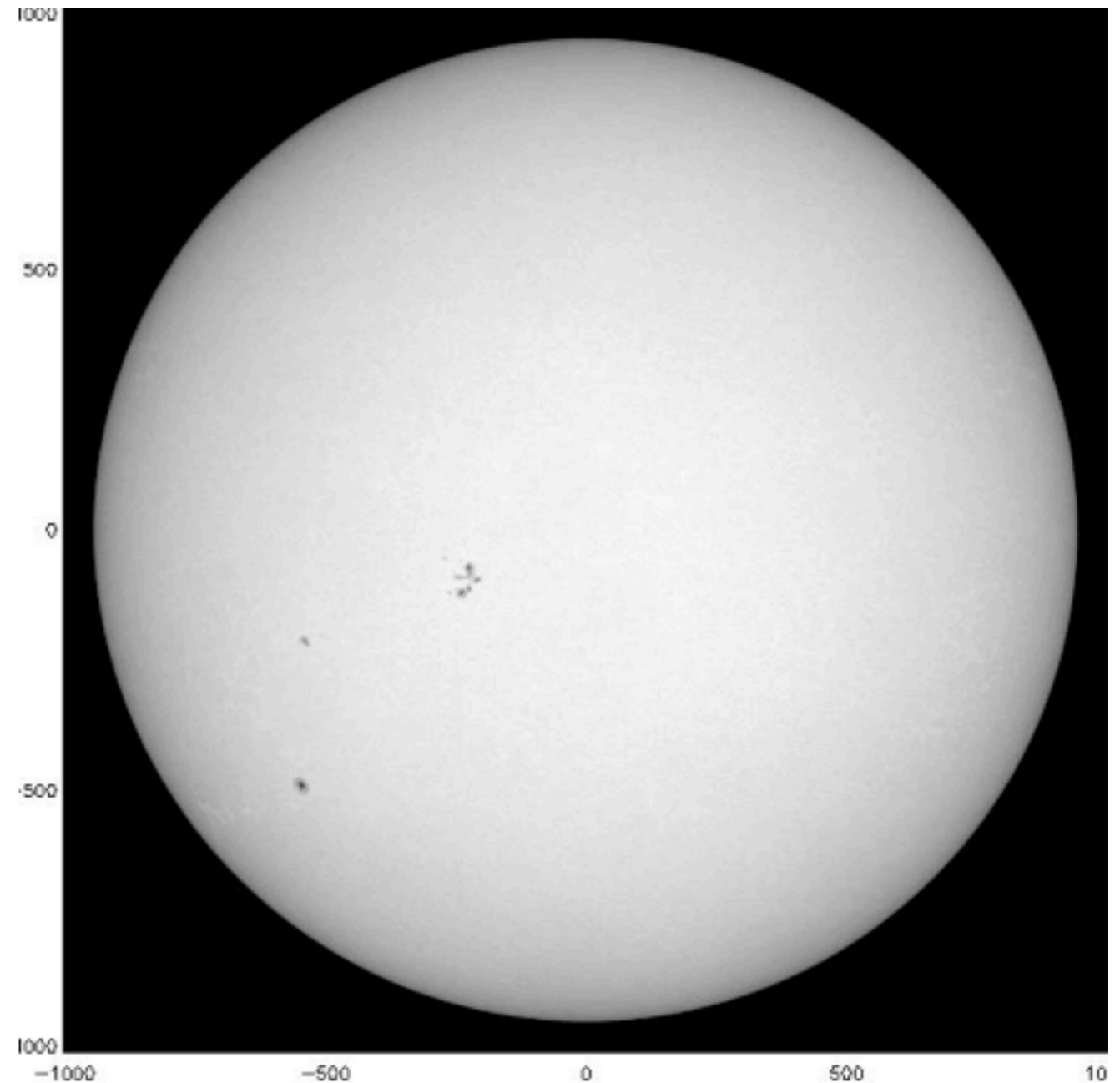
# PROCESSUS PHYSIQUES DANS L'ATMOSPHERE SOLAIRE

## ◆ Surface

- ✦ Convection: granulation et super granulation
- ✦ Rotation et rotation différentielle
- ✦ Mouvements à grande échelle (circulation méridienne)
- ✦ Champ magnétique à différentes échelles
- ✦ Oscillations / ondes (sismologie)
- ✦ Transfert radiatif

## ◆ Chromosphère et couronne

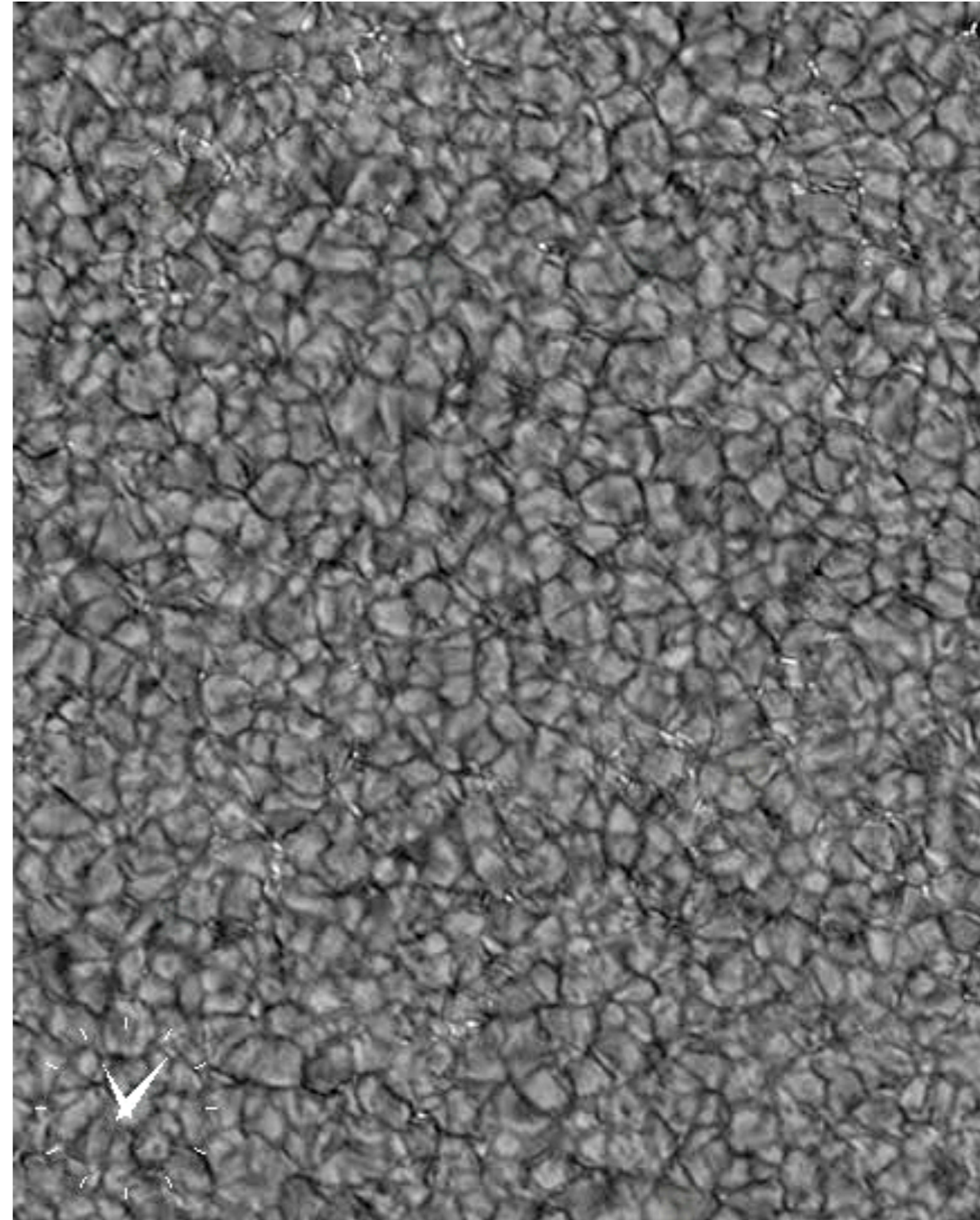
- ✦ Champ magnétique, reconnexion (E. Parriat, A. Lopez)
- ✦ Ondes, chocs, ...
- ✦ chauffage coronal et chromosphérique
- ✦ Transfert radiatif





# GRANULATION

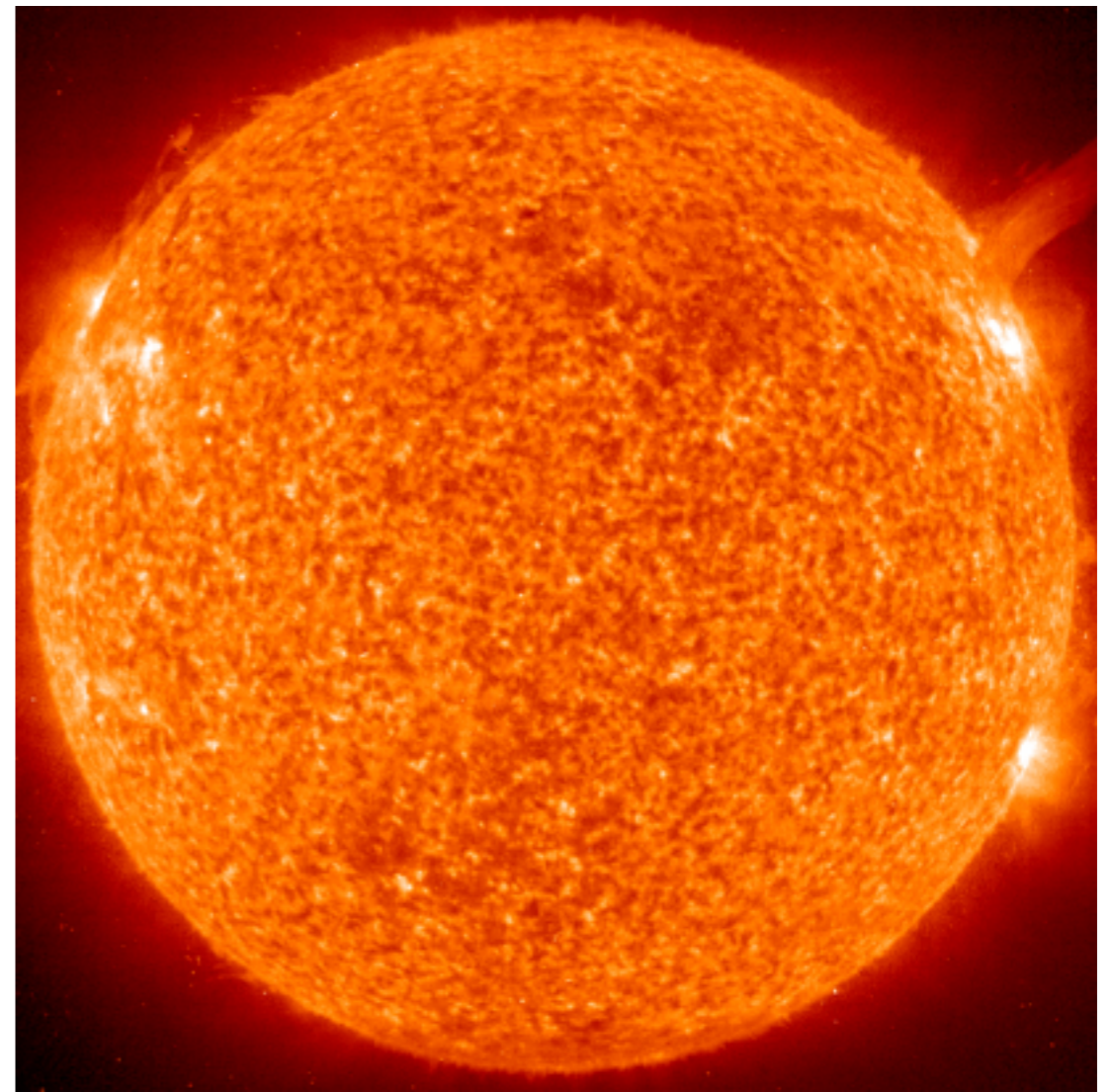
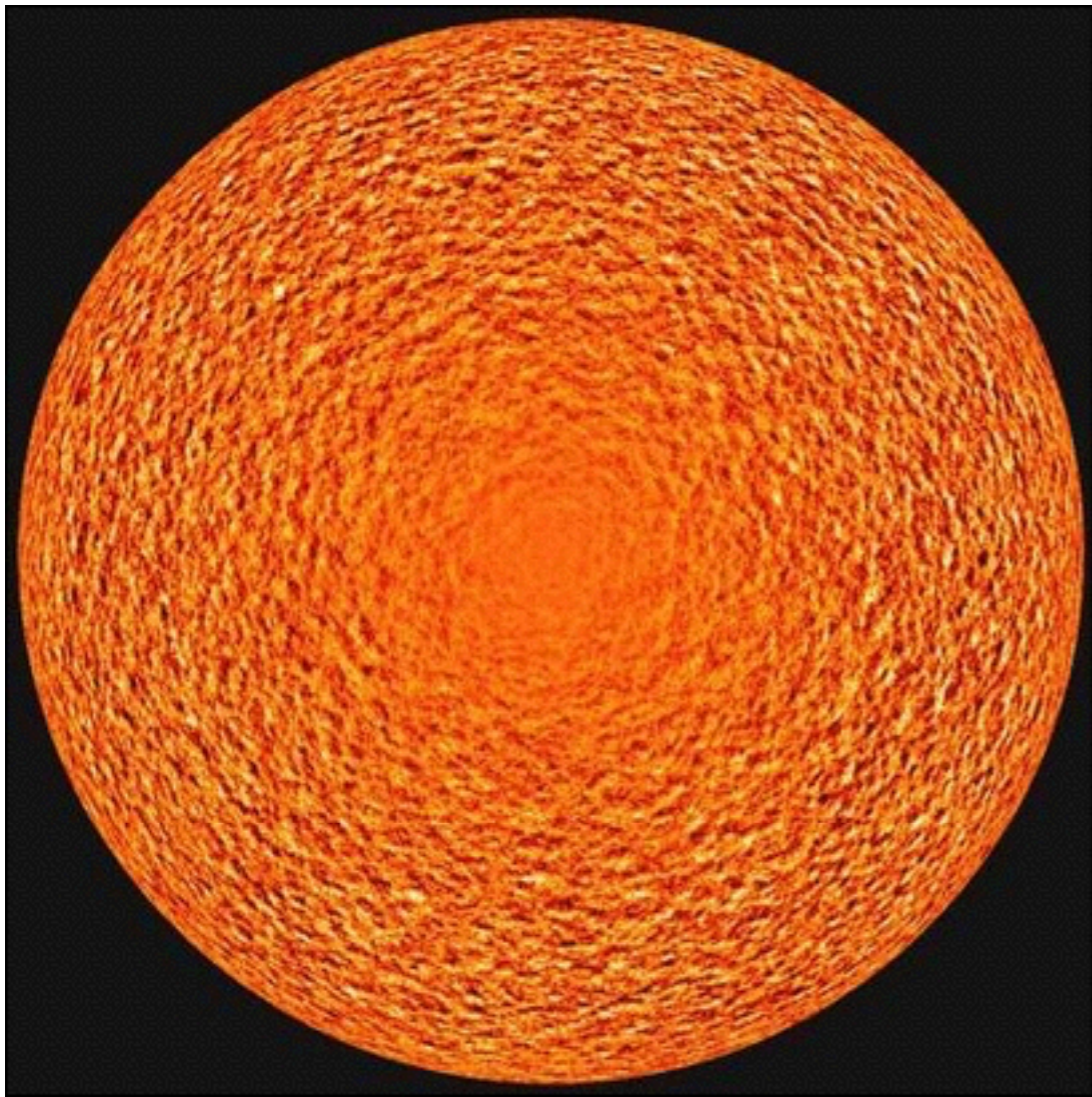
- ◆ Taille typique: 1-2 Mm
- ◆ Temps de vie: 5-8 min
- ◆ Vitesse: 1-2 km/s
- ◆ Contraste: 15% rms dans le visible
- ◆  $10^6$  granules présentes sur la surface





# SUPERGRANULATION

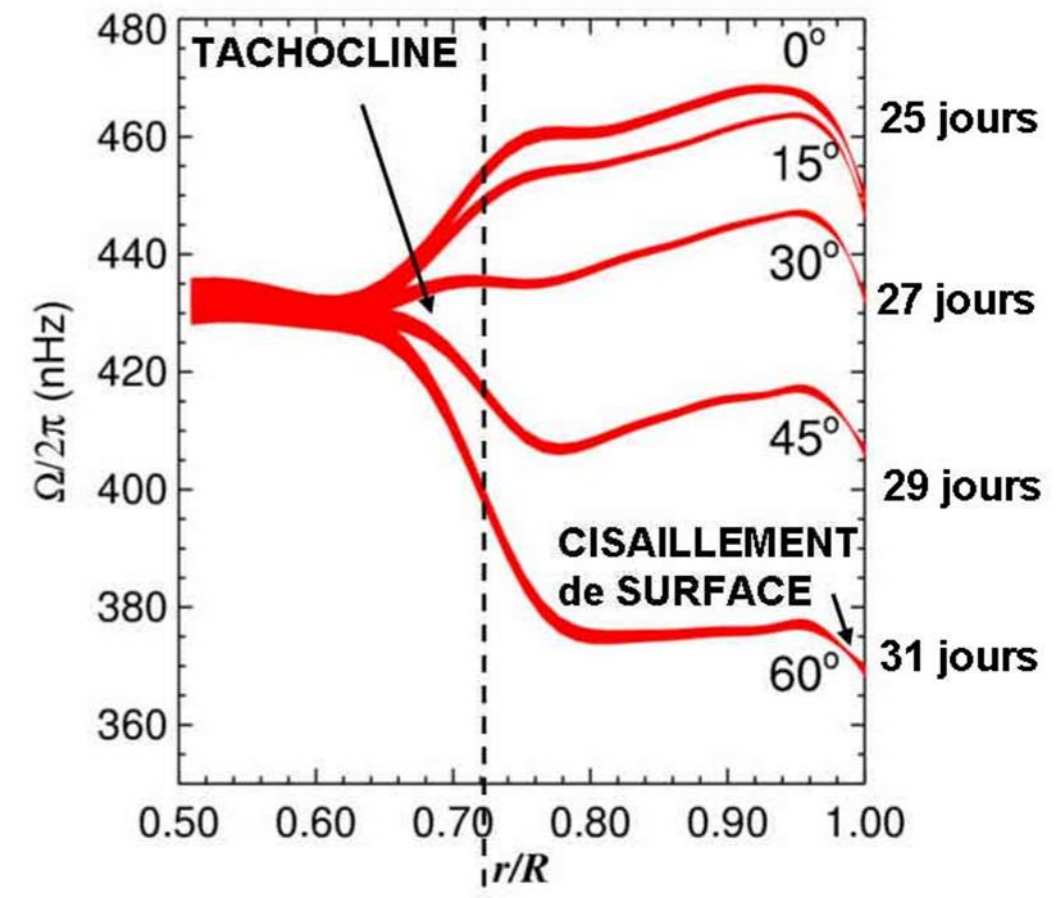
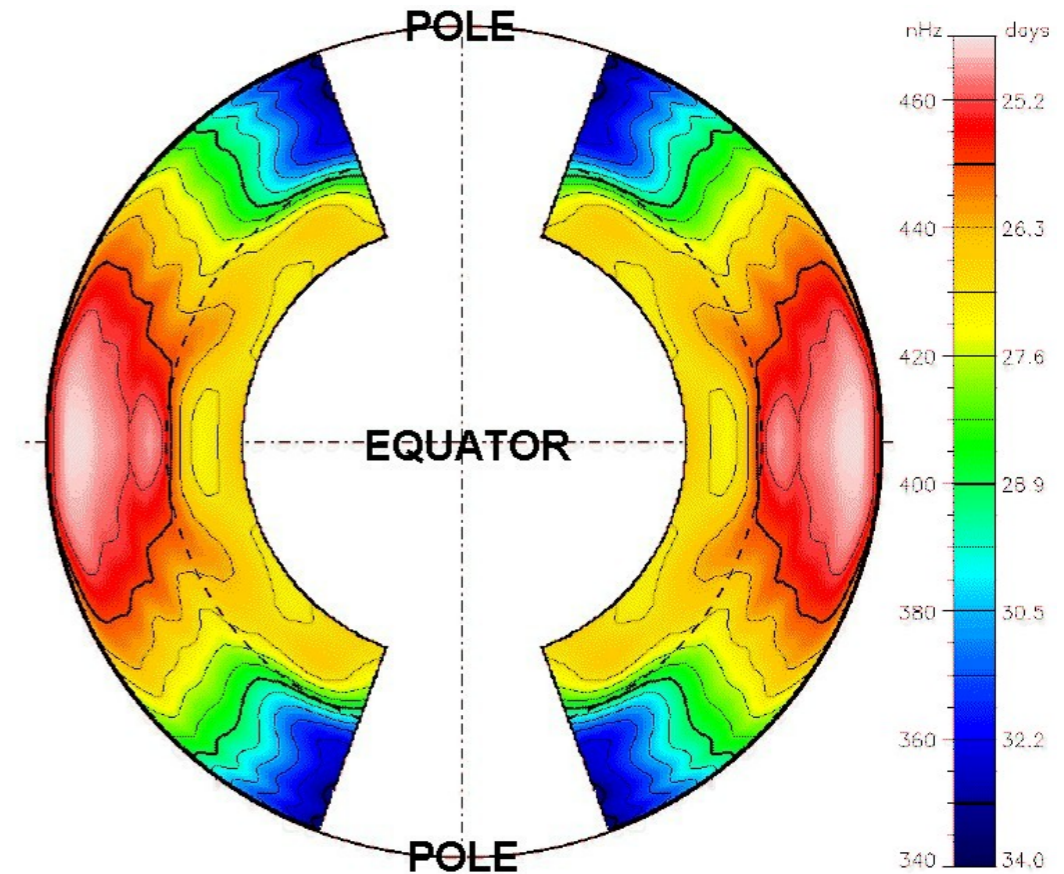
- ◆ Taille typique: 15-30 Mm
- ◆ Temps de vie: qqes jours
- ◆ Vitesse horizontale: 400m/s
- ◆ Pas de contraste dans le visible





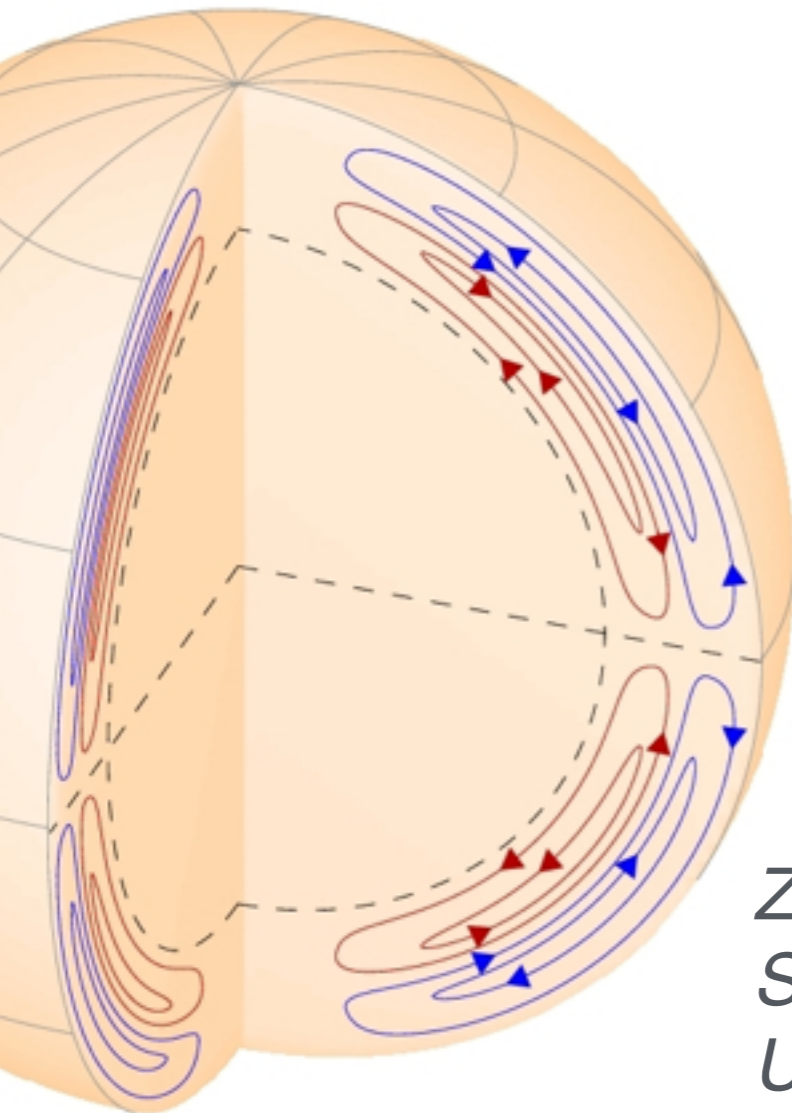
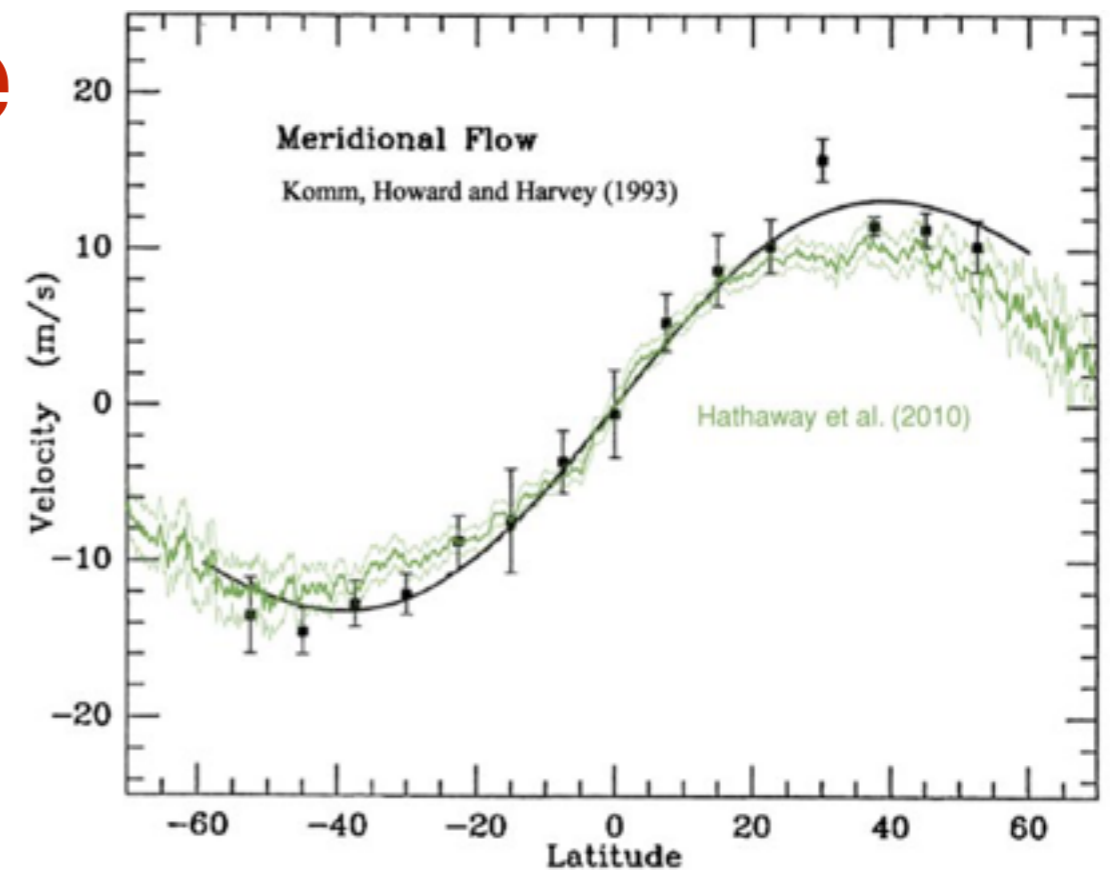
# ROTATION DIFFERENTIELLE

- ♦ L'équateur tourne plus vite que les poles
- ♦ La rotation différentielle de surface se prolonge jusqu'à la base de la couche convective:
  - ✿ Rotation légèrement plus rapide juste sous la surface
- ♦ Rotation "solide" sous la couche convective (zone radiative)
- ♦ Zone de cisaillement juste sous la base de la couche convective: la tachocline
  - ✿ Épaisseur:  $< 0,1 R_s$
  - ✿ Gradient de vitesse maximum dans cette couche
  - ✿ Site probable de la dynamo solaire

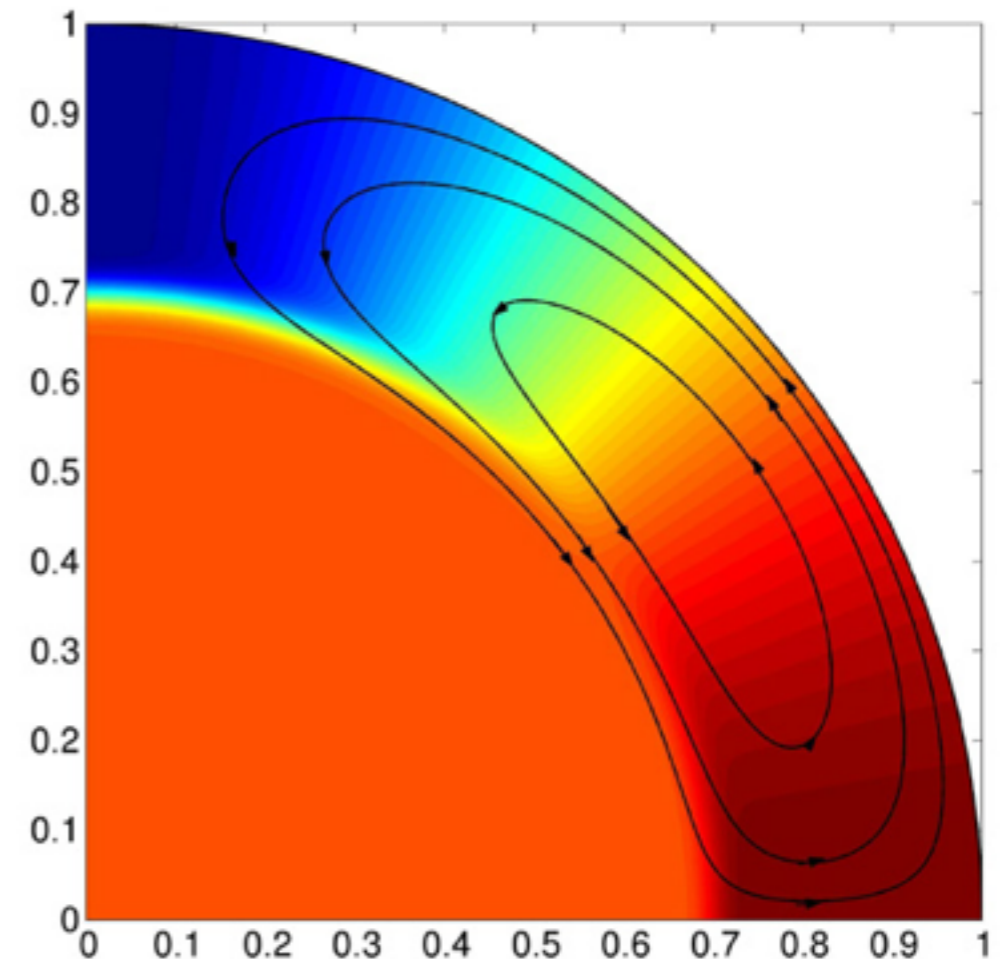


# Circulation méridienne

- ◆  $V_{\text{surface}} = 10 \text{ m/s} = 1R_s / 2.2 \text{ yr}$
- ◆ Mouvement profond vers l'équateur à seulement 1-2 m/s ( $1R_s / 22 \text{ yr}$ )
- ◆ 1, 2, 4 cellules de rotation ?
- ◆ Ingrédient essentiel du cycle (inversion champ dipolaire)



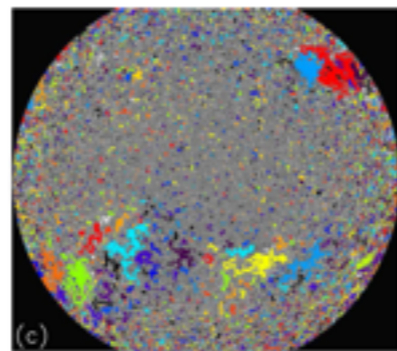
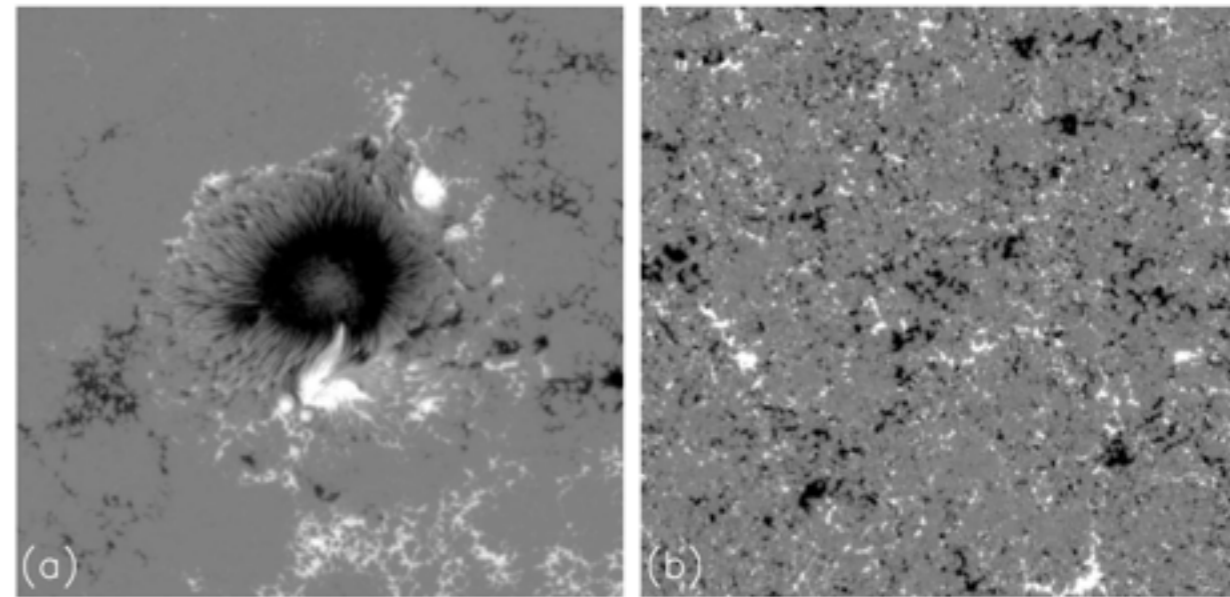
*Zhao+ 2013*  
*Schad+ 2013*  
*Ulrich 2010*



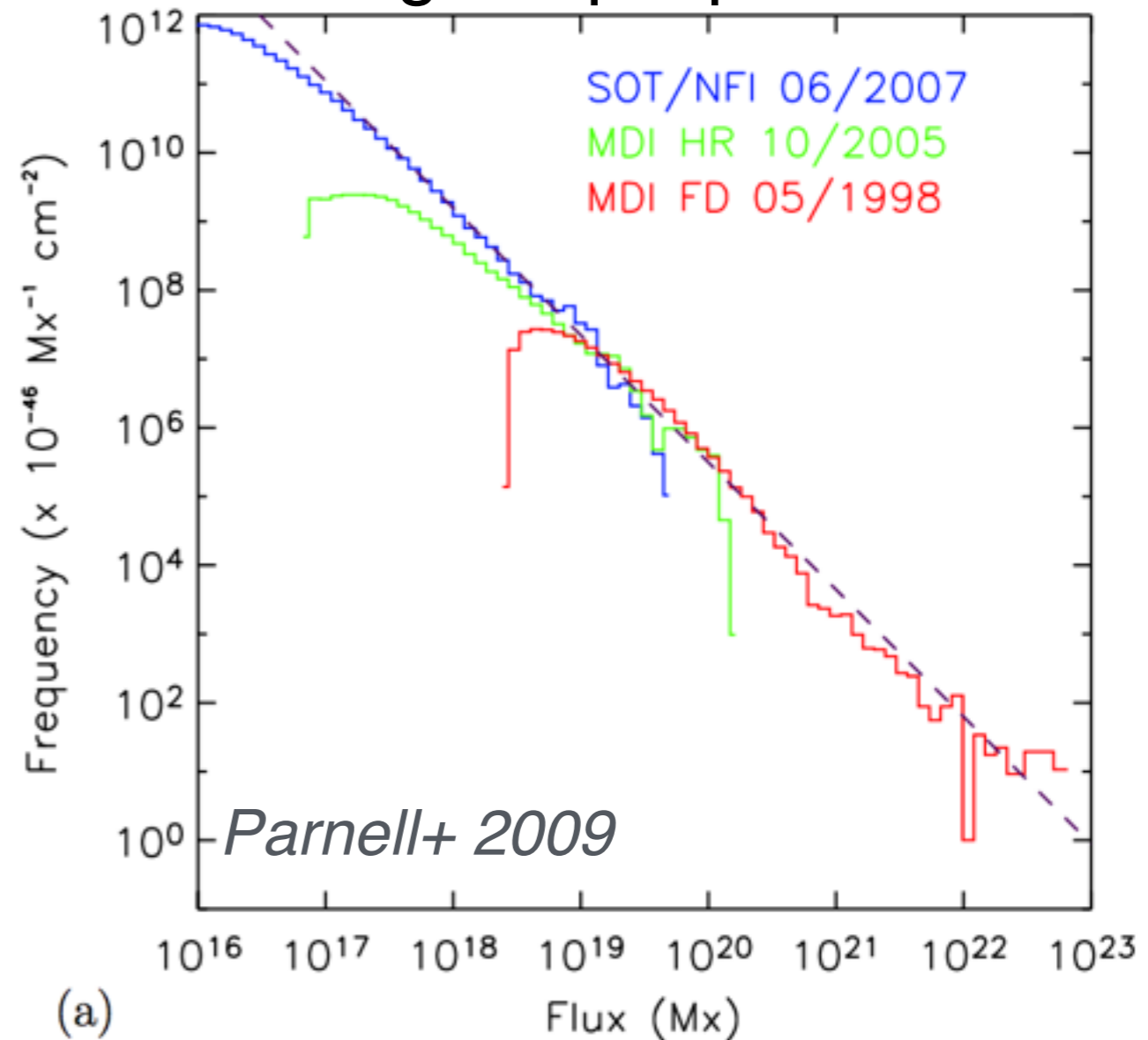


# CHAMP MAGNETIQUE

- ◆ Magnetic field is everywhere on the surface
- ◆ Measured from Zeeman effect. (Petit, Lopez)
- ◆  $1\text{Mx} = 10^{-8} \text{ T/m}^2$
- ◆ Many small features !

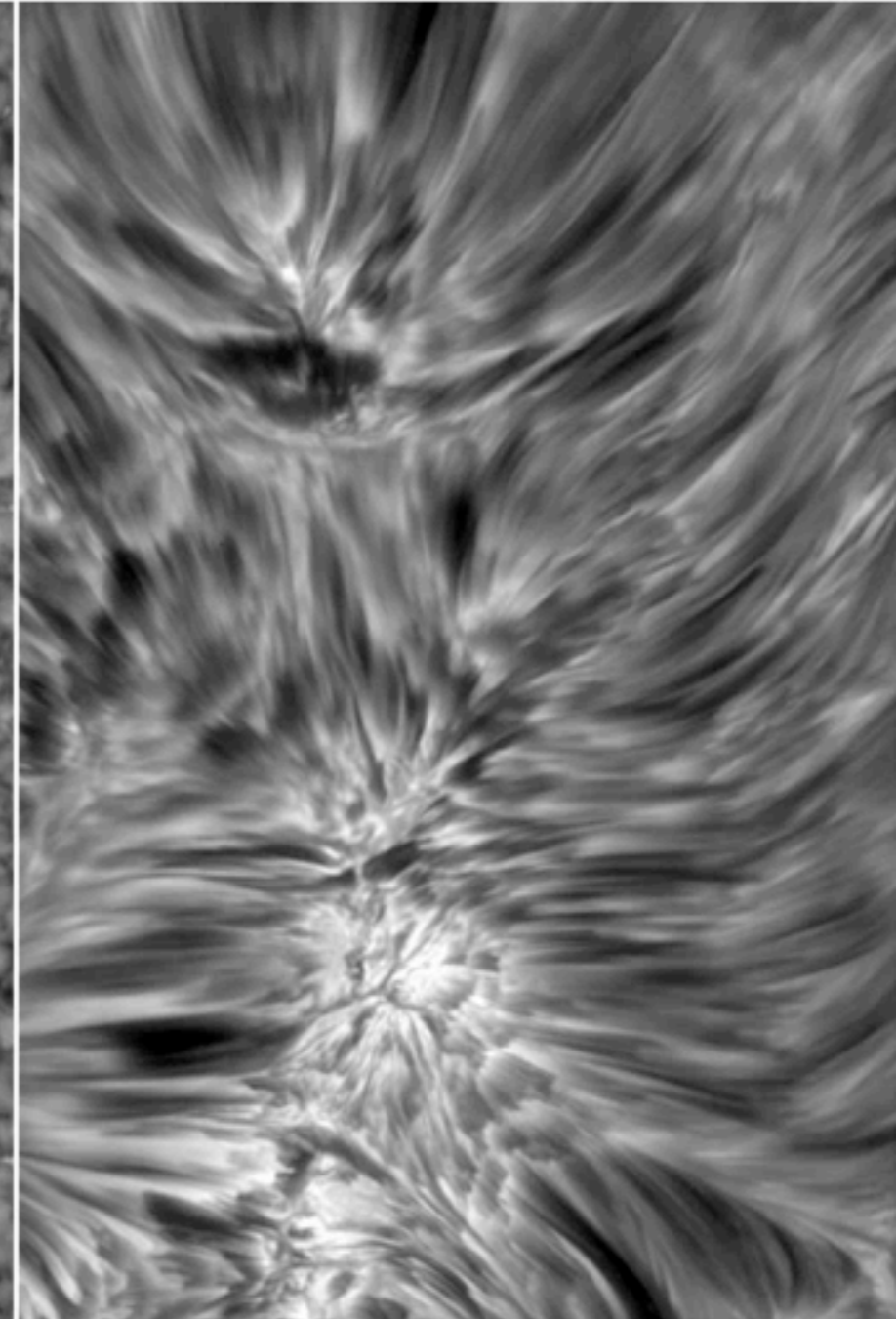
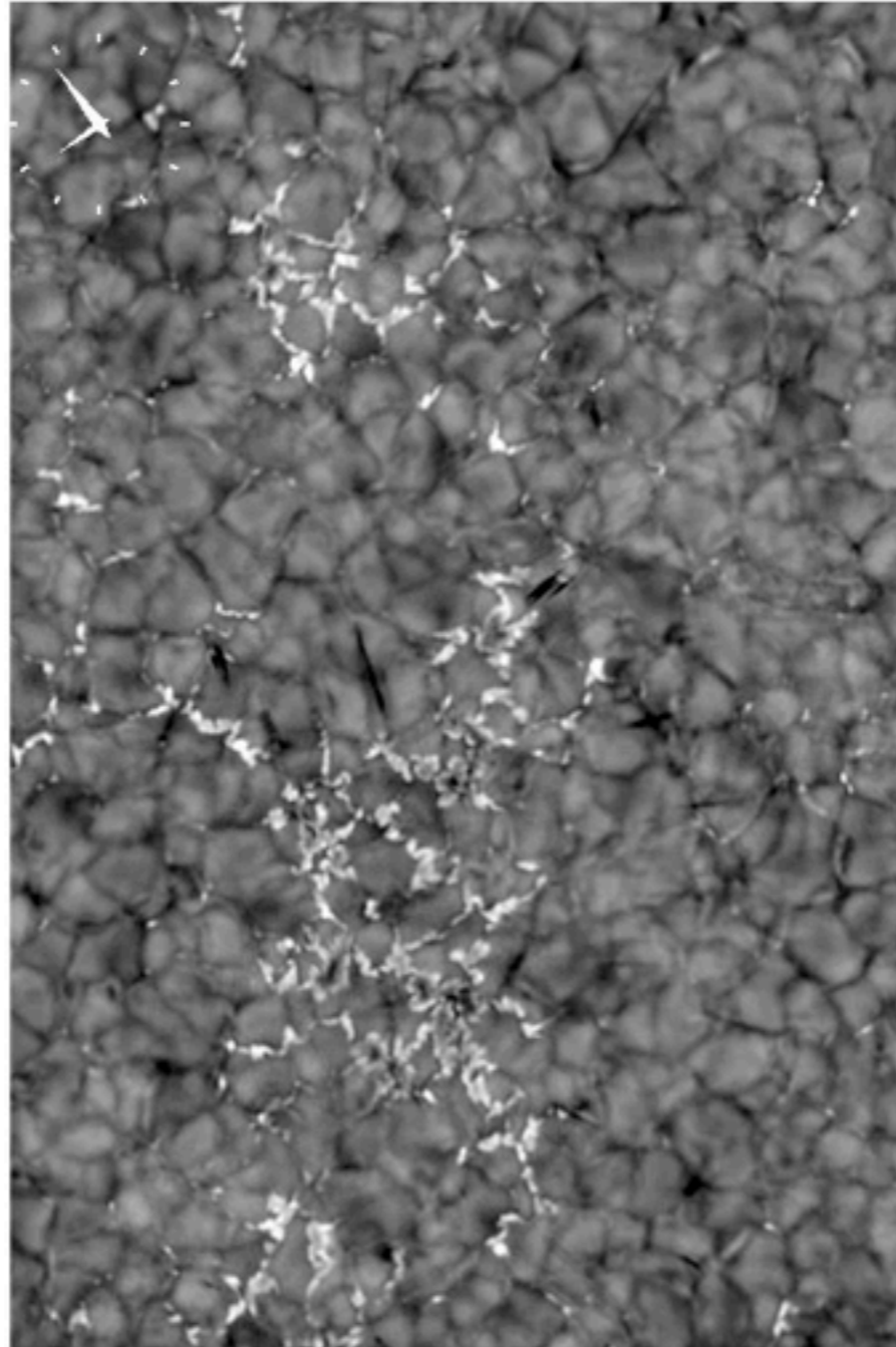


Flux magnétique par structure



# CHAMP MAGNETIQUE

- ◆ Very dynamic
- ◆ Magnetic field concentrated in the network (or inter granular lanes)
- ◆ The magnetic field is the path from the photosphere to the chromosphere and corona





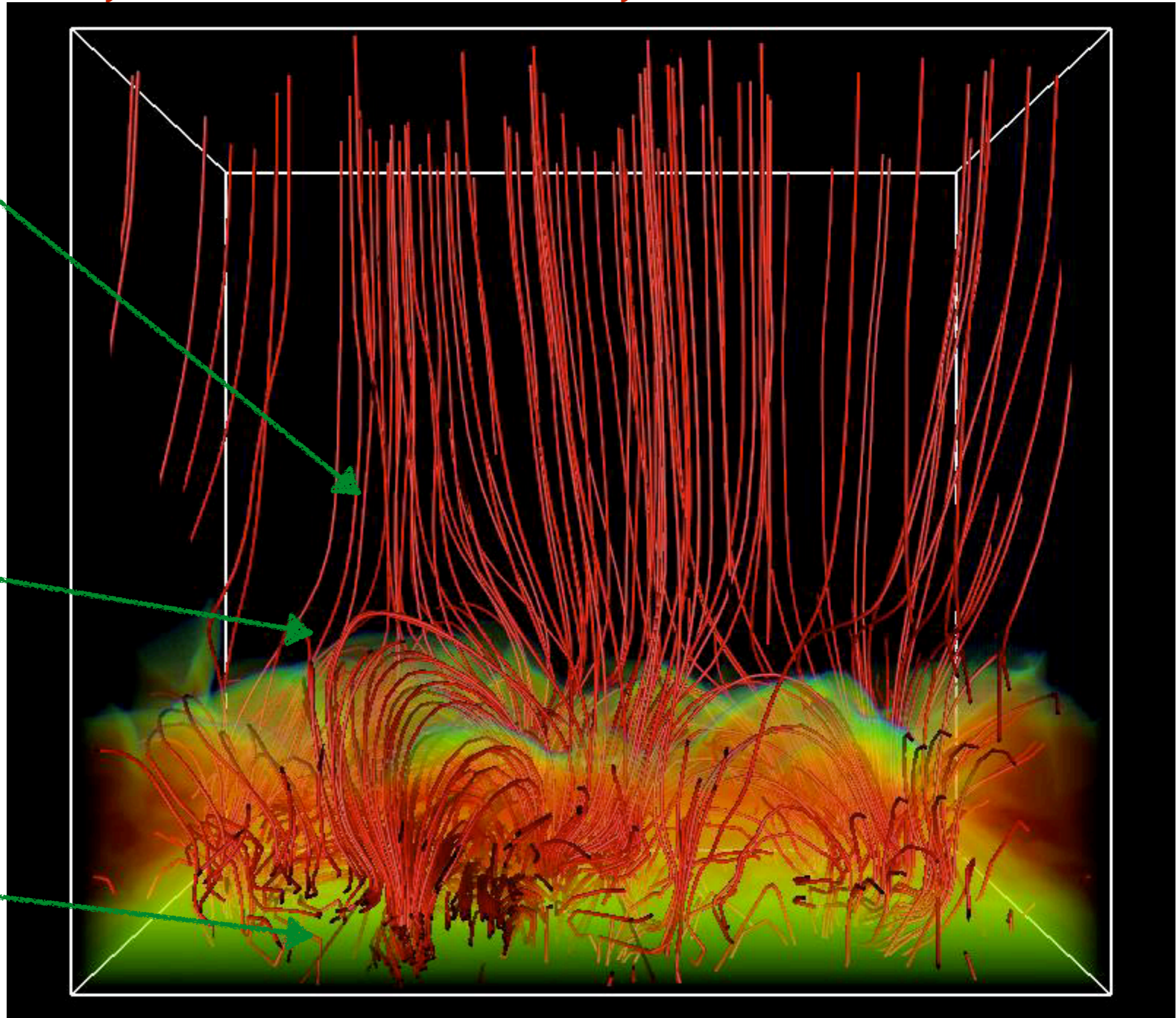
# Chocs, reconnexion, turbulence

Reconnexi  
on

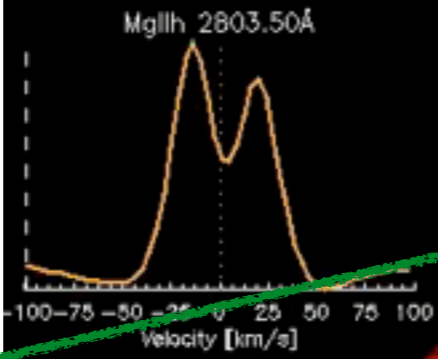
Chocs

*3D RHMD  
simulation,  
Leenaardts, C  
arlson...*

Turbulence





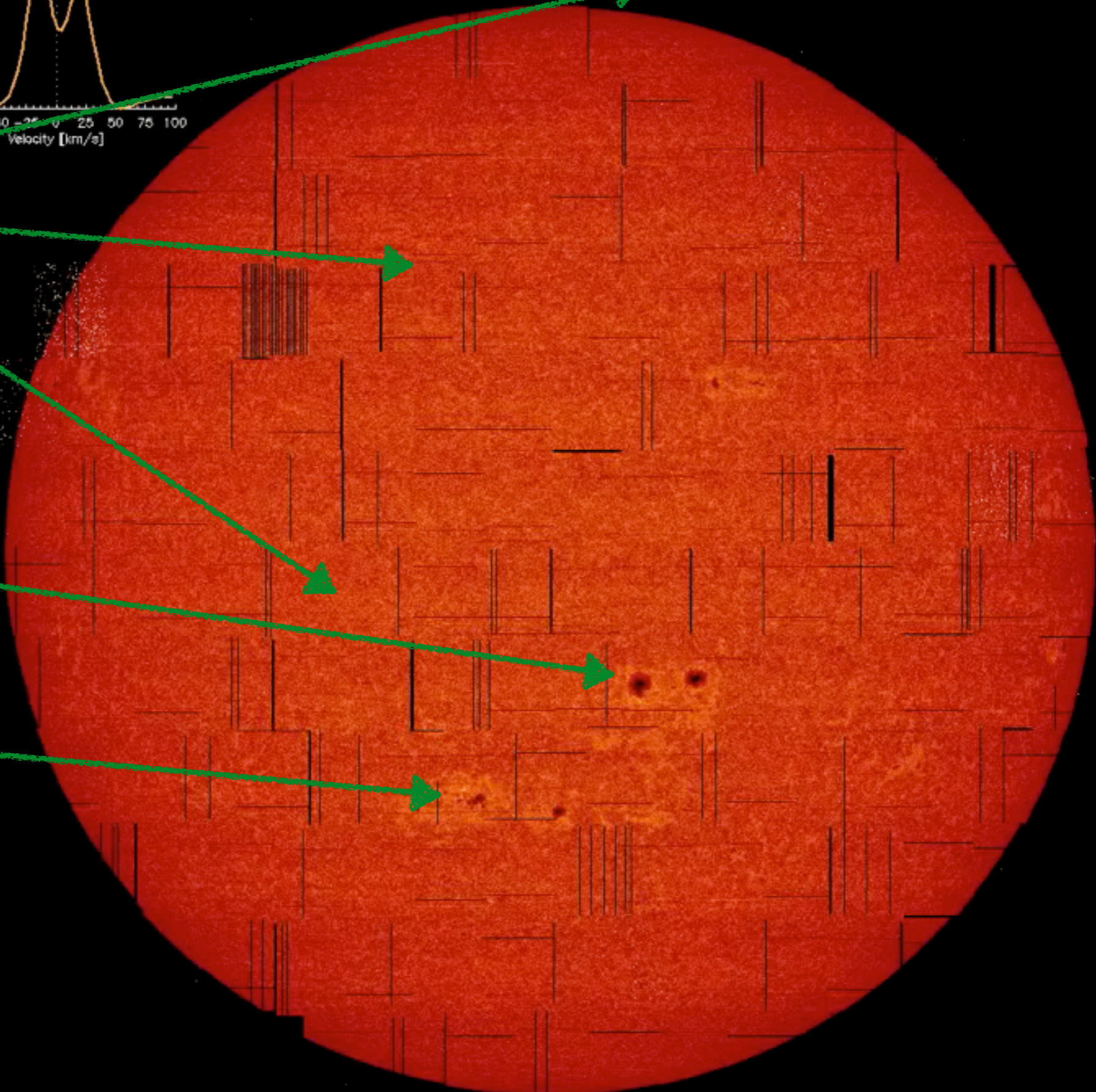


Line Intensity at  $-100$  km/s

Filament /  
Protubérance

Spots/  
Tache

Faculae/  
plage





# Structures solaires

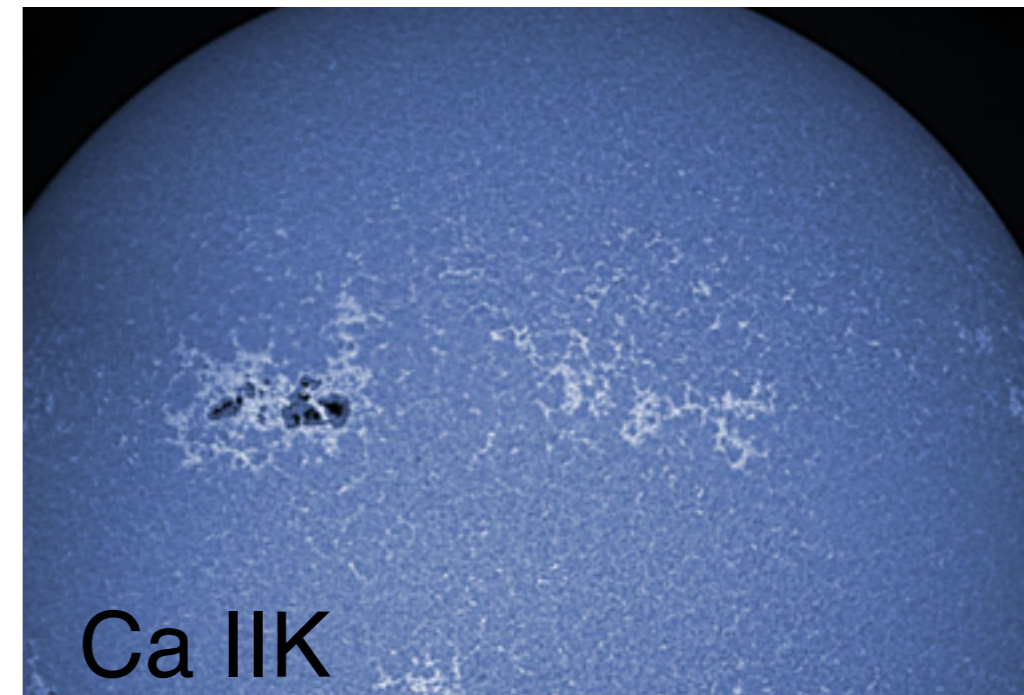
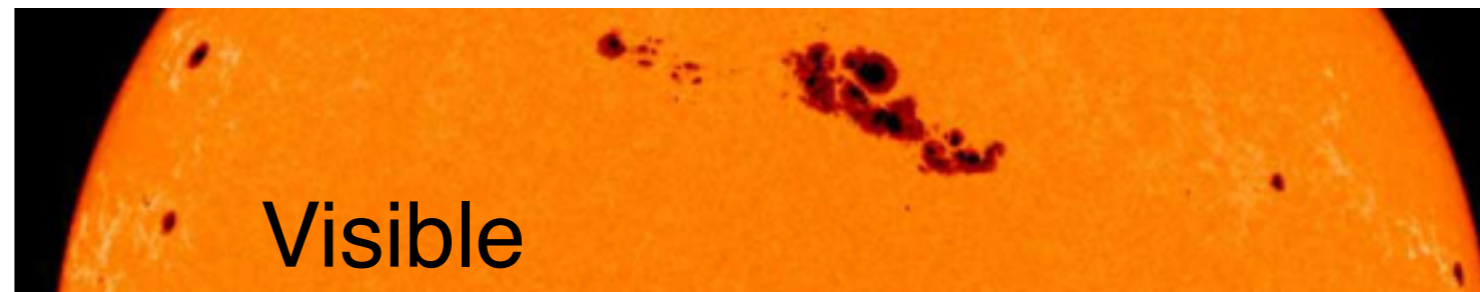
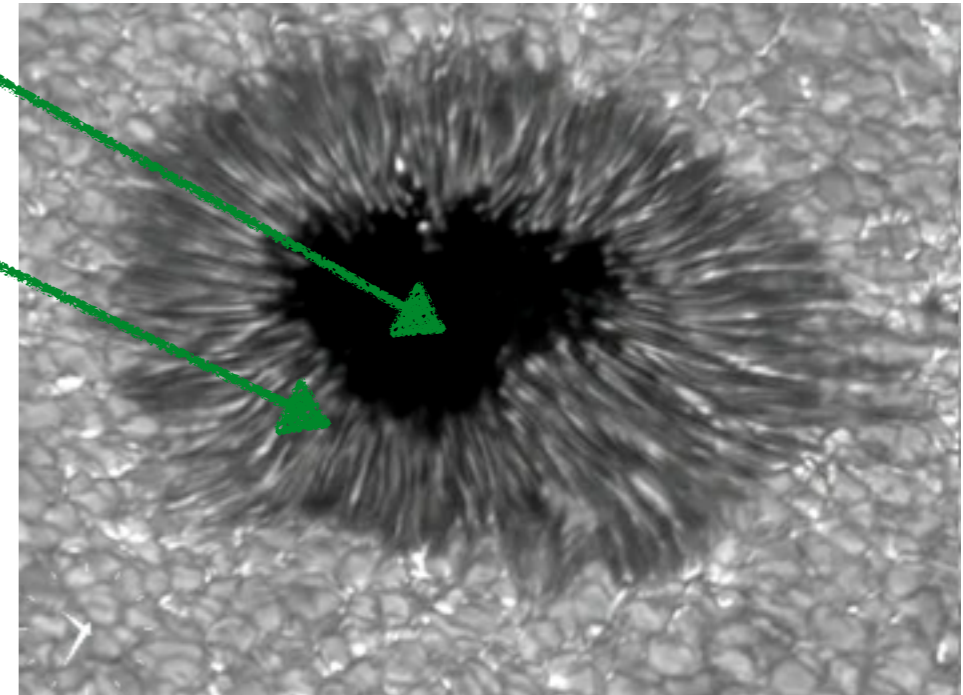
## ◆ Tâche

- ❖ Forte concentration de flux (0,3T), de taille assez grande.
- ❖ Ombre:  $I < 0.6 I_{qs}$
- ❖ Pénombre:  $0.6 < 0.87 I_{qs}$
- ❖ L'apparence change avec la longueur d'onde (l'altitude) et la position sur le disque.
- ❖ Pore: ombre seulement (1000-4000km)

## ◆ Facule

- ❖ Brillante à toutes longueurs d'onde.
- ❖ Existe en « patch » dans les régions actives, mais également répartis uniformément sur le disque.
- ❖ Contraste visible: 1.01
  - ❖ visible seulement au bord
- ❖ Contraste UV (chromosphérique): 3 !
- ❖ Aussi appelée plage dans l'UV

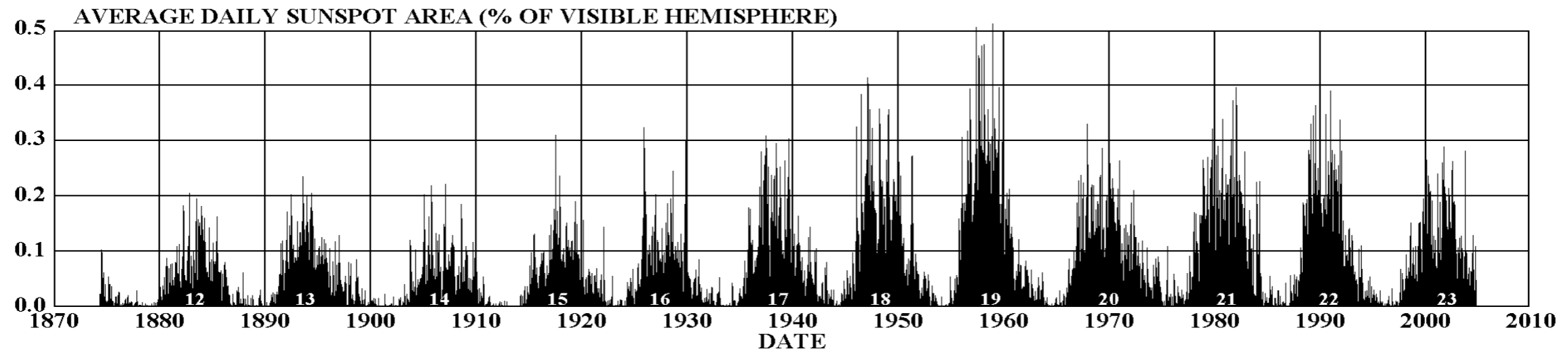
Umбра  
Penumbra





# **CYCLE SOLAIRE**

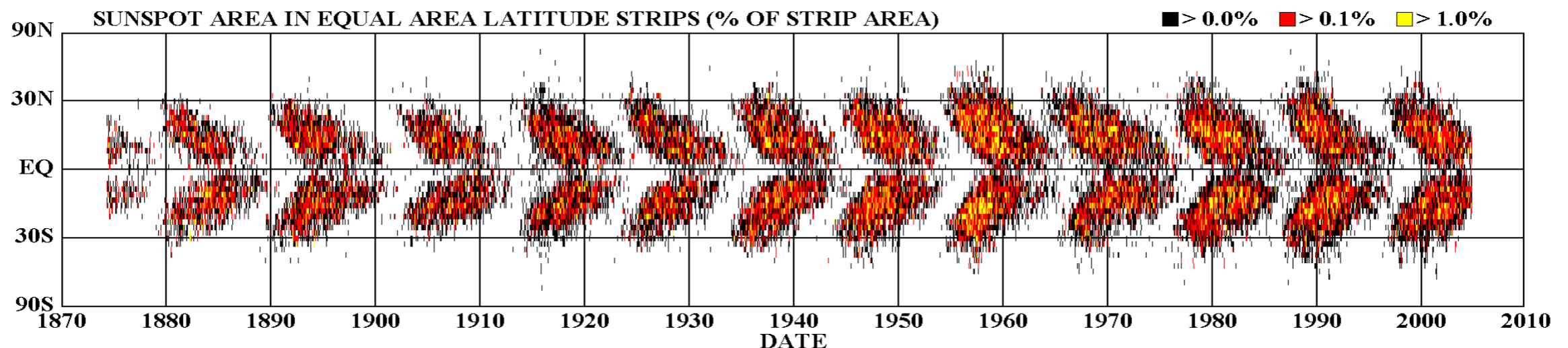
# Diagramme Papillon



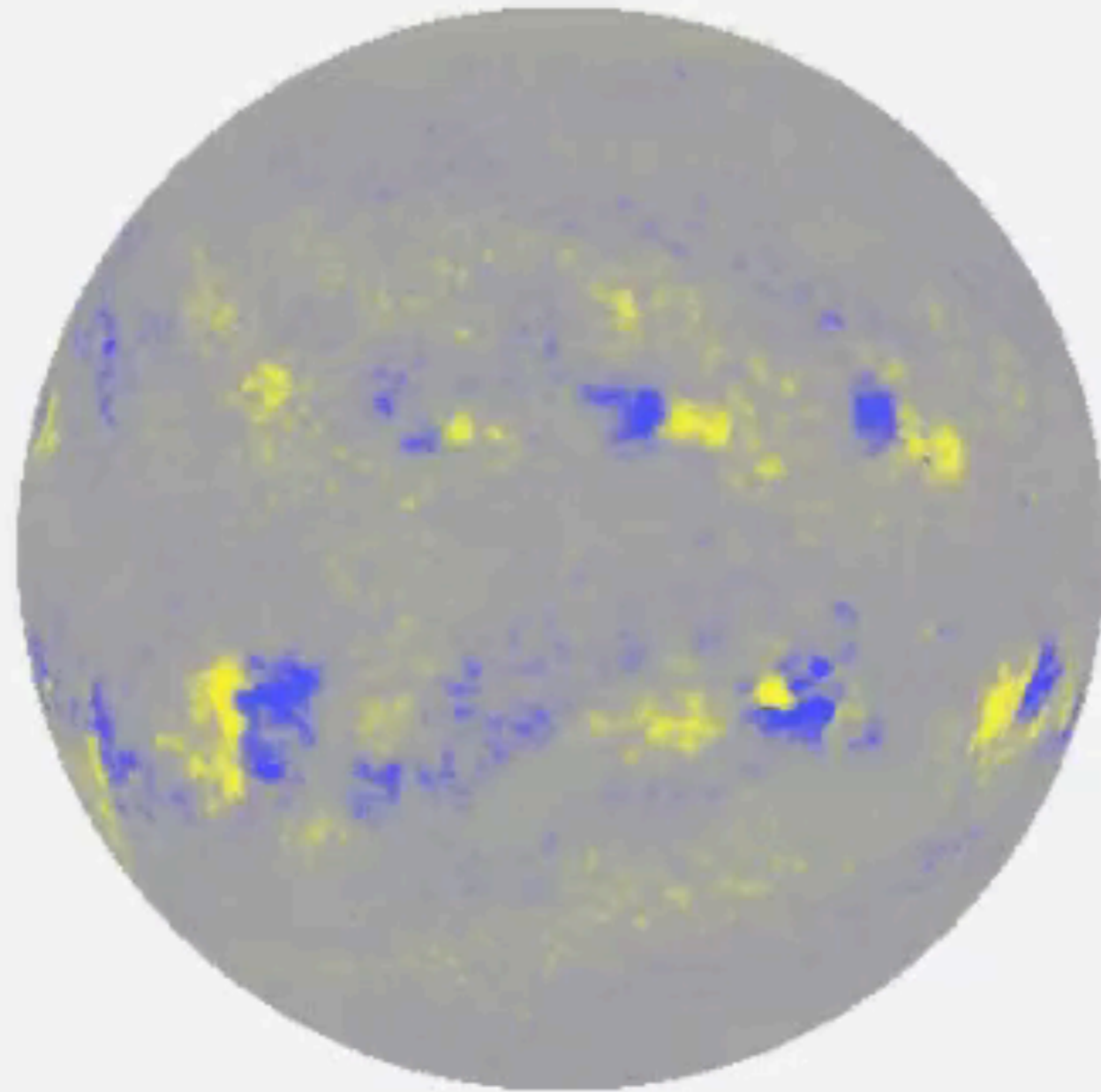
<http://science.msfc.nasa.gov/ssl/bad/solar/images/bflv.gif>

NASA/NSSTC/HATHAWAY 2005/01

- ◆ Dérive des latitudes actives vers l'équateur au cours du cycle:
  - ✿ Premières taches d'un cycle à environ  $30^\circ$  de latitude
  - ✿ Au maximum du cycle: latitude moyenne de  $15^\circ$
  - ✿ Dernières taches d'un cycle à  $< 5^\circ$  de l'équateur (taches rares à  $0^\circ$ )
  - ✿ Les taches de deux cycles coexistent pendant environ un an lors du minimum d'activité solaire



# Cycle magnétique du Soleil



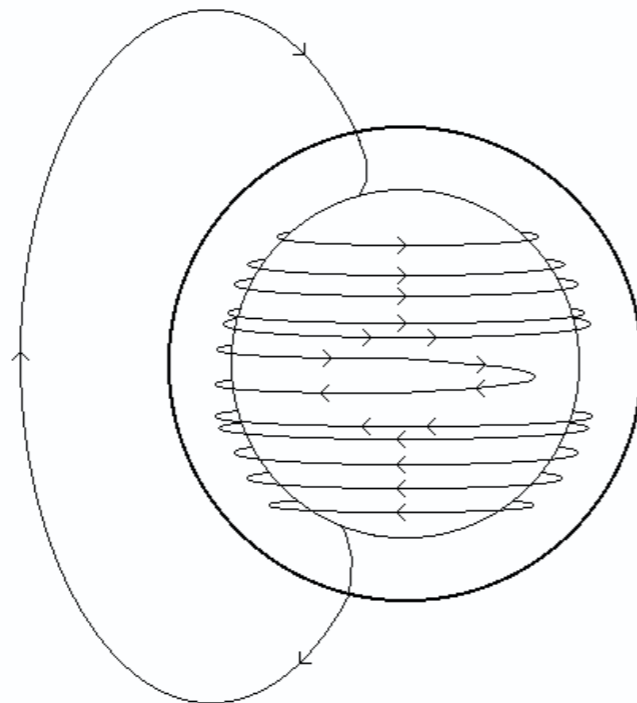
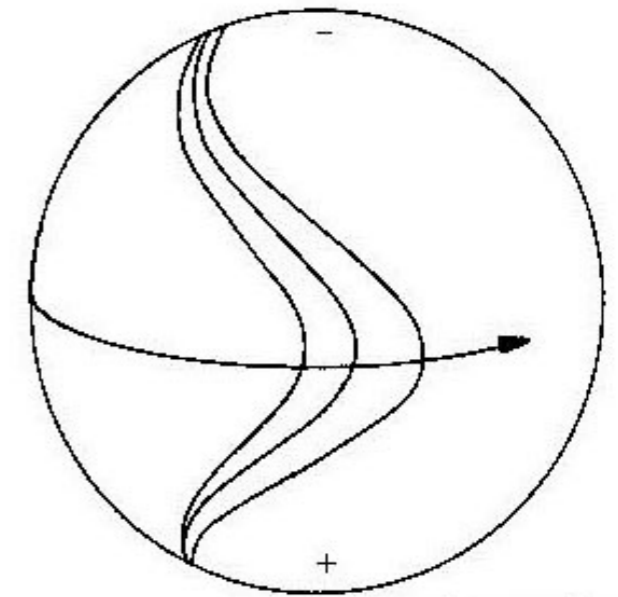
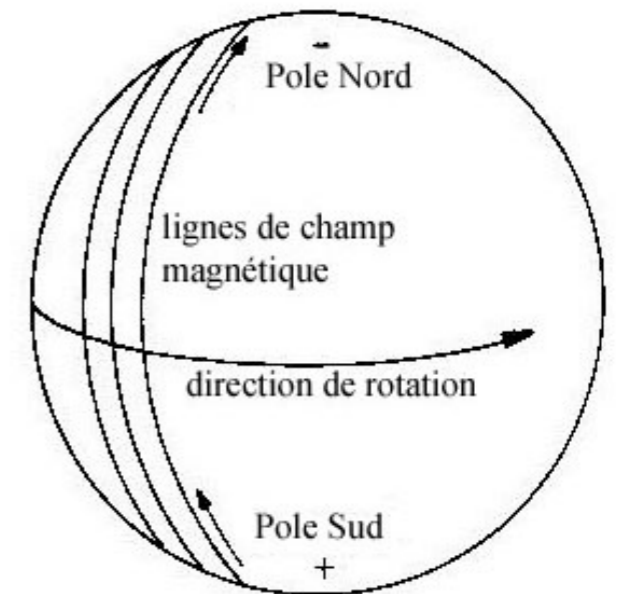


# Cycle magnétique du Soleil

- ◆ Polarité identique pour tous les groupes d'un hémisphère:
  - ✿ Tache de tête de polarité N (ou S) et tache de queue de polarité S (ou N)
- ◆ Polarité opposée des groupes dans les deux hémisphères:
  - ✿ Ordre N-S et S-N
- ◆ Inversion des polarités d'un cycle solaire au suivant:
  - ✿ Durée réelle d'un cycle = 22 ans (cycle de Hale)

# Dynamo solaire: l'effet $\omega$

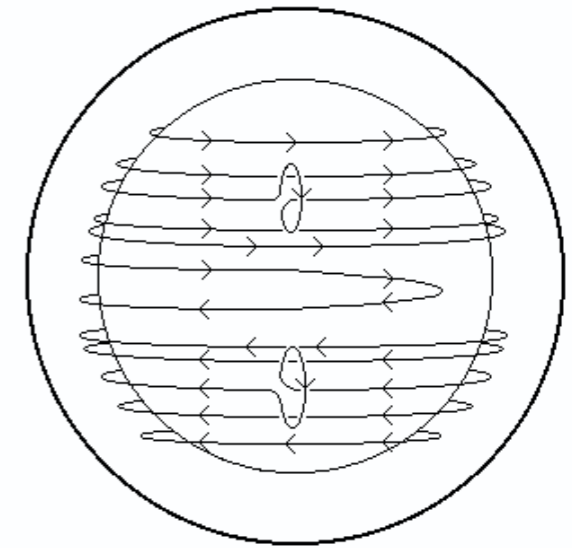
- Transforme le champ poloïdal en champ toroïdal, **tout en l'amplifiant**
- Lignes de force du champ magnétique figées dans la matière sous la surface:
  - Le champ poloïdal (dipolaire) est donc étiré et enroulé par la rotation différentielle > amplification.
  - Enroulement d'un tour complet en 8 mois
  - Production d'un champ toroïdal de direction opposée de part et d'autre de l'équateur



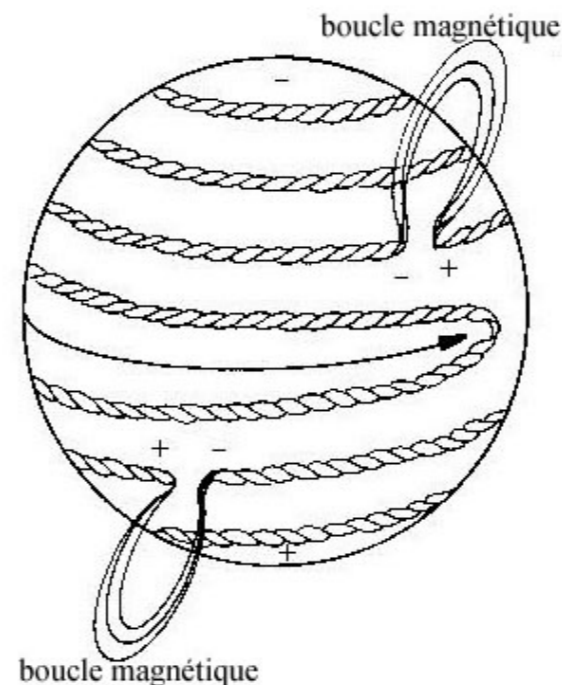
The  $\omega$ -effect

# Dynamo solaire: l'effet $\alpha$

- Transforme le champ toroïdal en champ quasi poloïdal.
- La boucle de champ monte ensuite à la surface (cf plus loin).
- Nettement plus complexe.
- L'énergie qui entretient la dynamo solaire provient de l'énergie cinétique de rotation *et* des mouvements de fluide à petite échelle *dans la couche convective*.



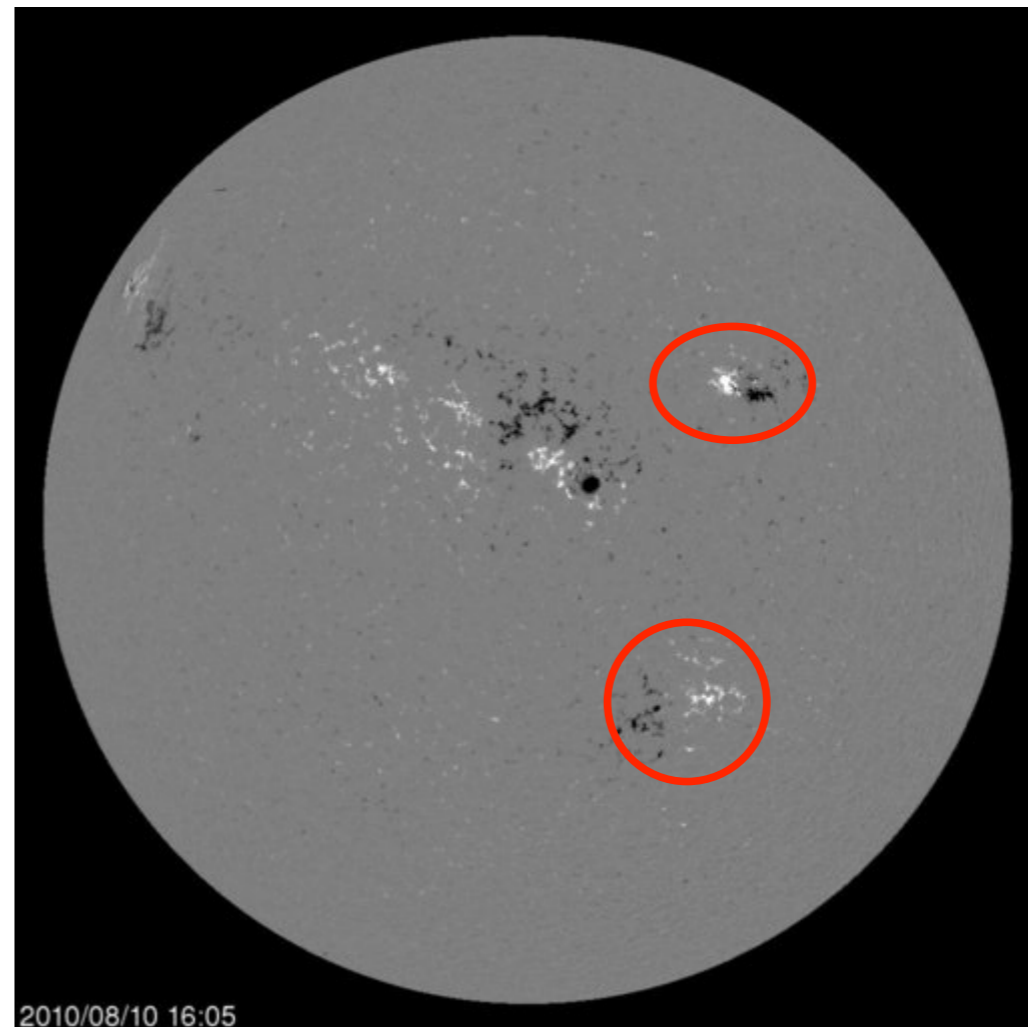
The  $\alpha$ -effect





# Cycle: génération des taches par rotation différentiel

- Différence entre les hémisphères: polarités magnétiques
- Les régions actives sont les parties émergées d'un champ magnétique global du Soleil



[http://sohodata.nascom.nasa.gov/cgi-bin/data\\_query](http://sohodata.nascom.nasa.gov/cgi-bin/data_query)

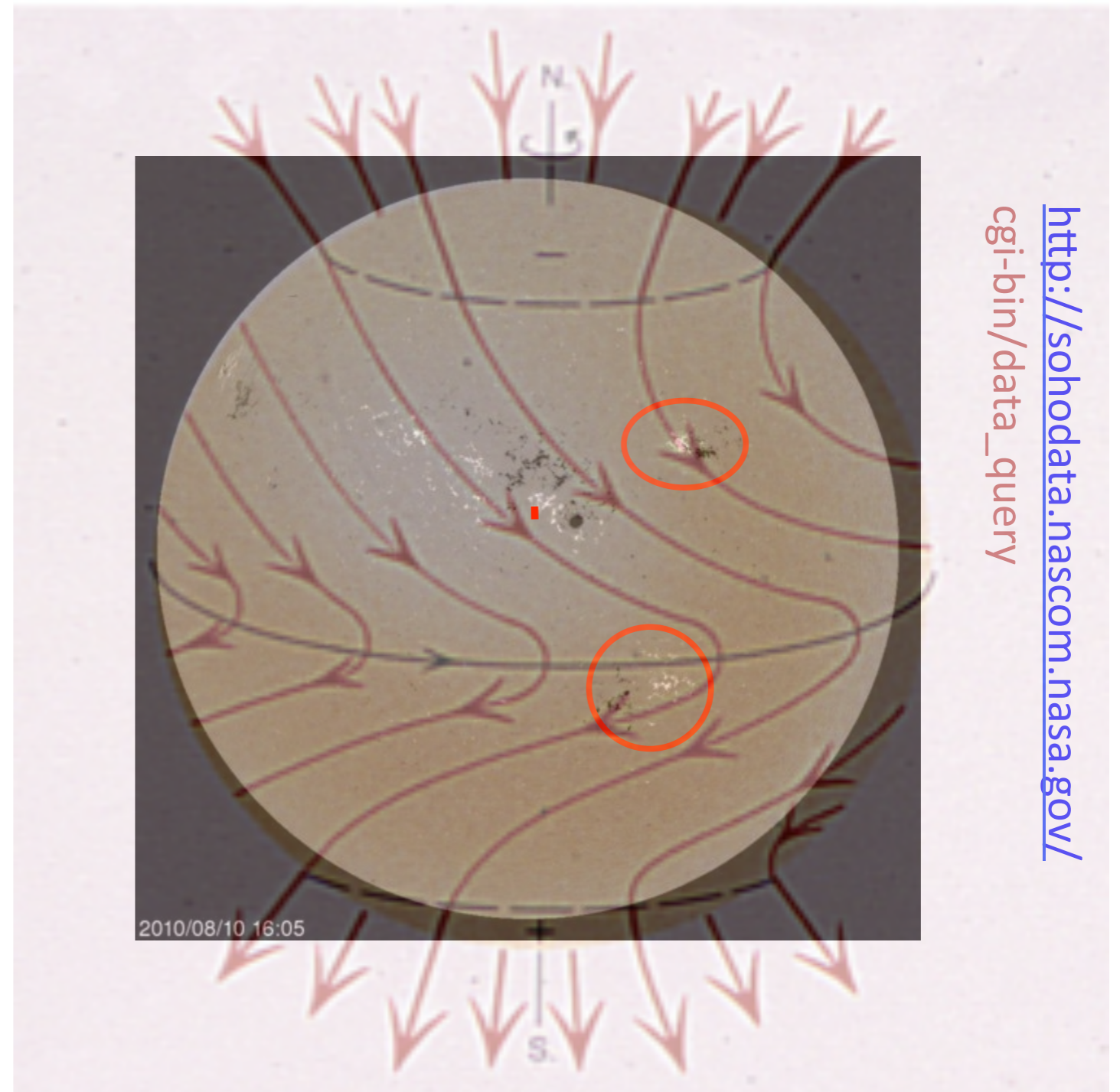
Orientation du champ magnétique:

- blanc vers l'observateur
- noir vers le Soleil

*courtesy L. Klein / F. Clette*

# Cycle: génération des taches par rotation différentiel

- Différence entre les hémisphères: polarités magnétiques
- Les régions actives sont les parties émergées d'un champ magnétique global du Soleil



Orientation du champ magnétique:

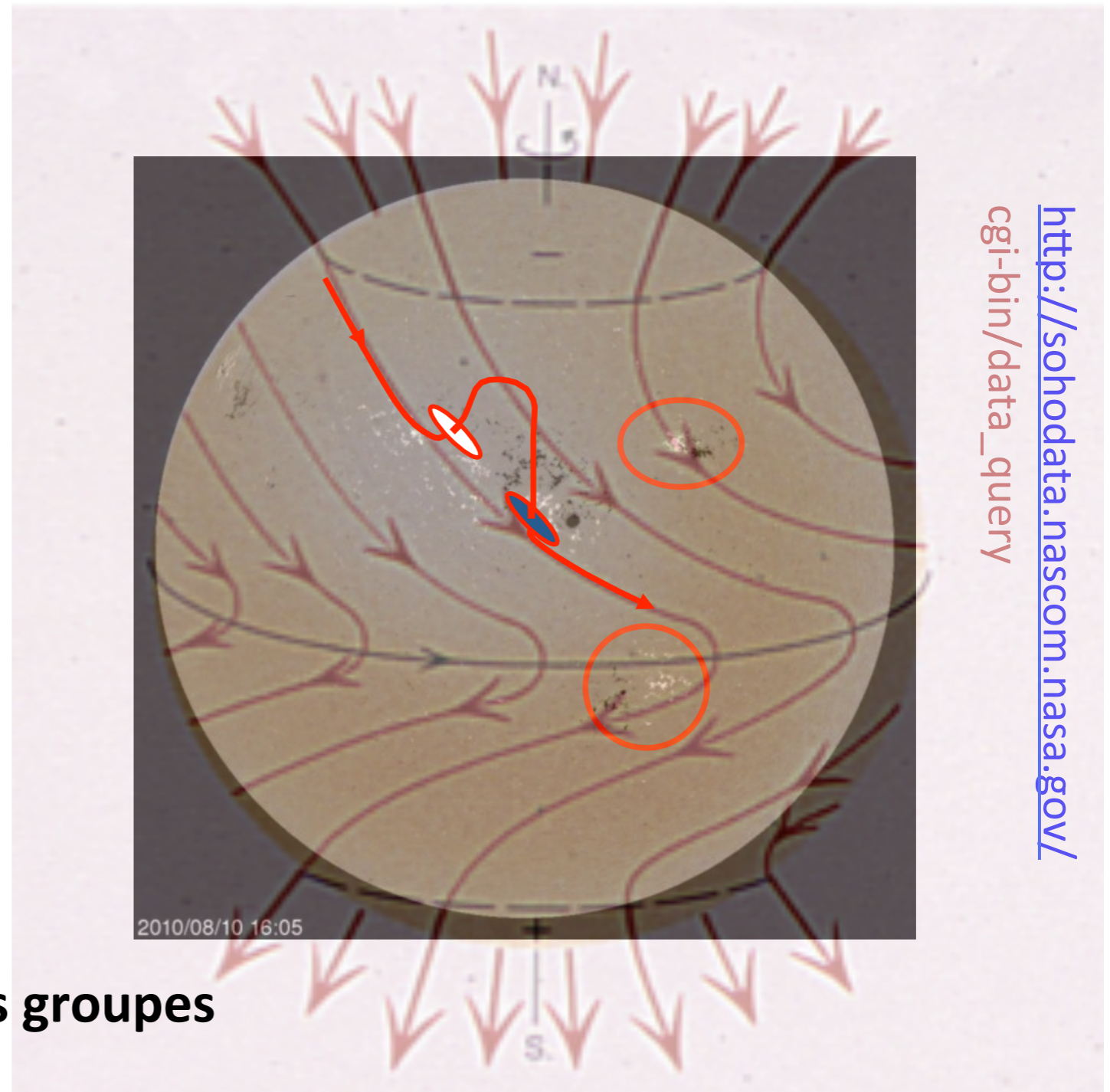
- blanc vers l'observateur
- noir vers le Soleil

*courtesy L. Klein / F. Clette*



# Cycle: génération des taches par rotation différentiel

- Différence entre les hémisphères: polarités magnétiques
- Les régions actives sont les parties émergées d'un champ magnétique global du Soleil



## Loi de Hale:

- **Polarité identique pour tous les groupes d'un hémisphère**
- **Polarité opposée des groupes dans les deux hémisphères**
- **Inclinaison des taches par rapport à l'équateur.**

Orientation du champ magnétique:

- blanc vers l'observateur
- noir vers le Soleil

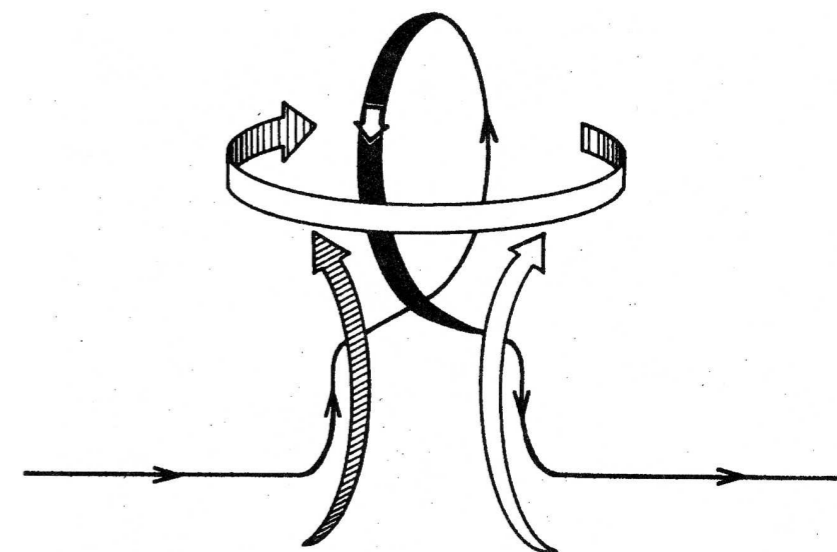
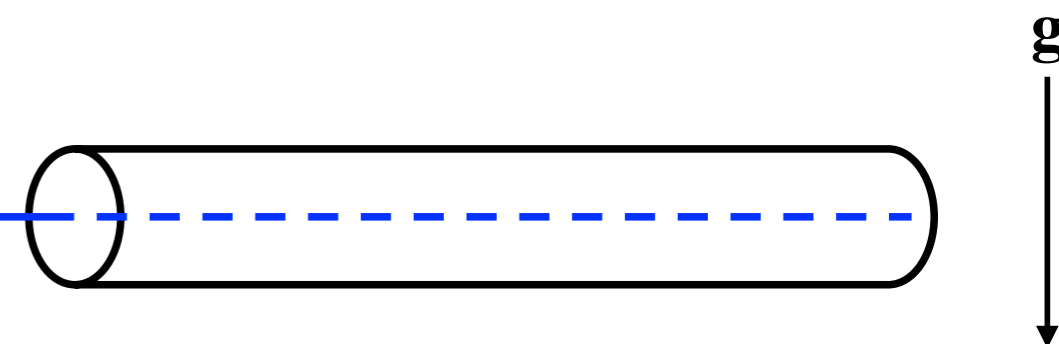
*courtesy L. Klein / F. Clette*

# Ascendance et torsion des boucles magnétiques

- Un champ magnétique exerce une pression sur le milieu environnant:  $B^2/2\mu_0$
- Évacuation du plasma contenu dans le tube de flux magnétique jusqu'à équilibre de pression avec le plasma environnant non magnétisé:
  - La boucle, moins dense que le plasma ambiant, monte vers la surface:

➔ Formation d'une boucle en  $\Omega$

- Au cours de son ascension, la boucle subit une rotation par la force de Coriolis:
  - Inclinaison du dipôle par rapport à l'équateur (sens opposé dans les deux hémisphères)
  - Hélicité du champ émergent (énergie potentielle)

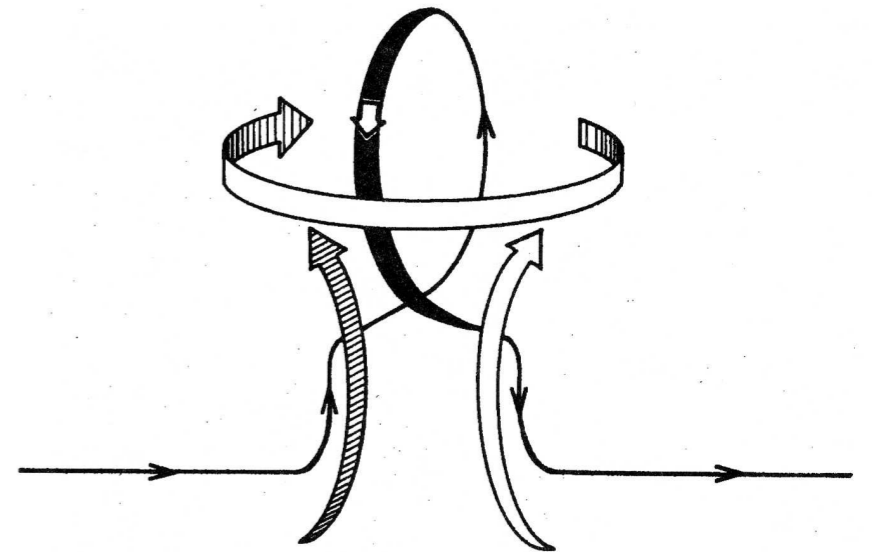
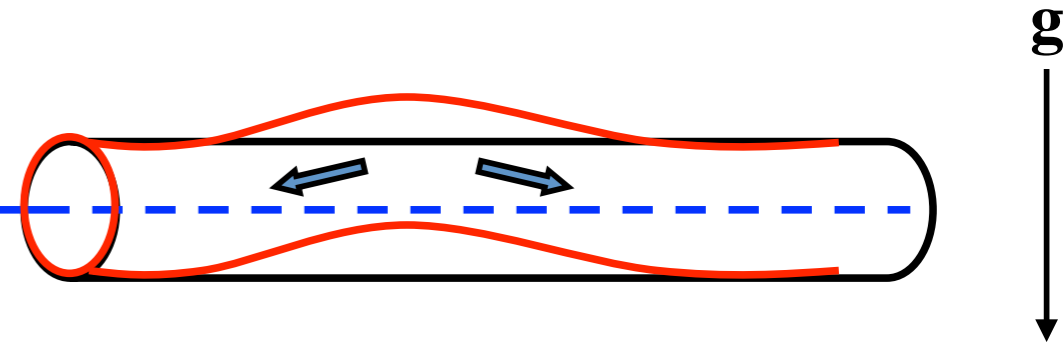


# Ascendance et torsion des boucles magnétiques

- Un champ magnétique exerce une pression sur le milieu environnant:  $B^2/2\mu_0$
- Évacuation du plasma contenu dans le tube de flux magnétique jusqu'à équilibre de pression avec le plasma environnant non magnétisé:
  - La boucle, moins dense que le plasma ambiant, monte vers la surface:

**➔** Formation d'une boucle en  $\Omega$


- Au cours de son ascension, la boucle subit une rotation par la force de Coriolis:
  - Inclinaison du dipôle par rapport à l'équateur (sens opposé dans les deux hémisphères)
  - Hélicité du champ émergent (énergie potentielle)



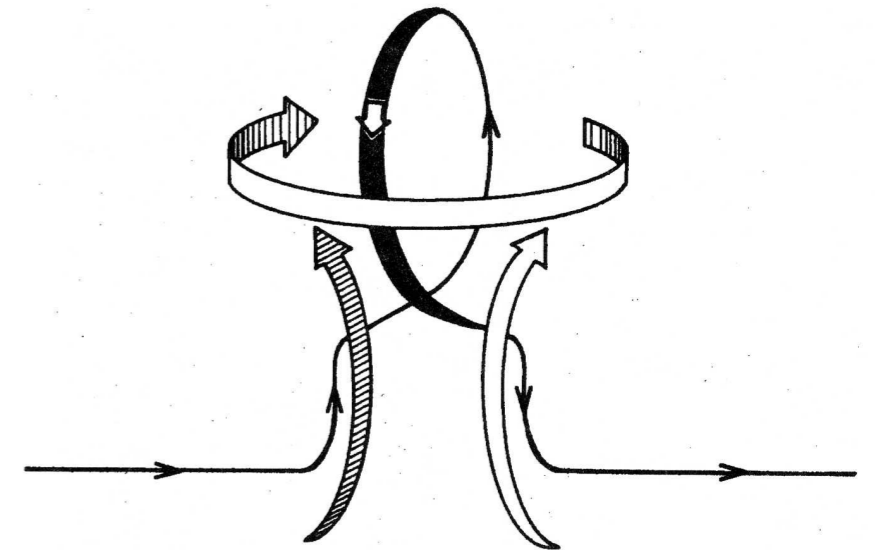
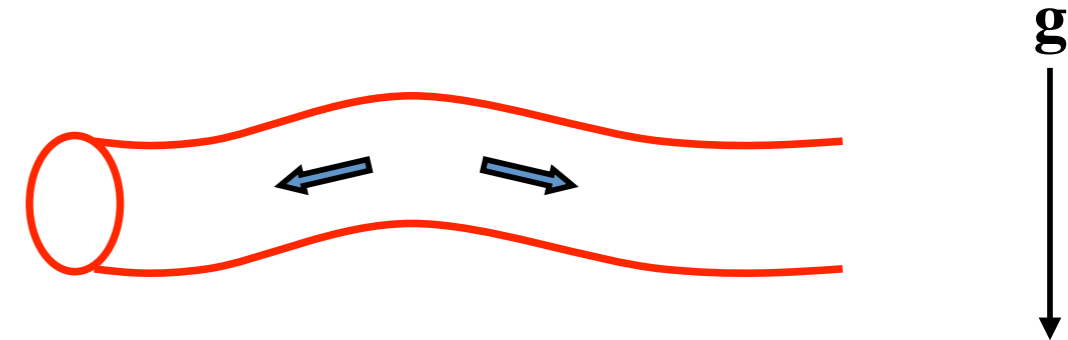


# Ascendance et torsion des boucles magnétiques

- Un champ magnétique exerce une pression sur le milieu environnant:  $B^2/2\mu_0$
- Évacuation du plasma contenu dans le tube de flux magnétique jusqu'à équilibre de pression avec le plasma environnant non magnétisé:
  - La boucle, moins dense que le plasma ambiant, monte vers la surface:


 Formation d'une boucle en  $\Omega$

- Au cours de son ascension, la boucle subit une rotation par la force de Coriolis:
  - Inclinaison du dipôle par rapport à l'équateur (sens opposé dans les deux hémisphères)
  - Hélicité du champ émergent (énergie potentielle)

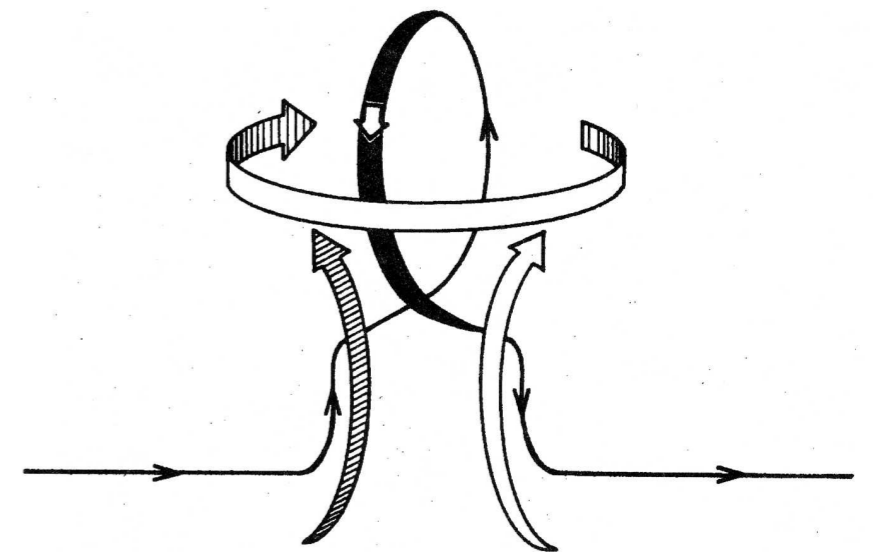
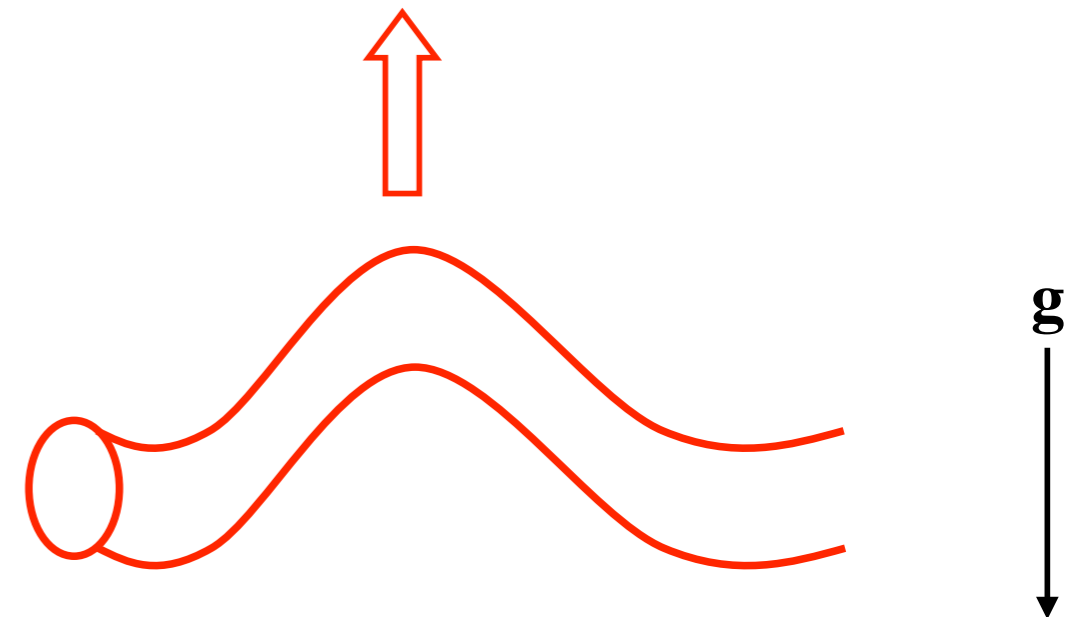


# Ascendance et torsion des boucles magnétiques

- Un champ magnétique exerce une pression sur le milieu environnant:  $B^2/2\mu_0$
- Évacuation du plasma contenu dans le tube de flux magnétique jusqu'à équilibre de pression avec le plasma environnant non magnétisé:
  - La boucle, moins dense que le plasma ambiant, monte vers la surface:

 Formation d'une boucle en  $\Omega$

- Au cours de son ascension, la boucle subit une rotation par la force de Coriolis:
  - Inclinaison du dipôle par rapport à l'équateur (sens opposé dans les deux hémisphères)
  - Hélicité du champ émergent (énergie potentielle)

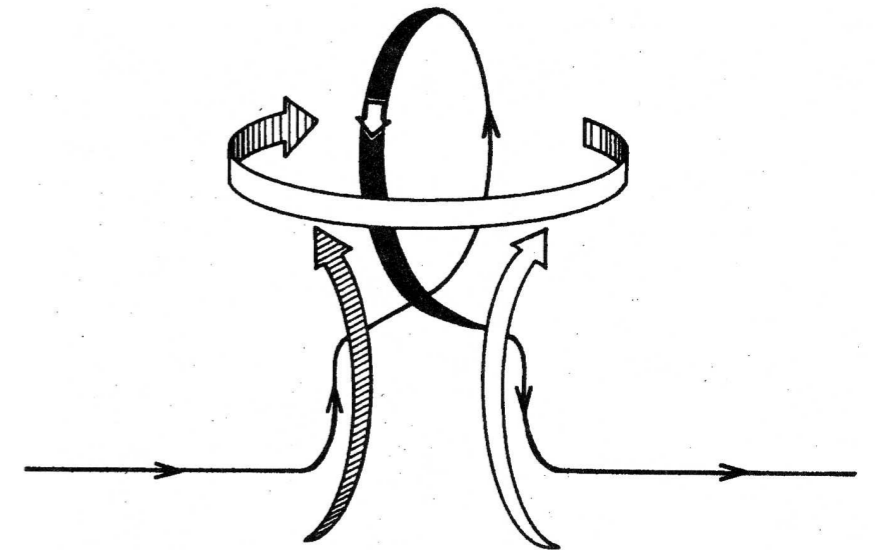
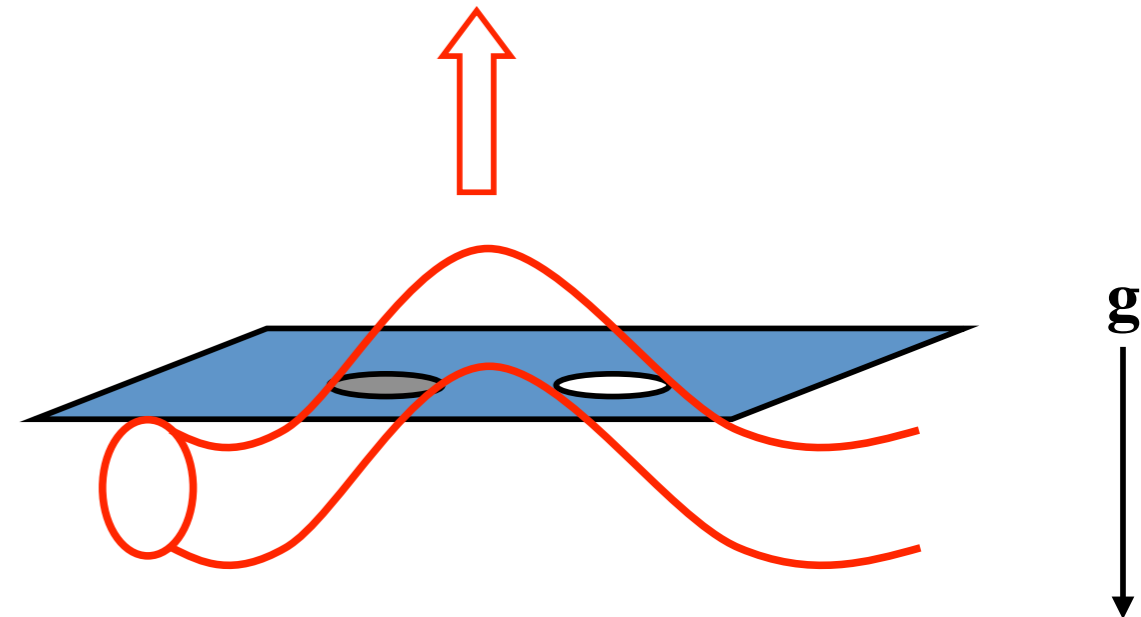


# Ascendance et torsion des boucles magnétiques

- Un champ magnétique exerce une pression sur le milieu environnant:  $B^2/2\mu_0$
- Évacuation du plasma contenu dans le tube de flux magnétique jusqu'à équilibre de pression avec le plasma environnant non magnétisé:
  - La boucle, moins dense que le plasma ambiant, monte vers la surface:

➔ Formation d'une boucle en  $\Omega$

- Au cours de son ascension, la boucle subit une rotation par la force de Coriolis:
  - Inclinaison du dipôle par rapport à l'équateur (sens opposé dans les deux hémisphères)
  - Hélicité du champ émergent (énergie potentielle)



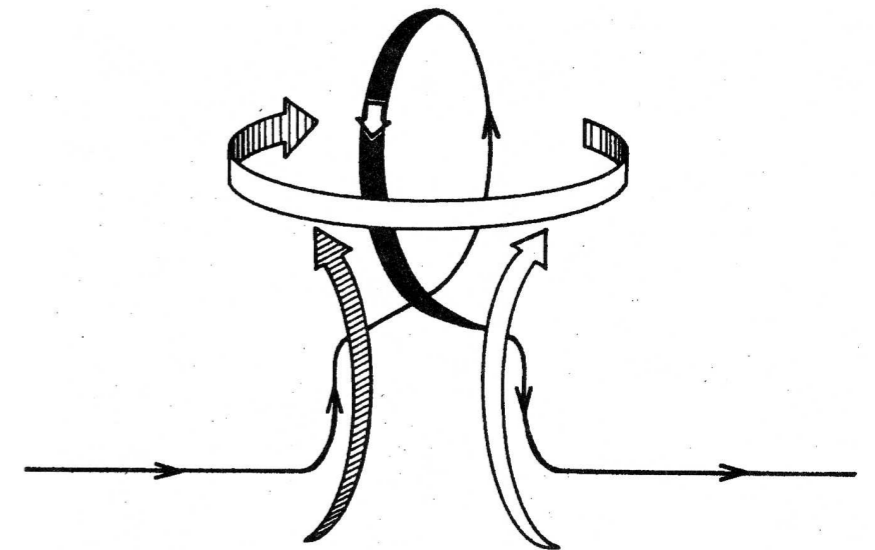
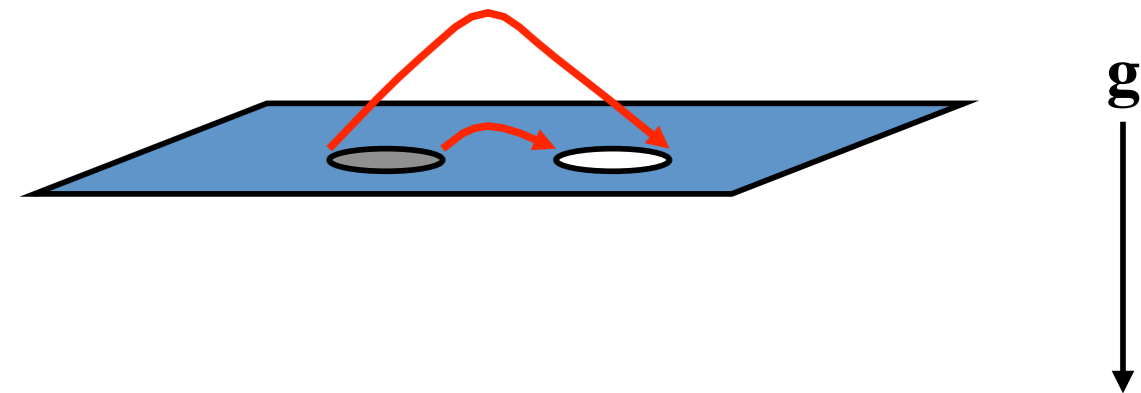


# Ascendance et torsion des boucles magnétiques

- Un champ magnétique exerce une pression sur le milieu environnant:  $B^2/2\mu_0$
- Évacuation du plasma contenu dans le tube de flux magnétique jusqu'à équilibre de pression avec le plasma environnant non magnétisé:
  - La boucle, moins dense que le plasma ambiant, monte vers la surface:

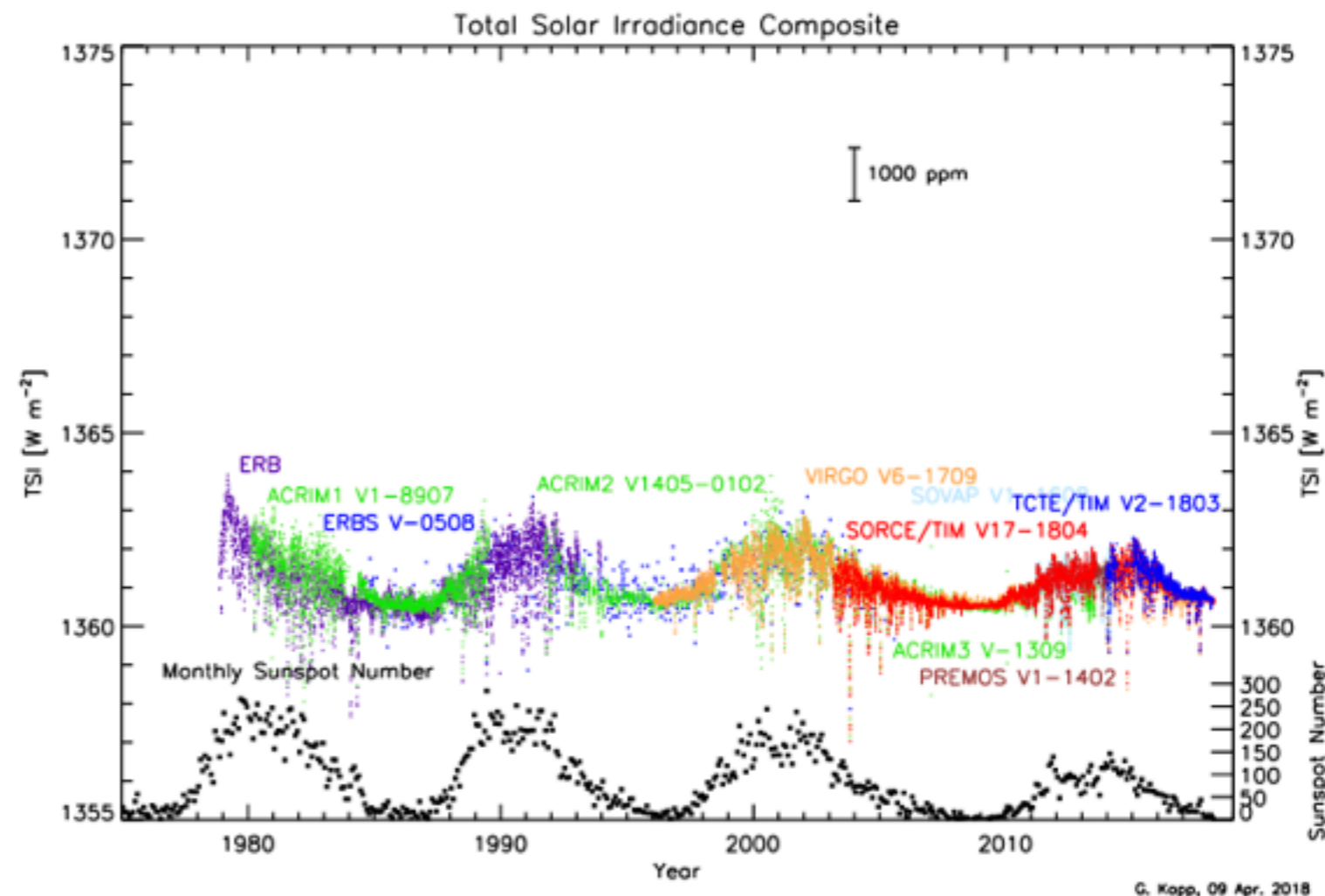
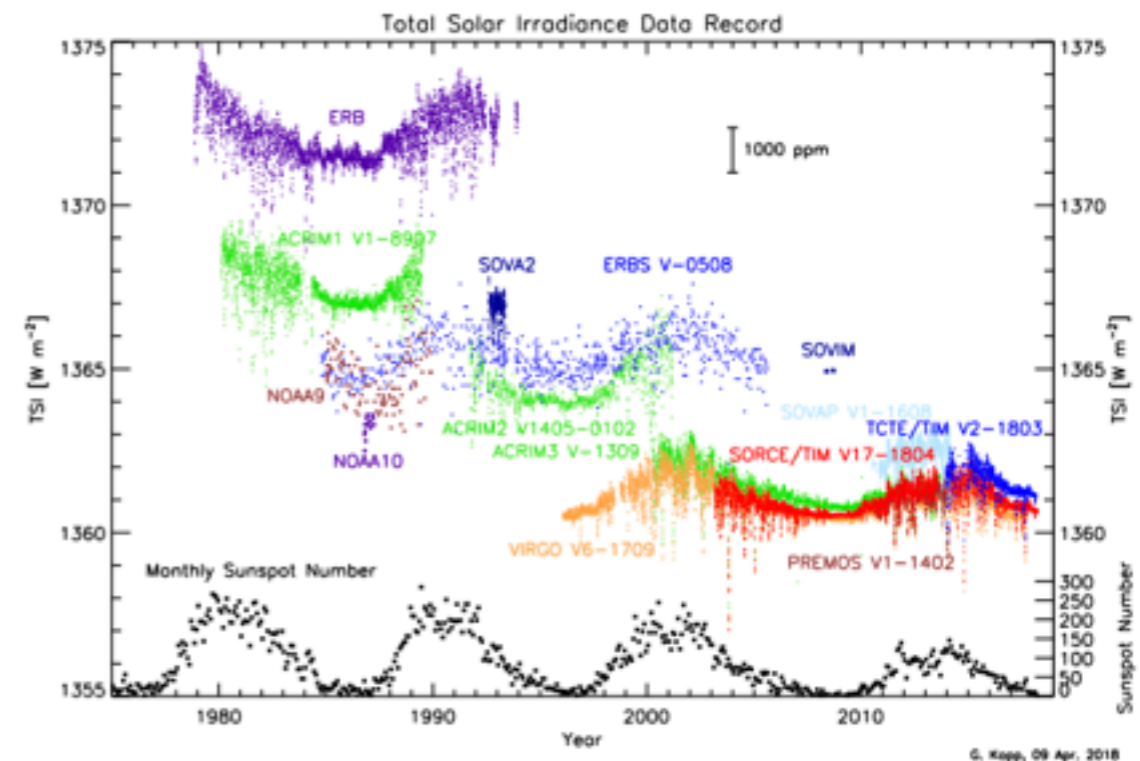
➔ Formation d'une boucle en  $\Omega$

- Au cours de son ascension, la boucle subit une rotation par la force de Coriolis:
  - Inclinaison du dipôle par rapport à l'équateur (sens opposé dans les deux hémisphères)
  - Hélicité du champ émergent (énergie potentielle)

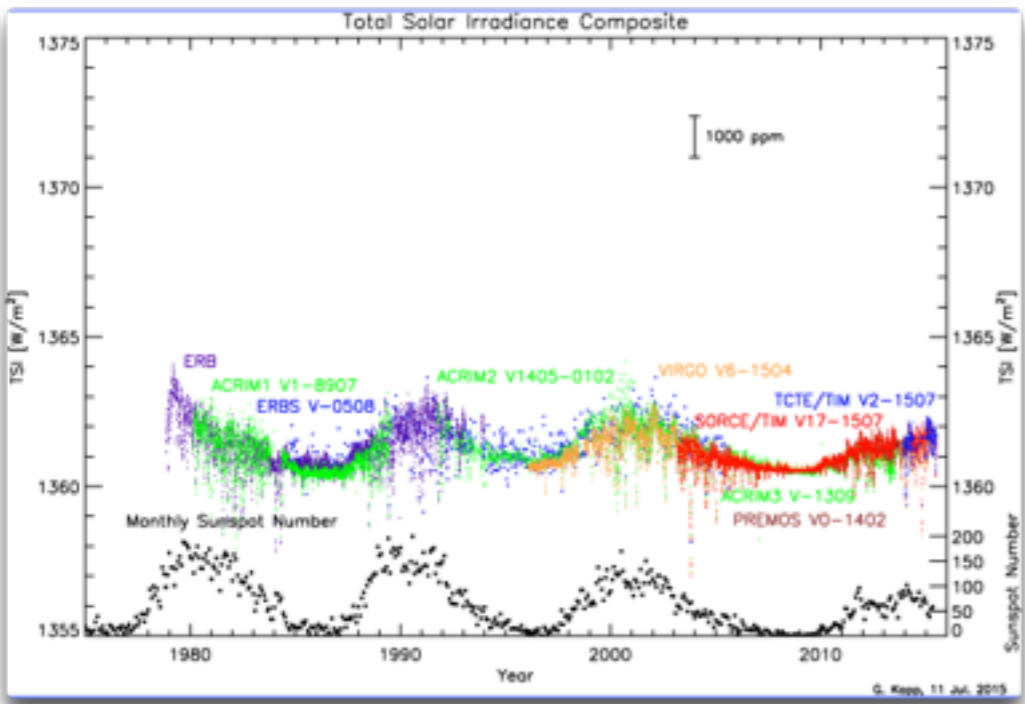


# Variations de l'irradiance totale sur le cycle solaire

- ◆ Irradiance: amount of solar radiative energy flux received at 1AU on 1m<sup>2</sup>
- ◆ TSI: spectrally integrated irradiance
  - ✿ measured from space with bolometers (black paints absorbing all wavelengths)
  - ✿ Challenge: absolute scale and degradation
- ◆ The TSI is in phase with the number of sunspots



# Influence du soleil sur le climat



+

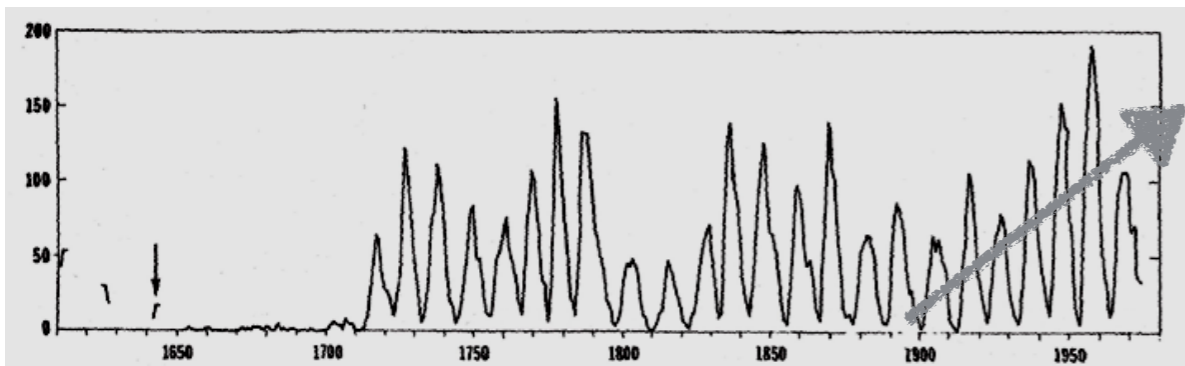
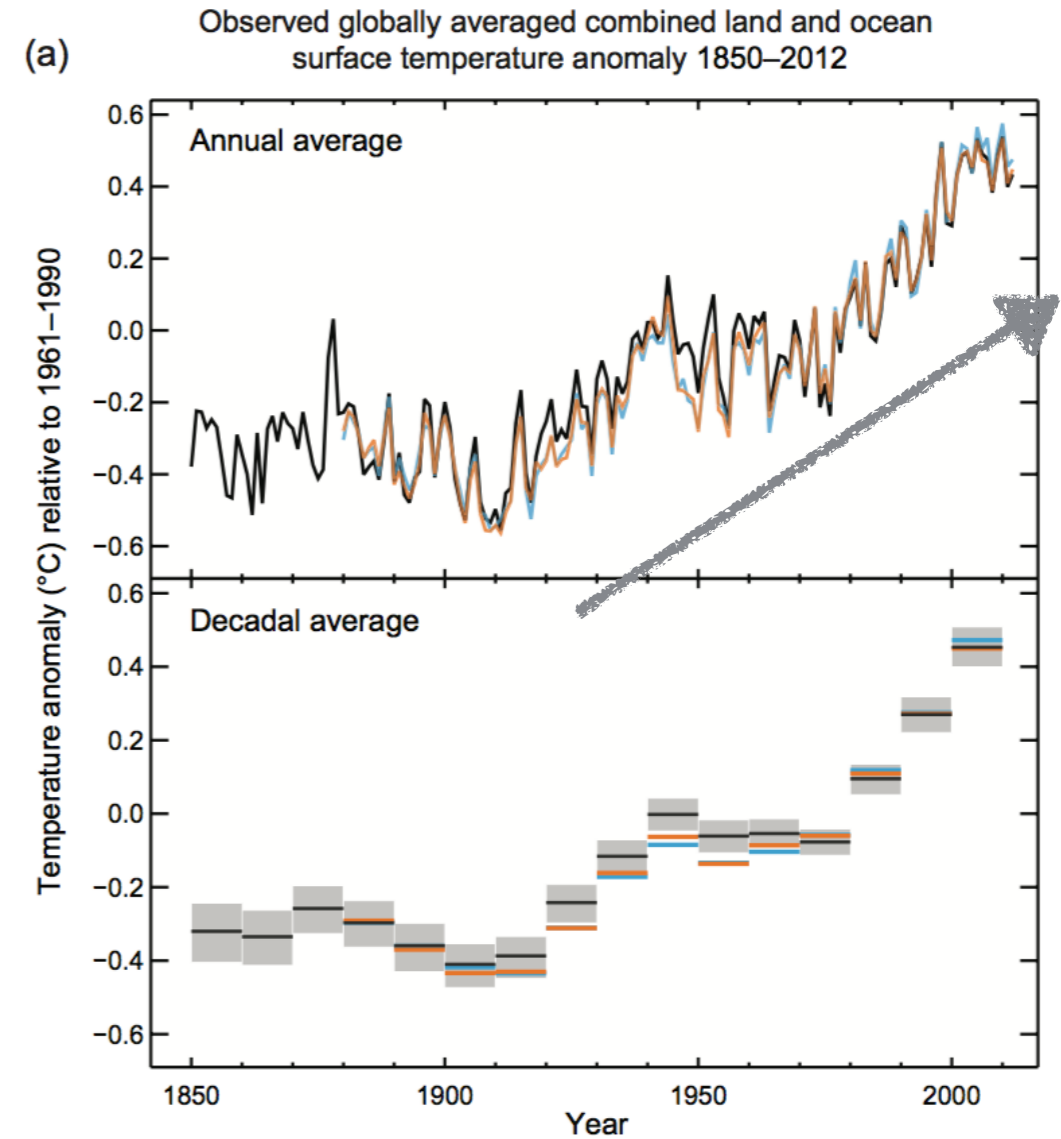


Fig. 1. Annual mean sunspot numbers, A.D. 1610-1974, from Waldmeier (1961) and Eddy (1976). Arrow marks the period of this study, 1642-1644.

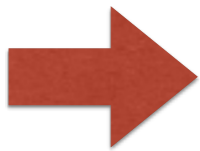
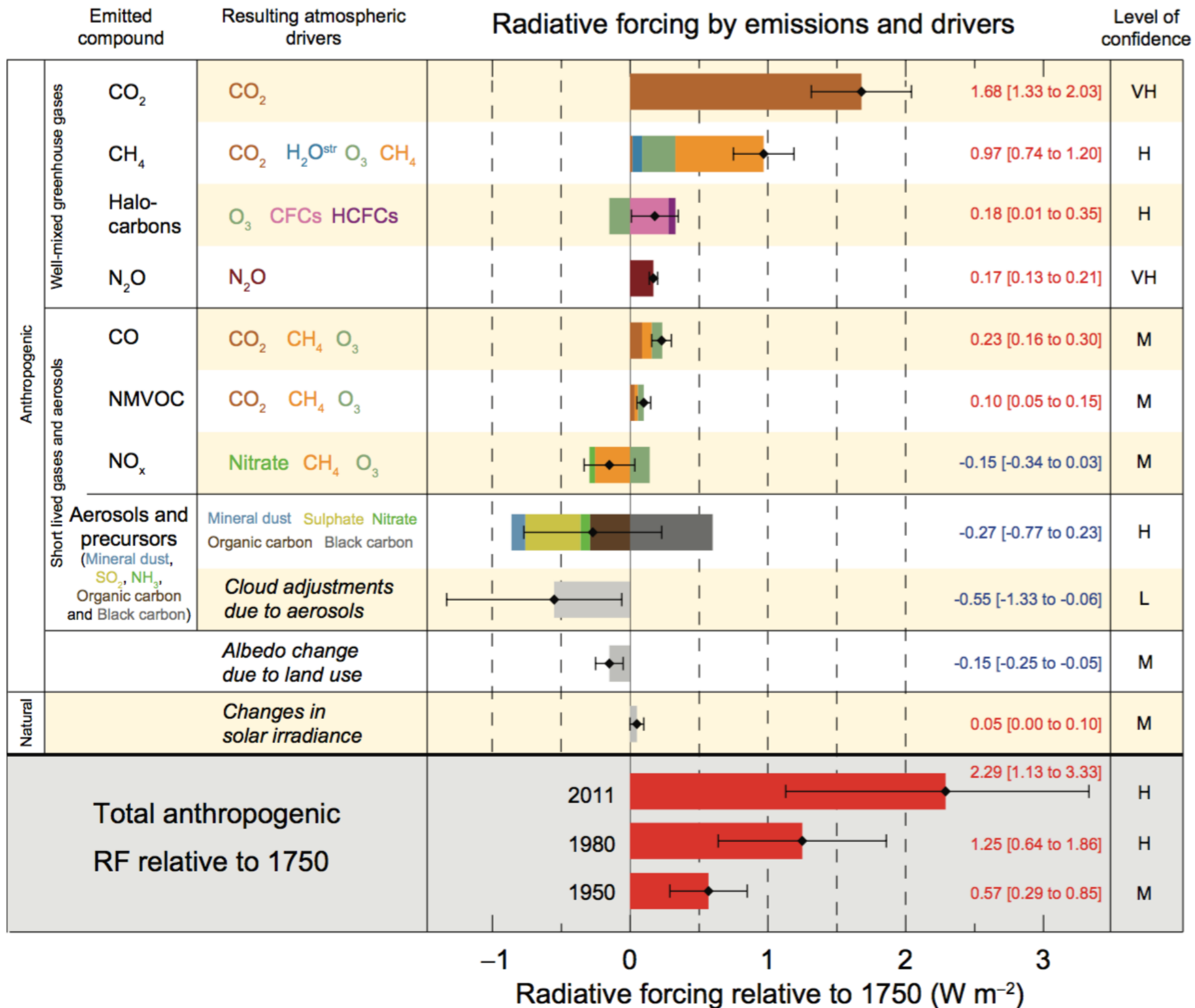
?

||



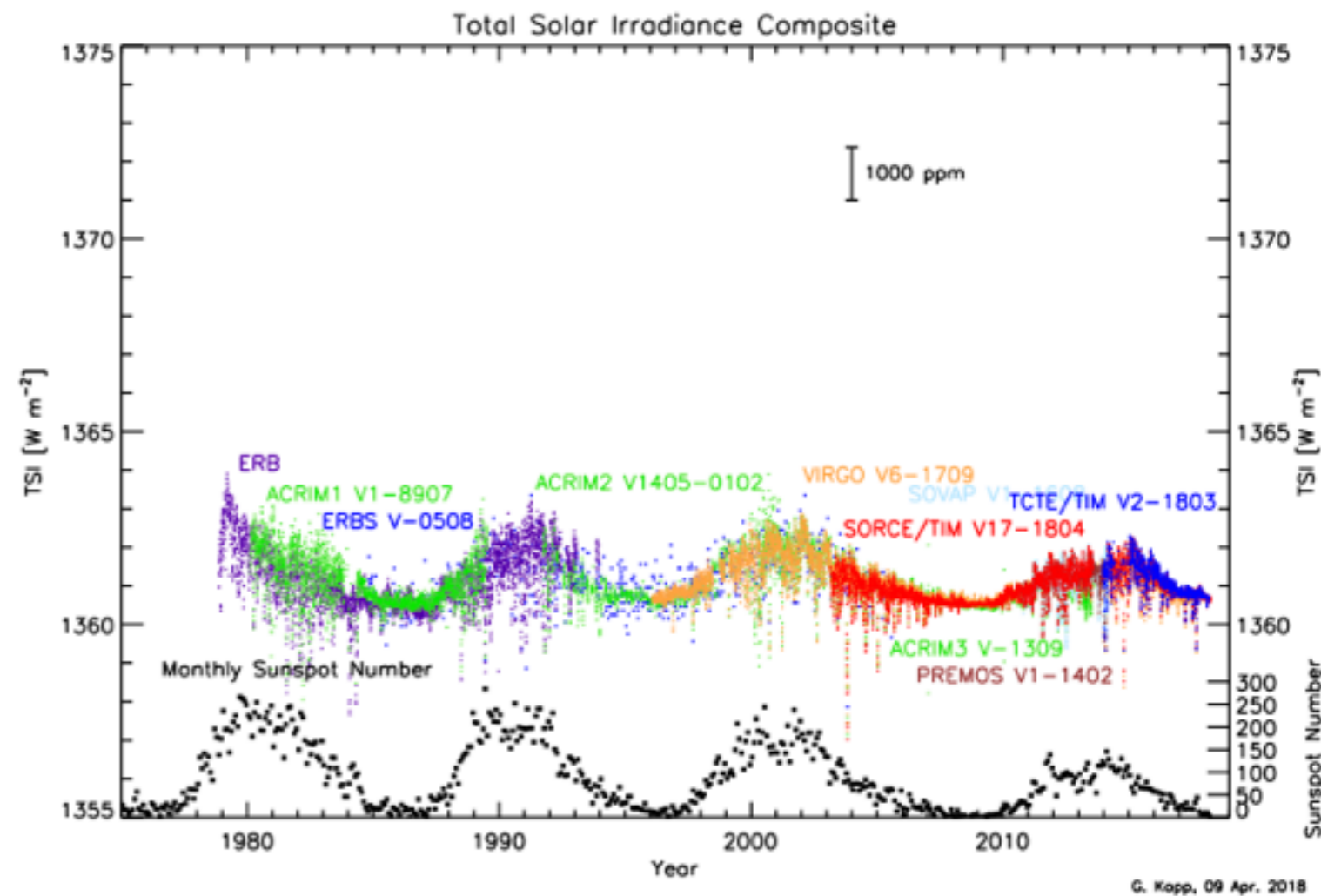
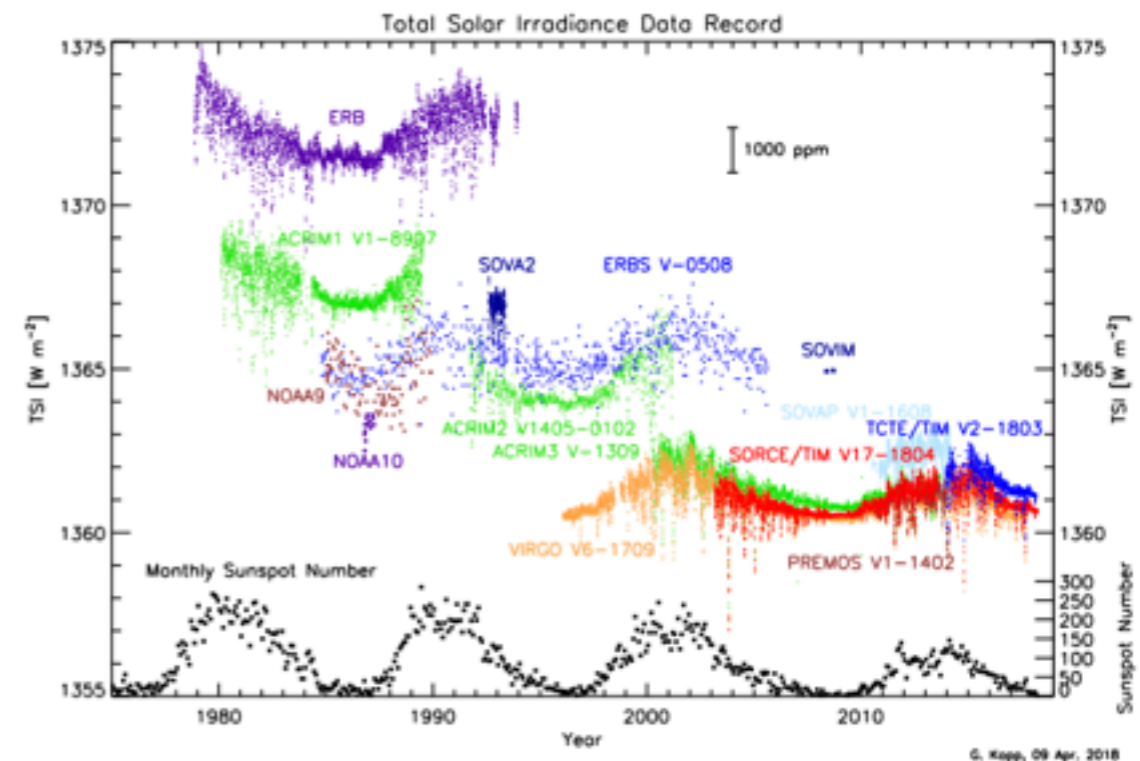


# Influence du soleil sur le climat



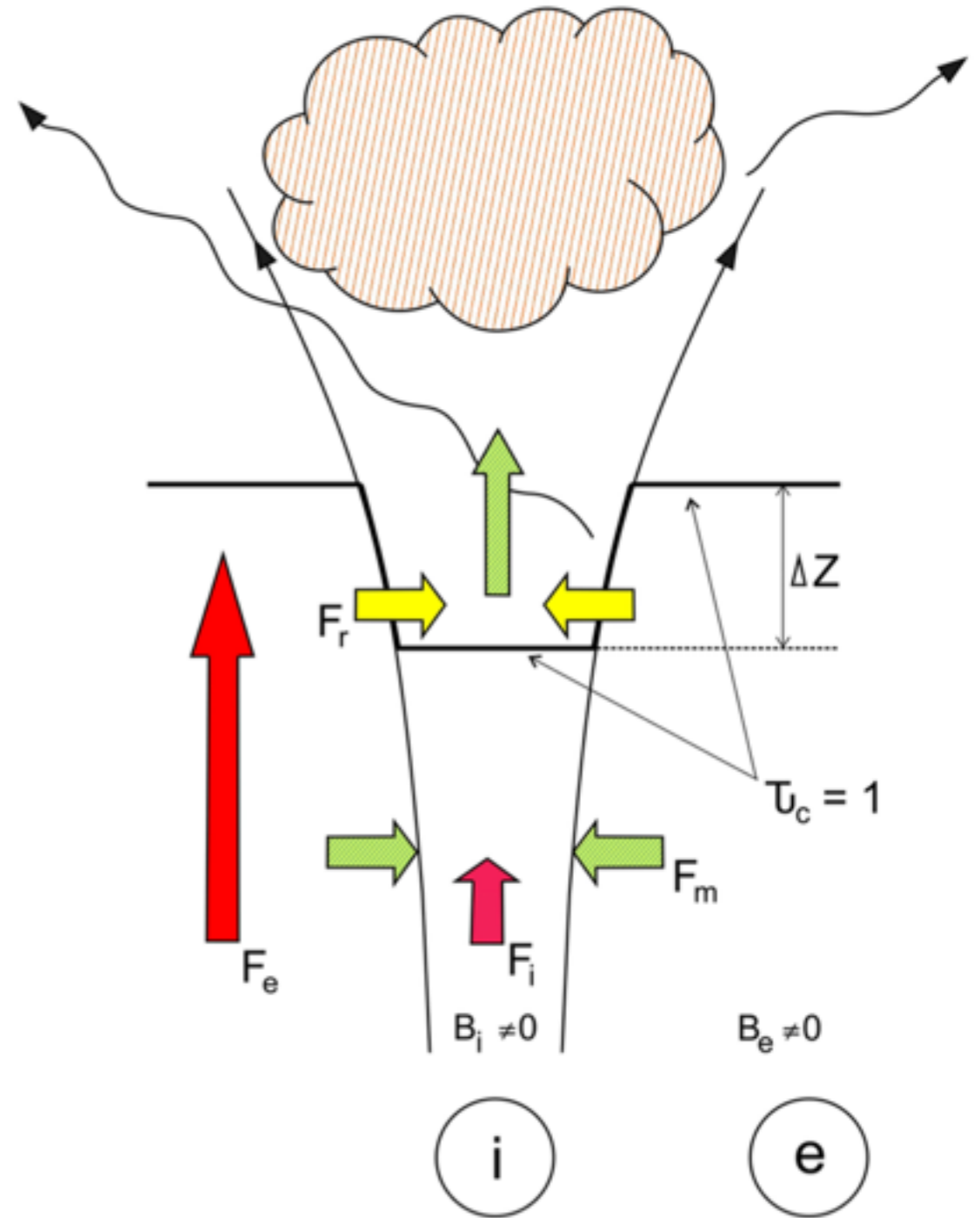
# Variations de l'irradiance totale sur le cycle solaire

- ◆ Irradiance: amount of solar radiative energy flux received at 1AU on 1m<sup>2</sup>
- ◆ TSI: spectrally integrated irradiance
  - ✿ measured from space with bolometers (black paints absorbing all wavelengths)
  - ✿ Challenge: absolute scale and degradation
- ◆ The TSI is in phase with the number of sunspots



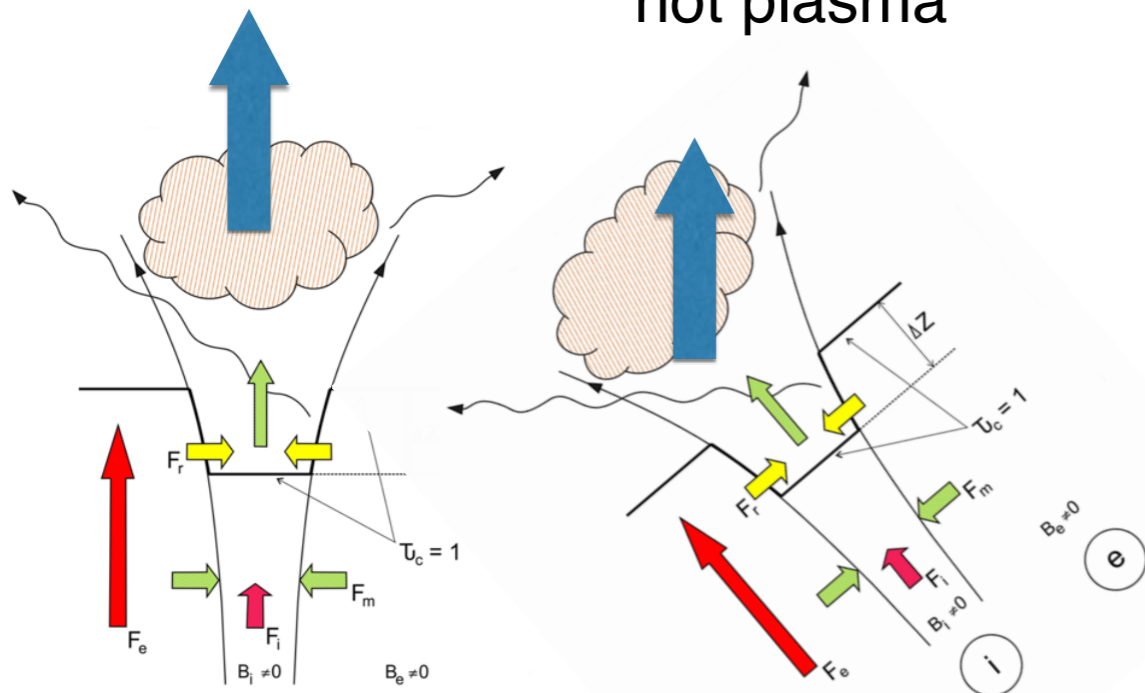
# Intensité des structures solaires

- ◆ Compétition entre inhibition de la convection et chauffage radiatif par les murs chauds.
  - ✿ Si le tube est gros, le chauffage radiatif est inefficace -> tâche
  - ✿ Si le tube est petit, le chauffage radiatif l'emporte -> facule



Light is coming from the cold and dark plasma

Light is coming from the hot plasma

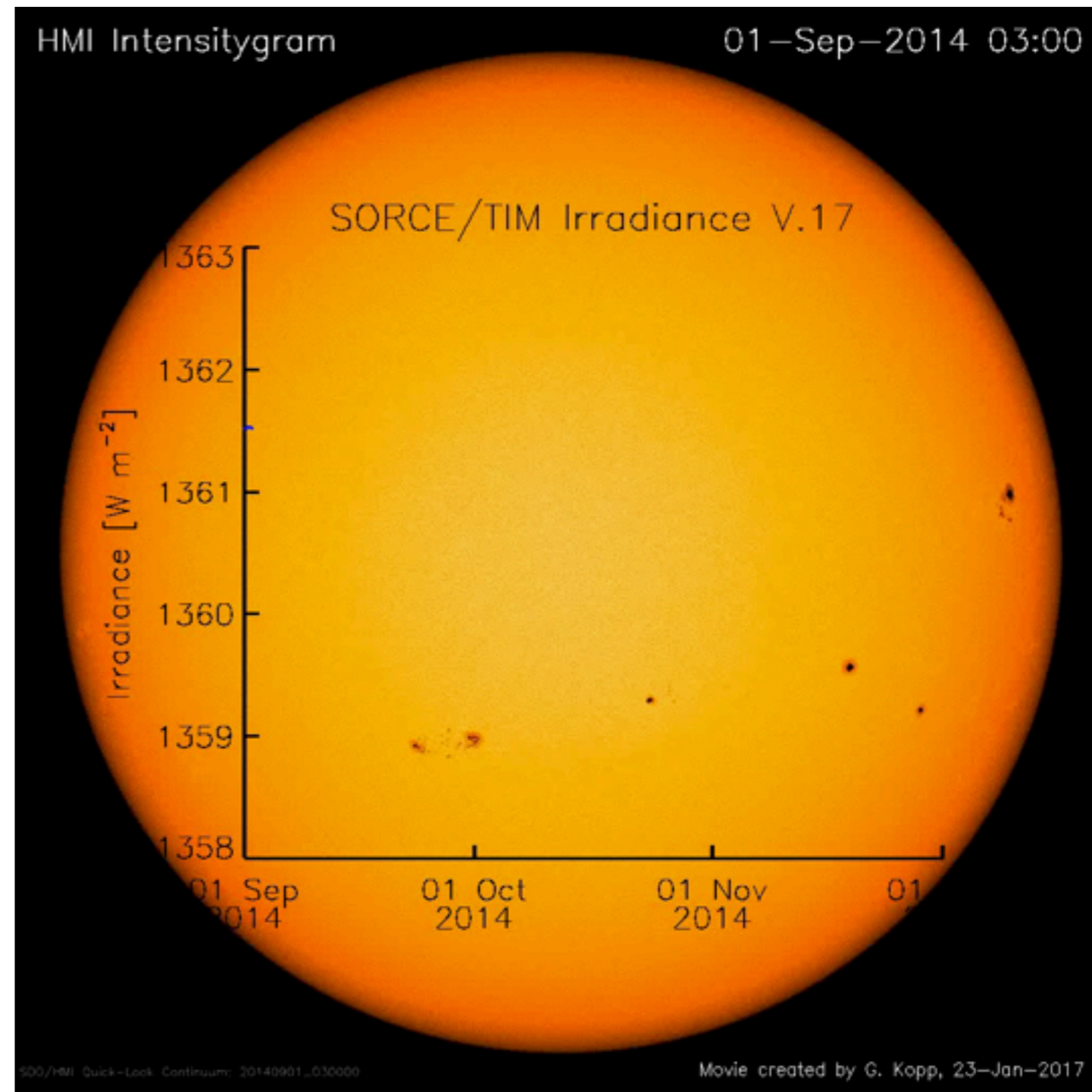
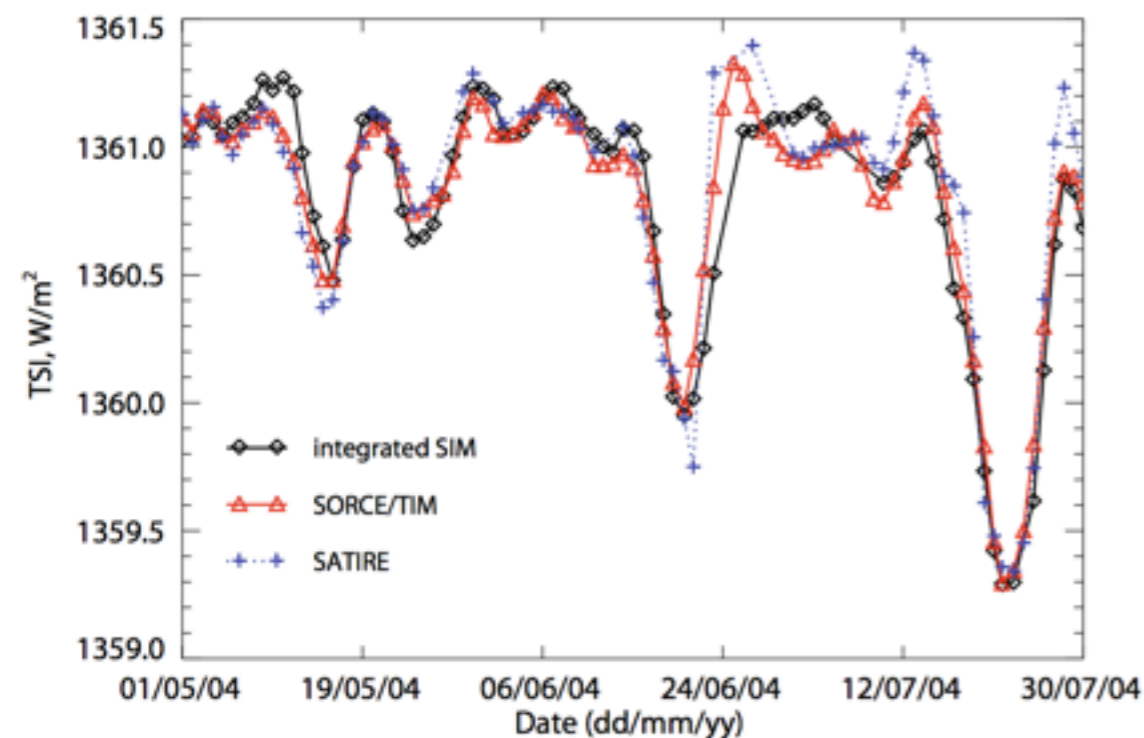


- ◆ L'énergie se propage le long du champ et chauffe la plus haute atmosphère, tache plus brillante dans la chromosphère

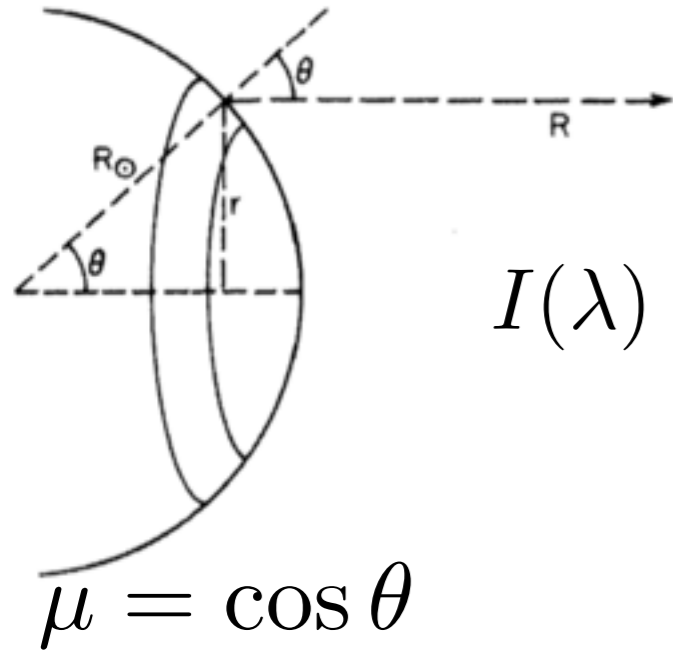


# Effets à court terme des taches et facules sur la TSI

- ◆ Spots decrease TSI
- ◆ Best seen where spots are near the disc center
- ◆ Faculae are visible near the limb only in visible, but contributes to TSI.



# Modèles semi-empiriques d'Irradiancie



$$I(\lambda) = \int_0^{\pi/2} L(\lambda, \theta) \cos \theta \times \frac{2\pi R_{\odot} \sin \theta \times R_{\odot} d\theta}{d^2}$$

$$\rightarrow I(\lambda) = \frac{2\pi R_{\odot}^2}{d^2} L_{qs}(\lambda) \sum_i \sum_{\mu} f_i(t) C_i(\lambda) \rho_i(\lambda, \mu) \mu$$

$$C_i(\lambda) = \frac{L_i(\lambda, \mu = 1)}{L_{QS}(\lambda, \mu = 1)}$$

Contraste de la structure  $i$

$$\rho_i(\lambda, \mu) = \frac{L_i(\lambda, \mu)}{L_i(\lambda, \mu = 1)}$$

Variation centre-bord de la structure  $i$

Modèles  
atmosphère +  
transfert  
radiatif

$f_i(t)$

Facteur de remplissage de la structure  $i$

magnetogrammes + image

# Modèles empiriques d'Irradiance

$$I(\lambda, t) = I_Q(\lambda, t) + \frac{2\pi R_{\odot}^2}{d^2} L_{QS}(\lambda, t) \times [$$

$$\sum_{i_F} \sum_{\mu} f_{i_F}(\mu, t) [C_{i_F}(\lambda) \rho_{i_F}(\lambda, \mu) - \rho_{QS}(\lambda, \mu)] +$$

Contribution structures brillantes

$$\sum_{i_S} \sum_{\mu} f_{i_S}(\mu, t) [C_{i_S}(\lambda) \rho_{i_S}(\lambda, \mu) - \rho_{QS}(\lambda, \mu)] ]$$

Contribution structures sombres

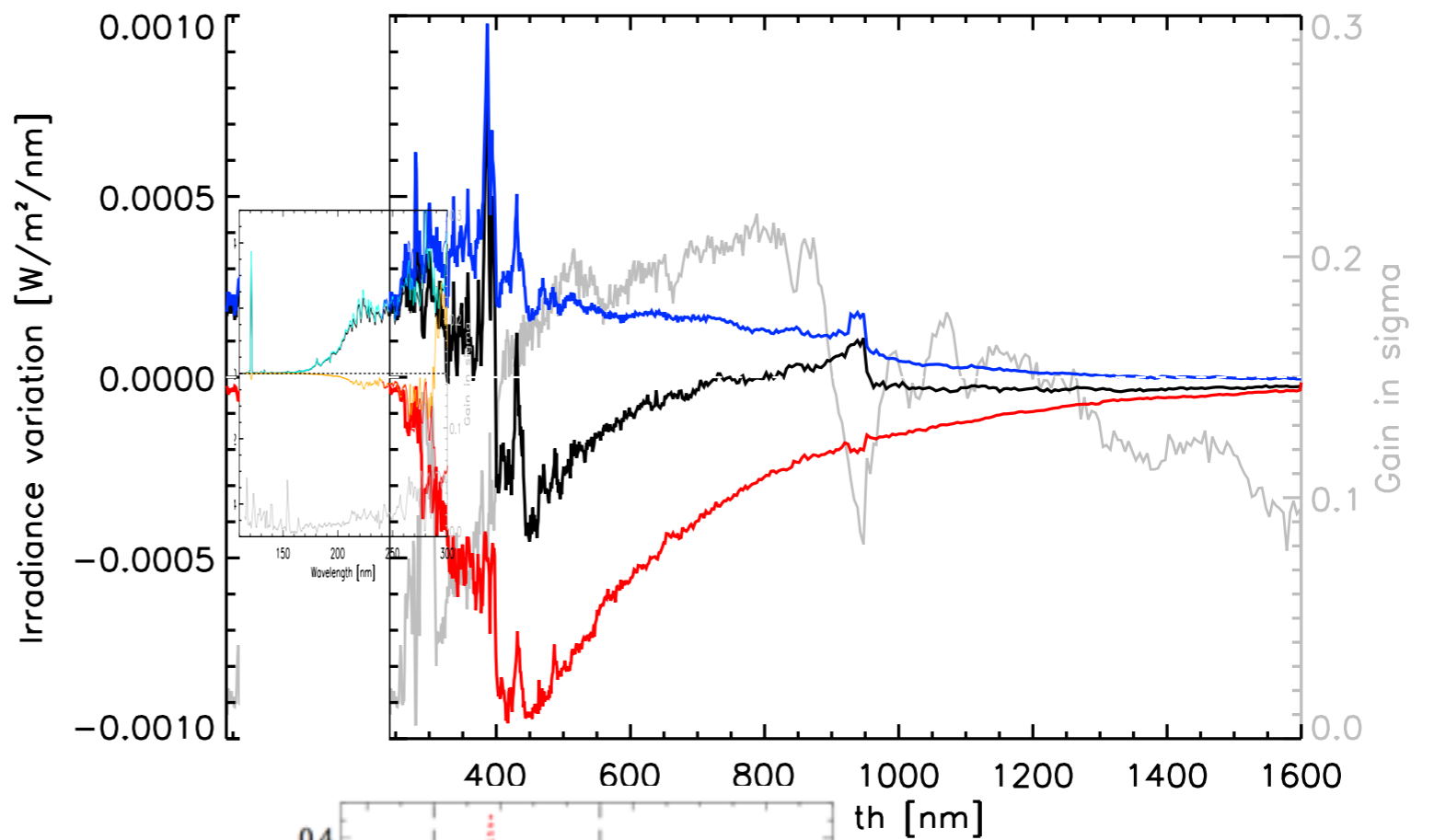
Irradiance  
Soleil  
Calme

- ◆ Les contributions sombres et brillantes sont déterminées par régression linéaire entre observations et indices (par ex. Mg II et DSA)
- ◆ Best known model: NRLSSI2 (Coddington+ 2016)

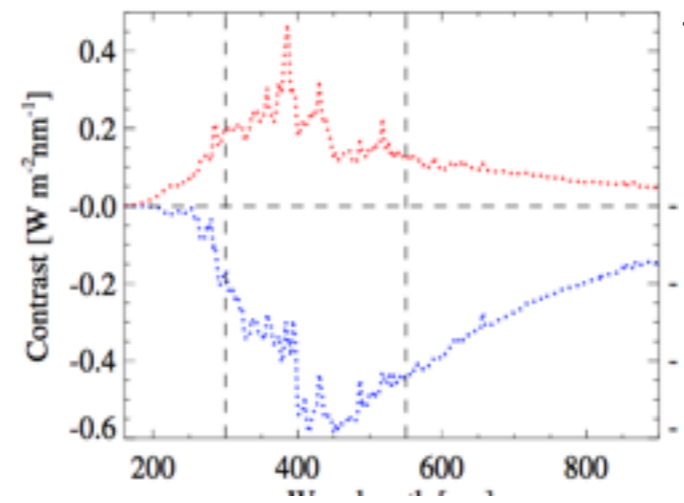


# Contraste des taches et facules

Sorce regression  
with Mg II and  
DSA

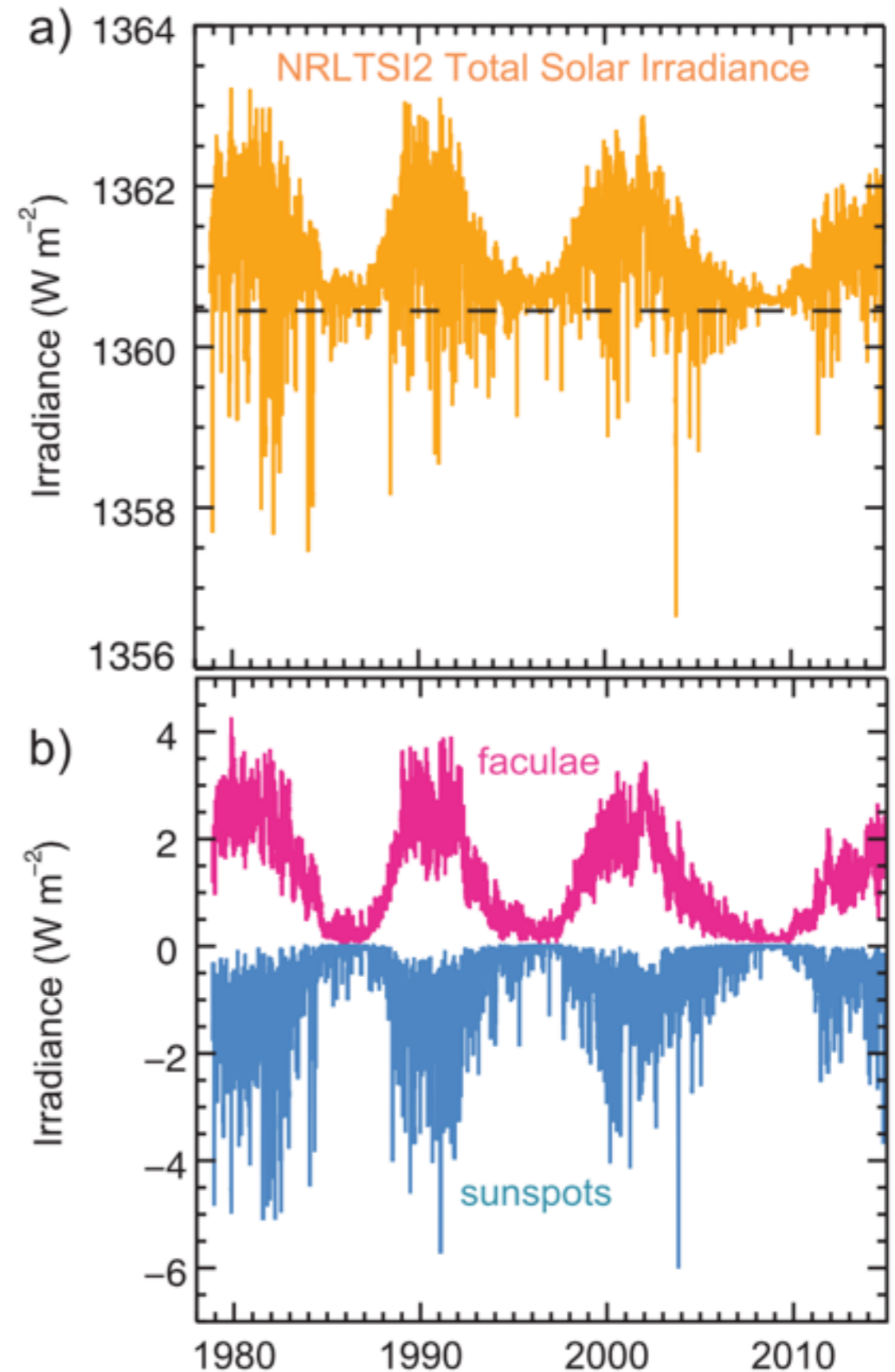


LTE contrast



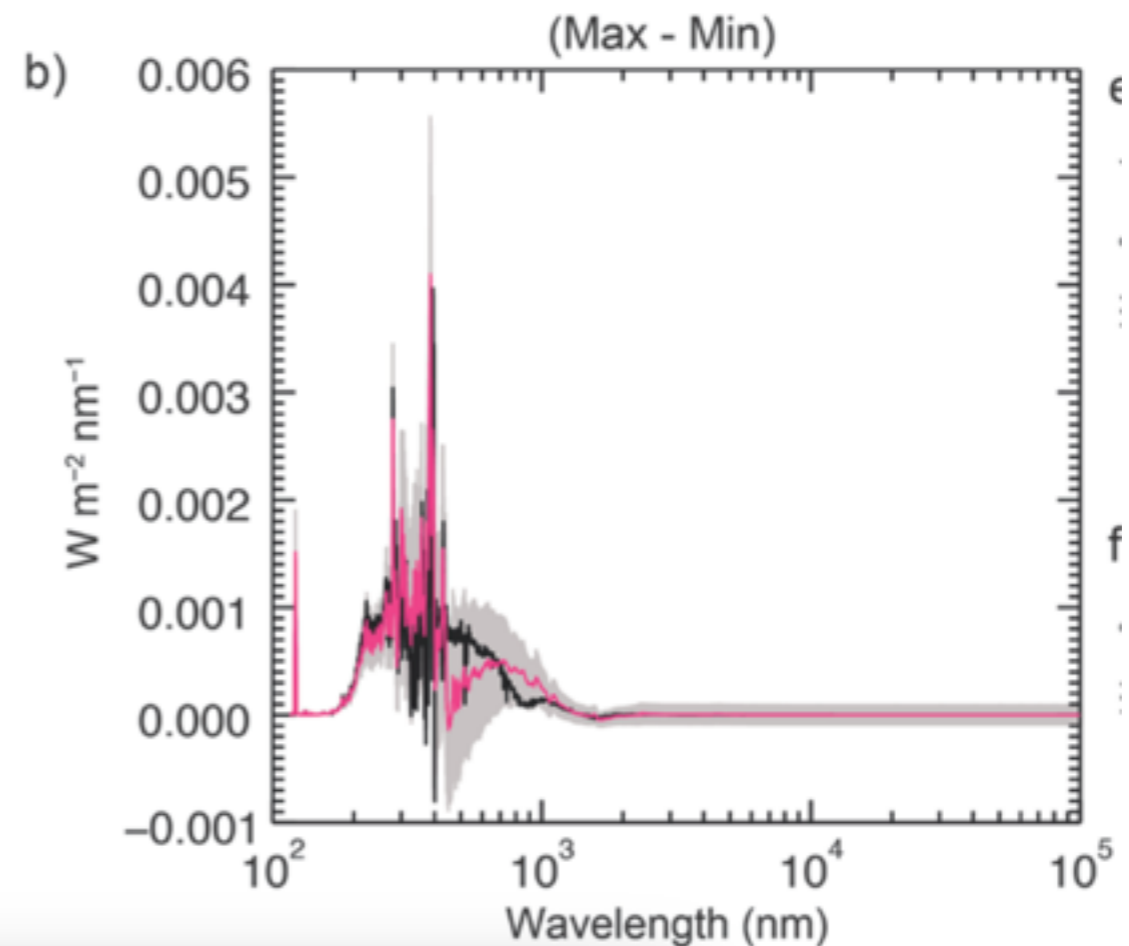
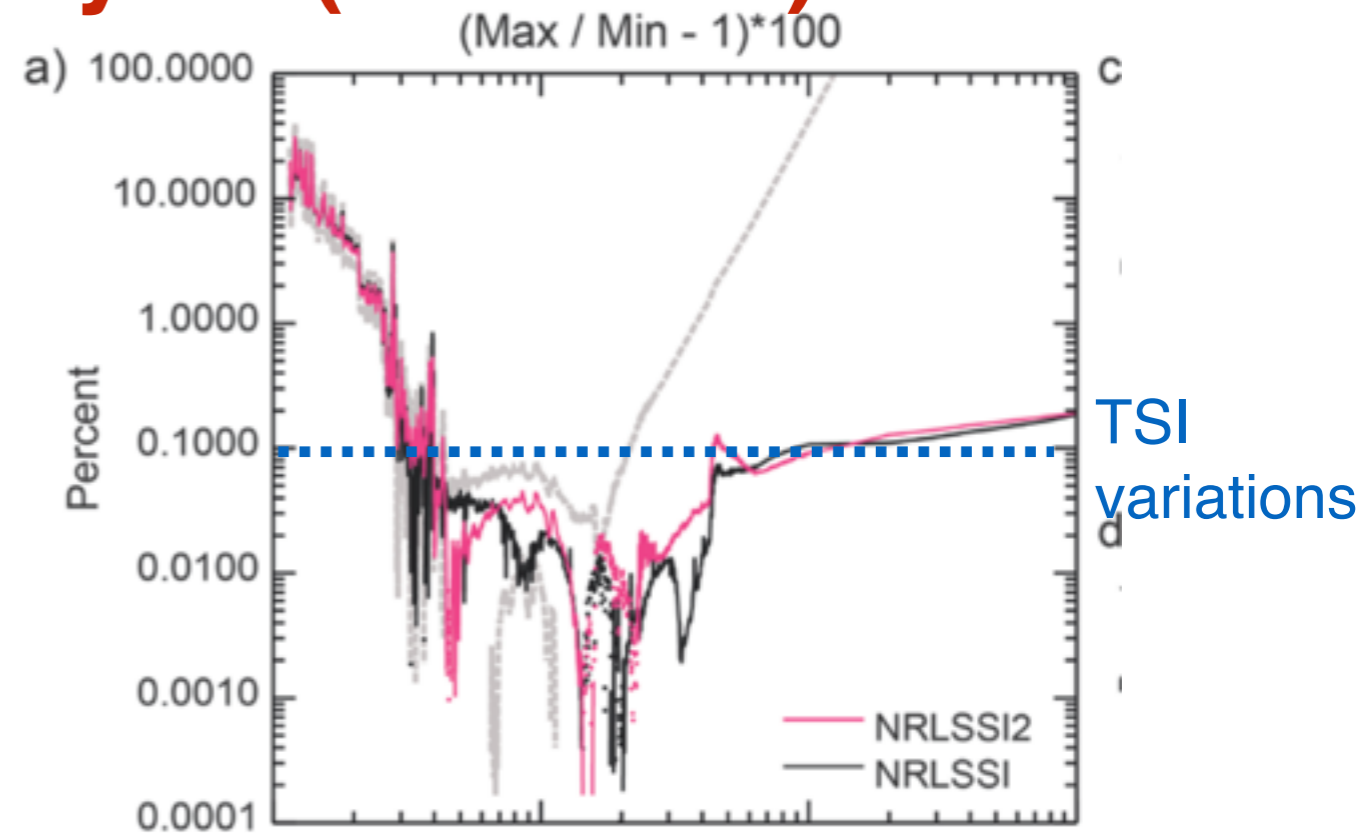
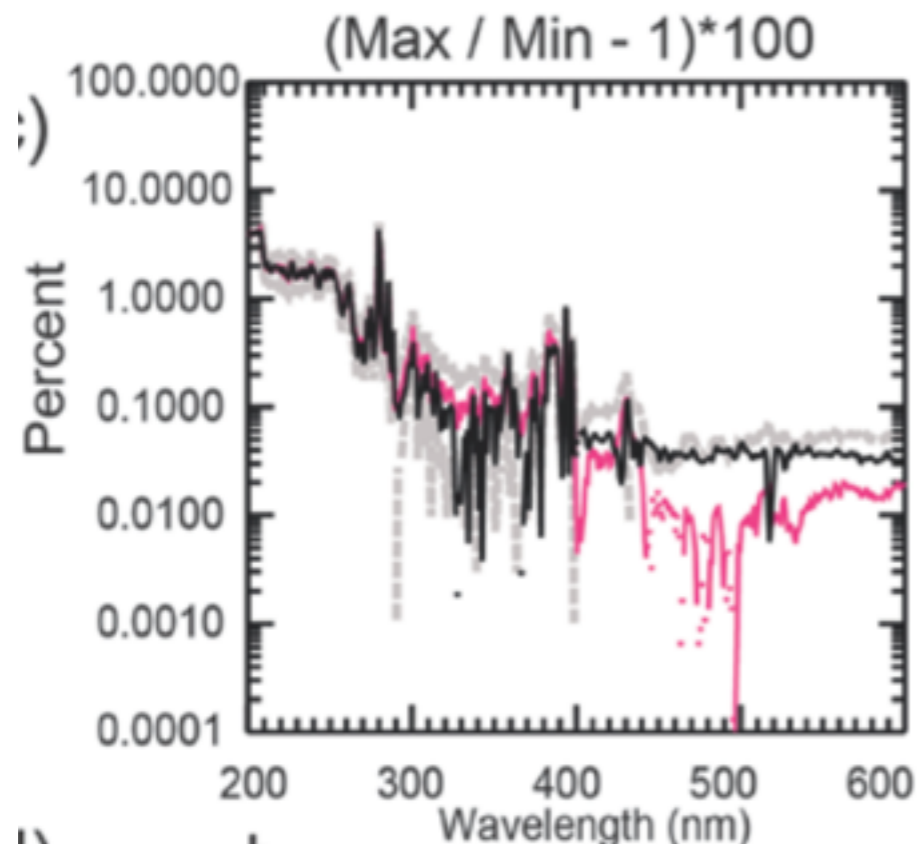
# Contribution des taches et facules à la variabilité de la TSI (NRLSSI2)

- ◆ Many contrasted structures on the Sun
- ◆ But they balance each other quite well !



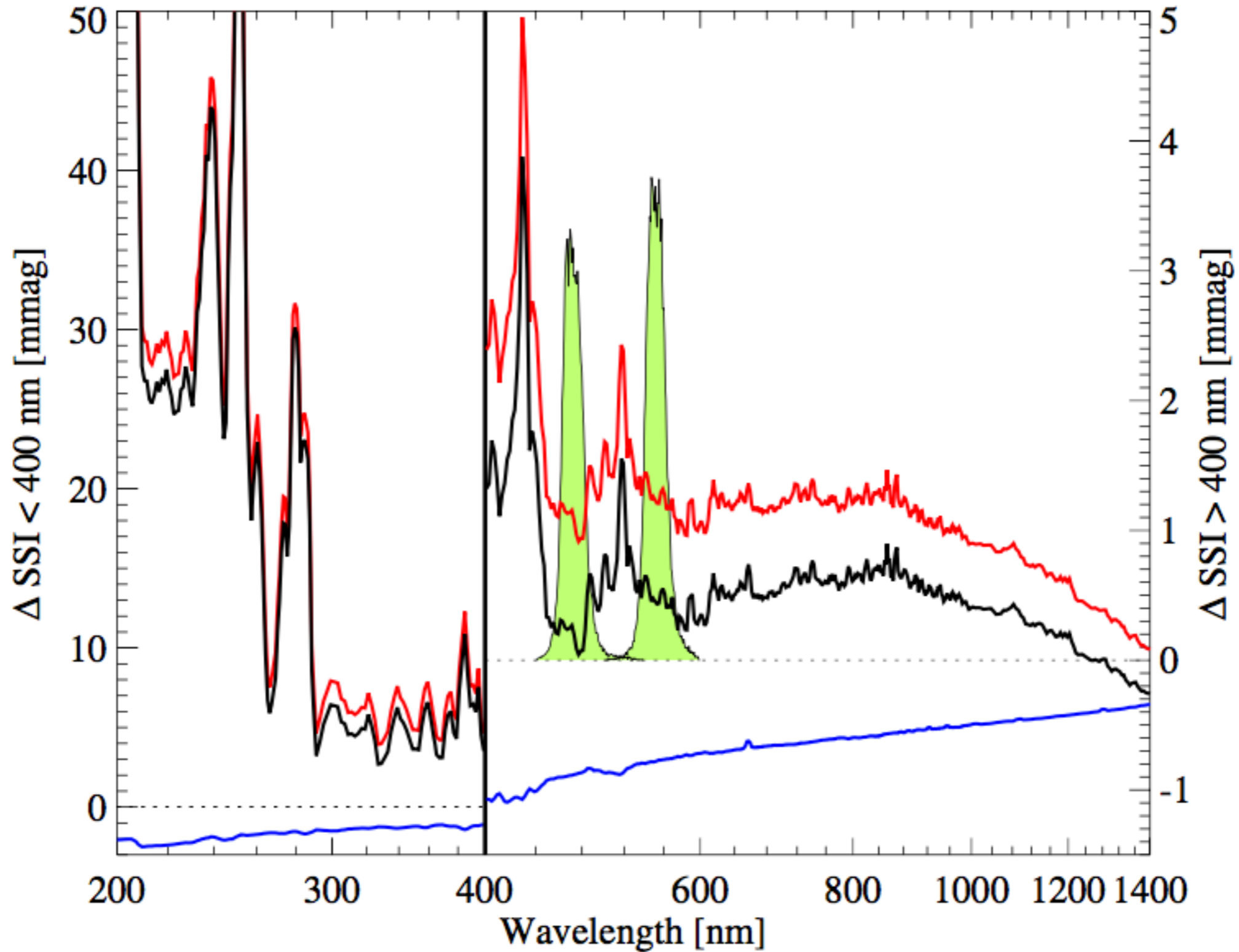
# Variations de l'irradiance spectrale sur le cycle (NRLSSI2)

- ◆ Most of the variability is below 400nm.
- ◆ Some wavelentghs in the visible are anticorrelated but questionable



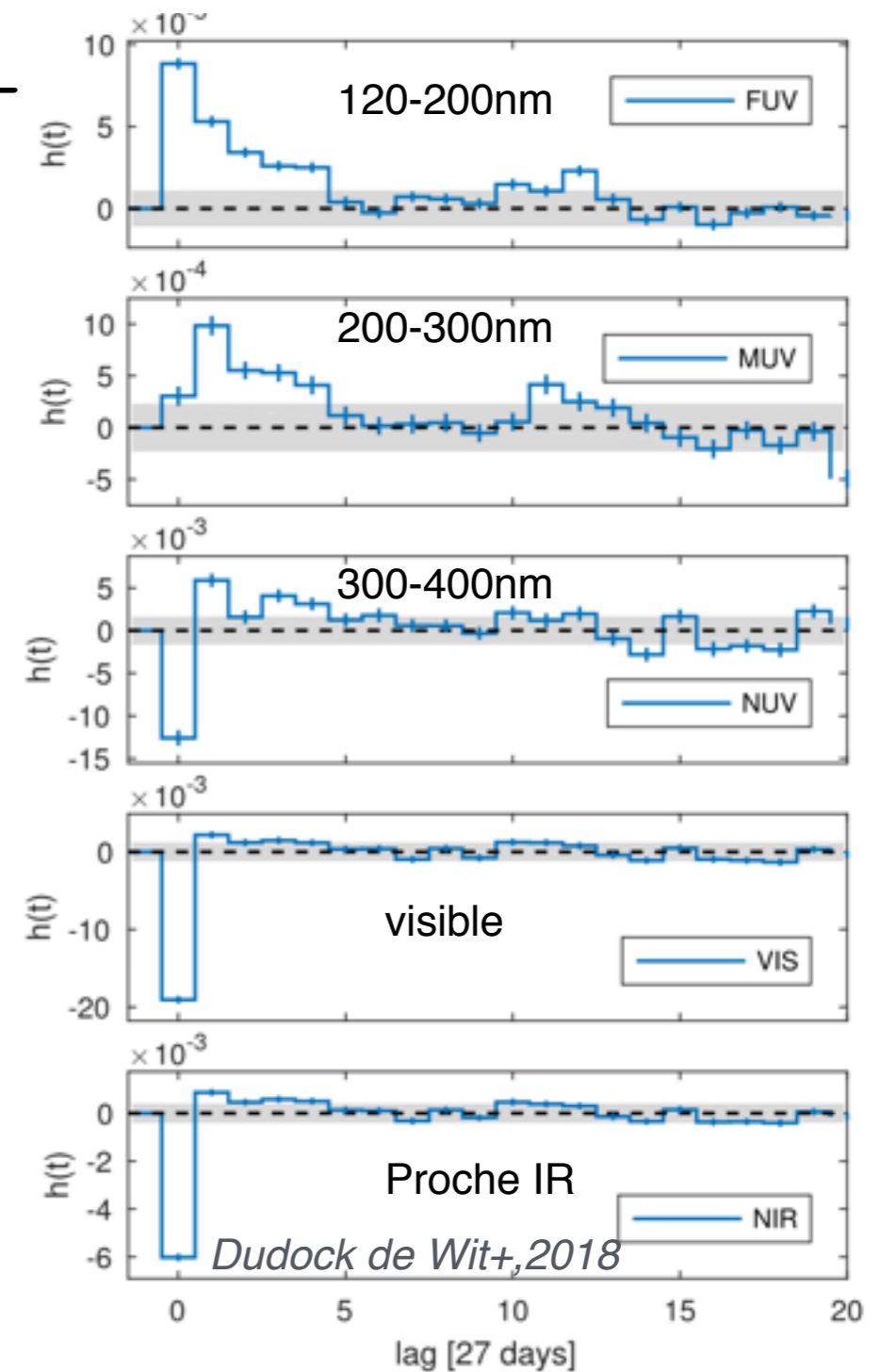
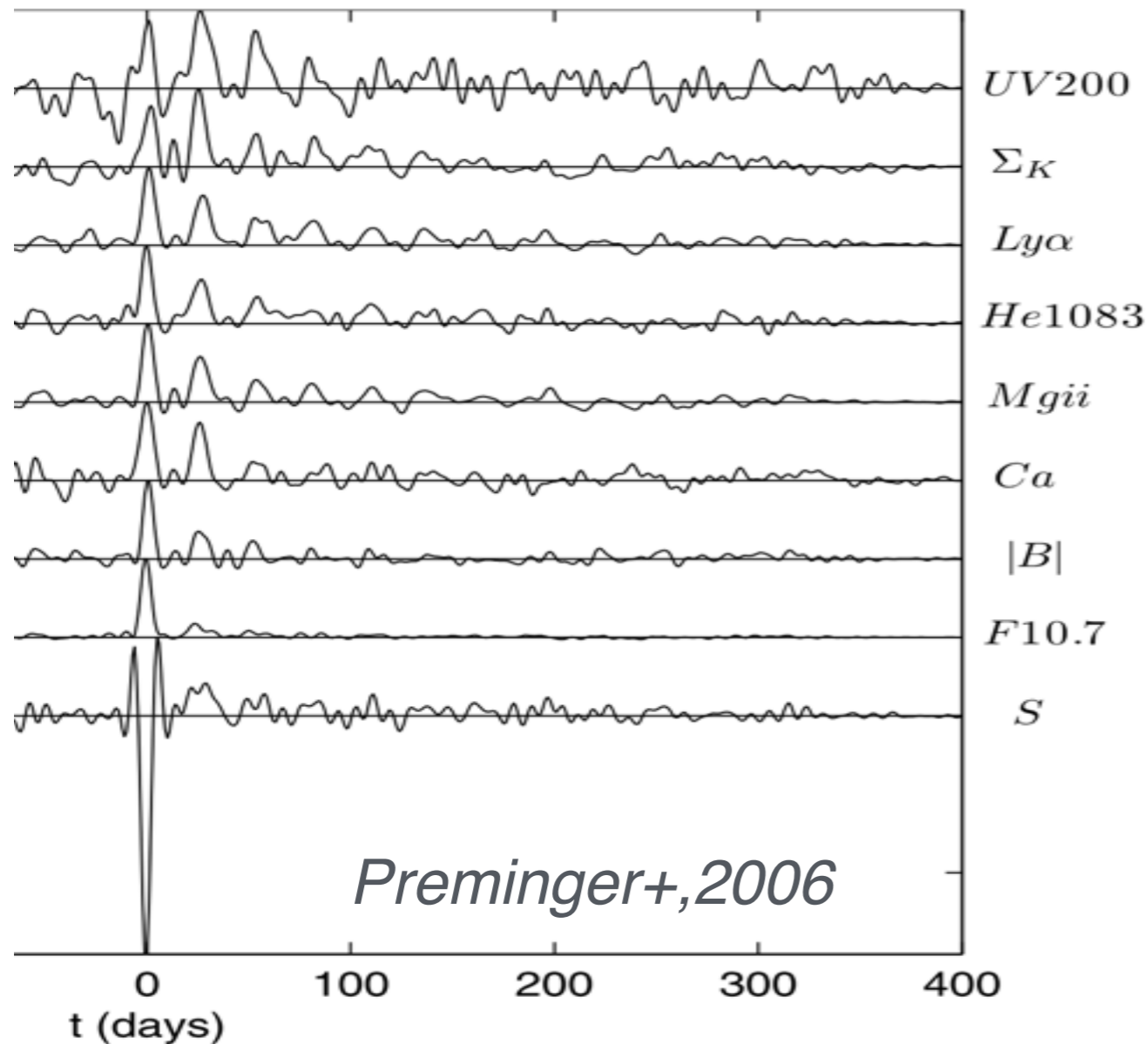


# Variations de l'irradiance spectrale sur le cycle (SATIRE)



# Effets à court terme des structures sur la SSI

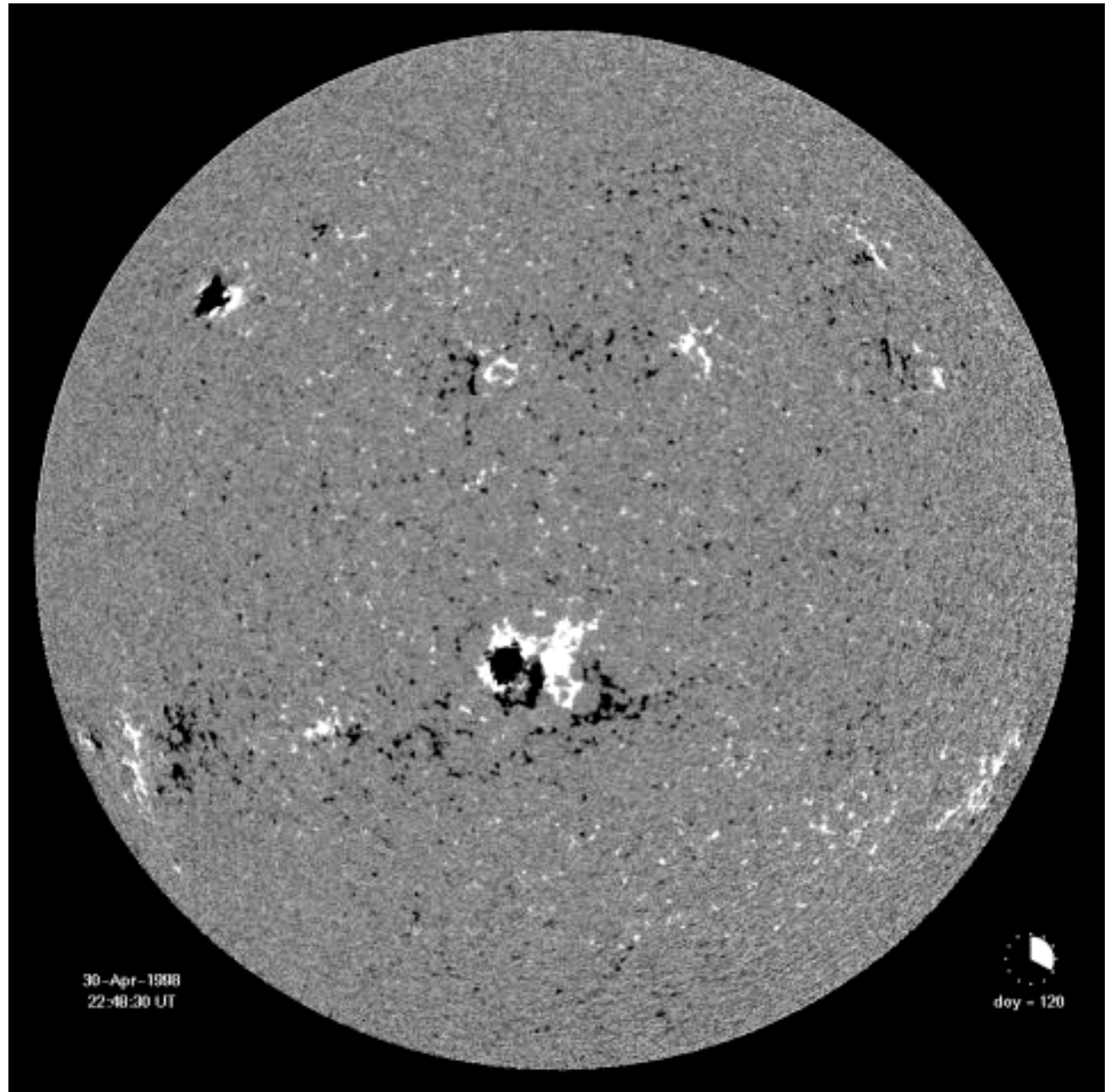
$$I(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t - \tau) DSA(\tau) d\tau$$



- ◆ Spots -> faculae .. et -> network (but hard to measure)

# Evolution d'une région active

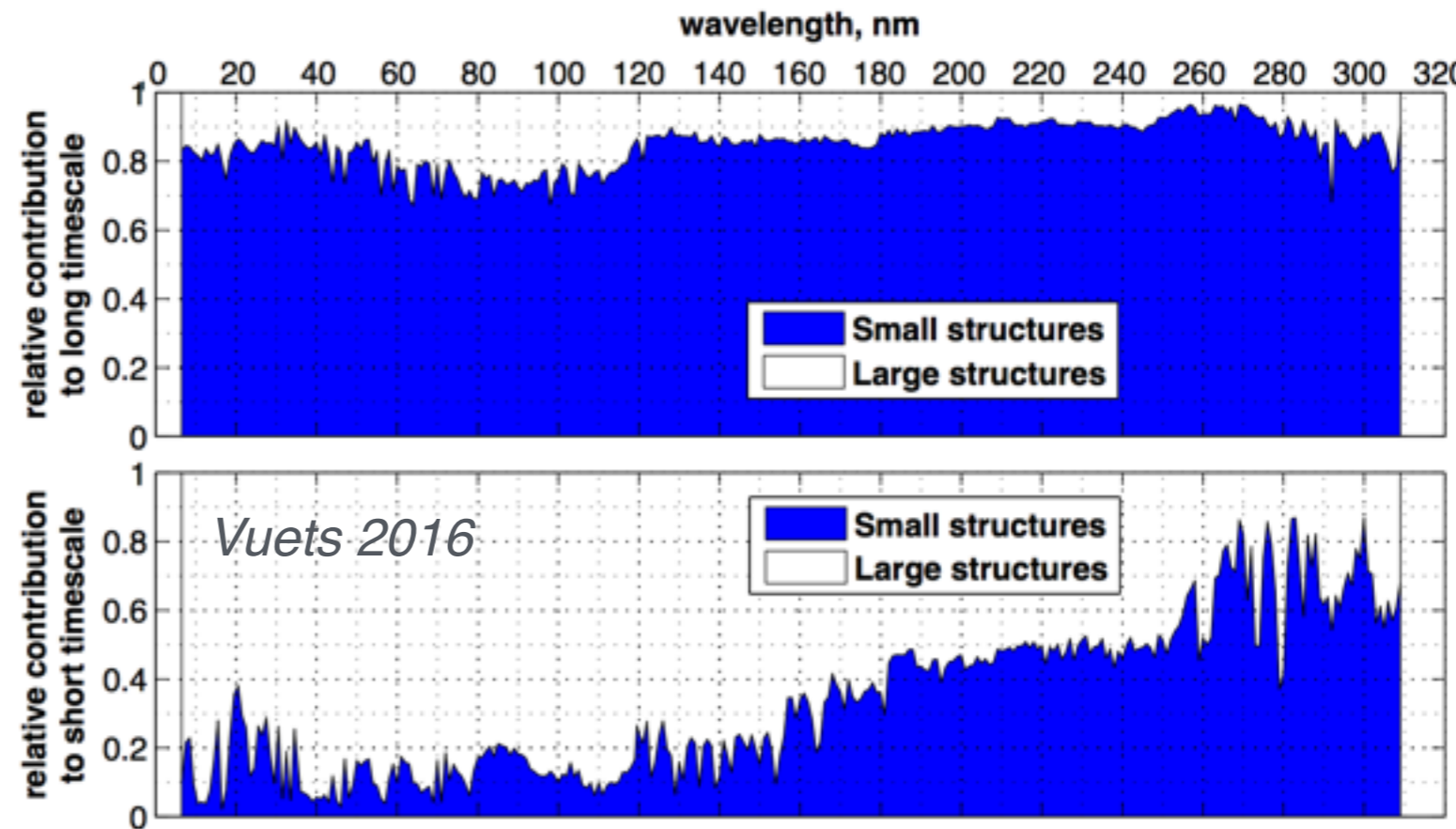
- ◆ Groupe jeune
  - ✦ champ compact
- ◆ Groupe « ancien » (1-2 rotations solaires)
  - ✦ champ plus fragmenté et dispersé
- ◆ Groupe plus ancien
  - ✦ champ très dispersé et vaste zone avec une polarité dominante



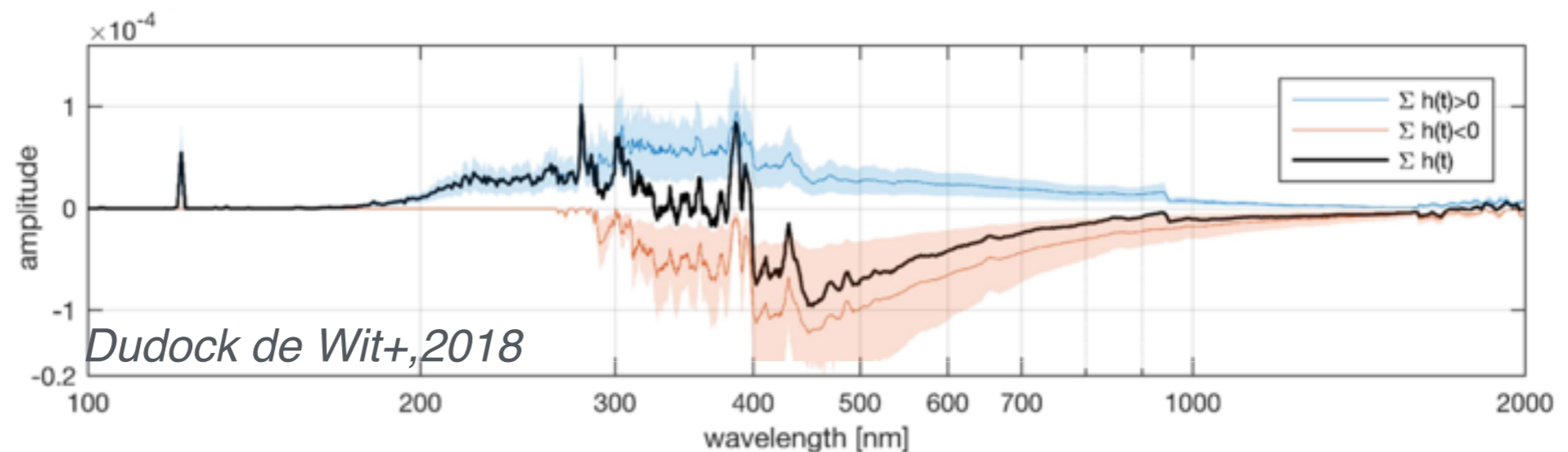


# Qui gouverne la variation ?

- ◆ Les grosses structures à l'échelle de la rotation, le réseau à l'échelle du cycle, mais difficile de le voir.



- ◆ Réponse impulsionnelle intégrée sur plusieurs rotations



# L'activité solaire dans le contexte stellaire

- ◆ Activité stellaire:
  - ✦ Structures et signal de rotation.
- ◆ Cycle stellaire: présentation générale des observations sol et espace
  - ✦ Observations sol en visible et Ca II K.
    - ▶ Amplitude du cycle vs amplitude rotation
    - ▶ Maunder minimum
    - ▶ Correlation photosphere/chromosphere.
  - ✦ Spot ou facule dominées ?
  - ✦ Eruptions stellaire

## La variabilité solaire comparée aux étoiles « solar like »

\* Observations au sol de la variabilité stellaire (visible, Ca II K, Mount Wilson, Lowell Obs)

- Indice S et R'<sub>HK</sub>
- Type de variabilité: Amplitude du cycle, rotation, Maunder minimum, ...
- Vaughan&Preston gap
- Correlation photosphere/chromosphere, Spot ou facule dominées ?

\* Le Soleil en contexte (branche d'activité, ..)

## ◆ Vocabulary

- ✦ Active means important chromospheric radiation (large S or R'<sub>HK</sub>)
- ✦ Variable: at least S (or R'<sub>HK</sub>) is varying

# L'activité solaire dans le contexte stellaire

## Activité et variabilité des étoiles « solar like »

- Observations au sol de la variabilité stellaire (visible, Ca II K, Mount Wilson, Lowell Obs)
- Indice  $S$  et  $R_{HK}'$
- Type de variabilité.
- Vaughan&Preston gap
- Correlation photosphere/chromosphere, Spot ou facule dominées ?

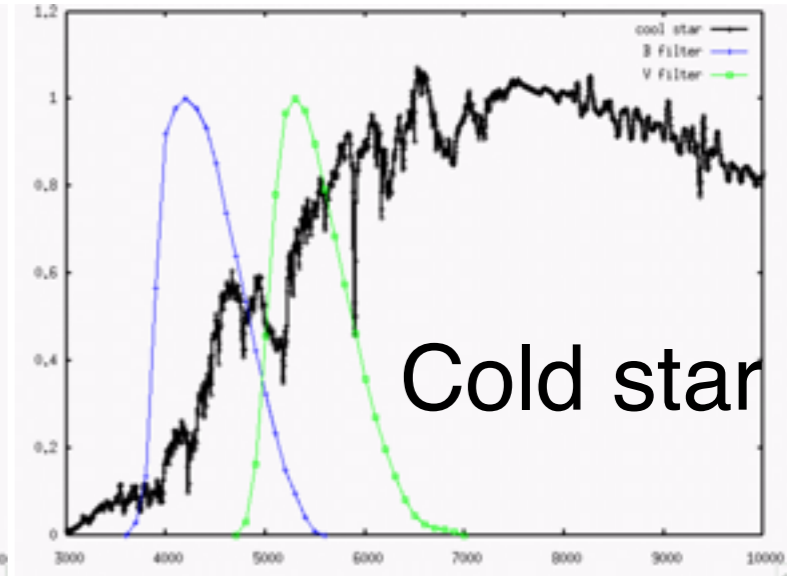
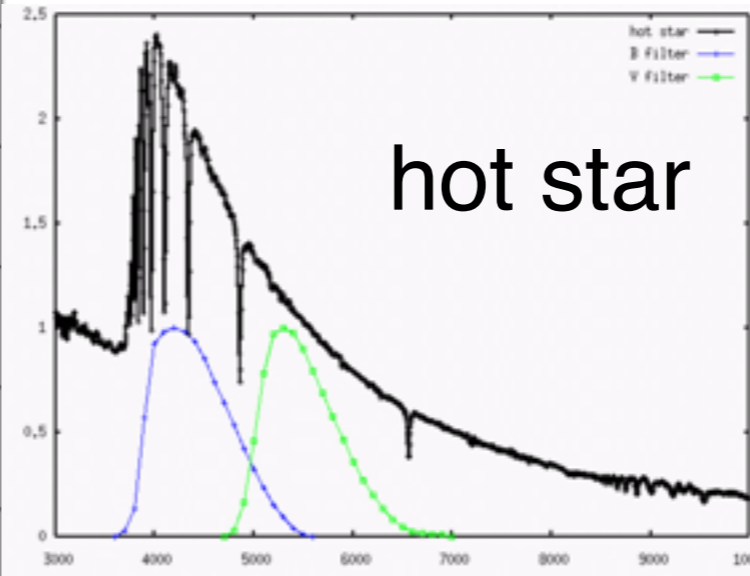
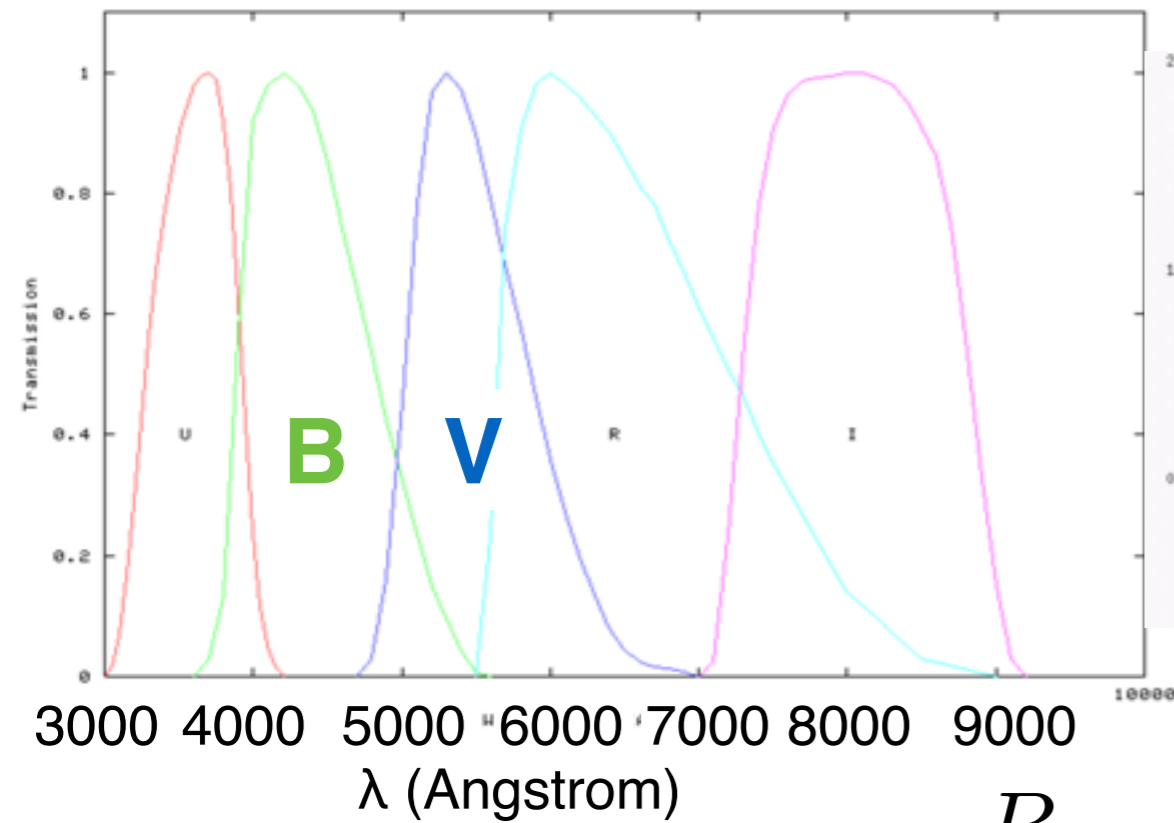
## ◆ Vocabulary

- ✿ « Active » means important chromospheric radiation (large  $S$  or  $R'_{HK}$ )
- ✿ « Variable »: at least  $S$  (or  $R'_{HK}$ ) is varying
- ◆ **Solar like**: “a very broad class of stars, in which are found a mixture of late F, early, middle, and, sometimes, late G type dwarfs and sub-giants.”
- ◆ **Solar analog**: Temperature within  $\sim 500$  K of the Sun (i.e.,  $B - V$  color between about 0.52 and 0.82, or spectral type between F7 and K0), and lying within one magnitude of the Zero-Age Main Sequence (ZAMS)
- ◆ **Solar twins**: no clear définition, usually applied to HD 146233 = 18 Sco and a few other stars



# Indices de couleur

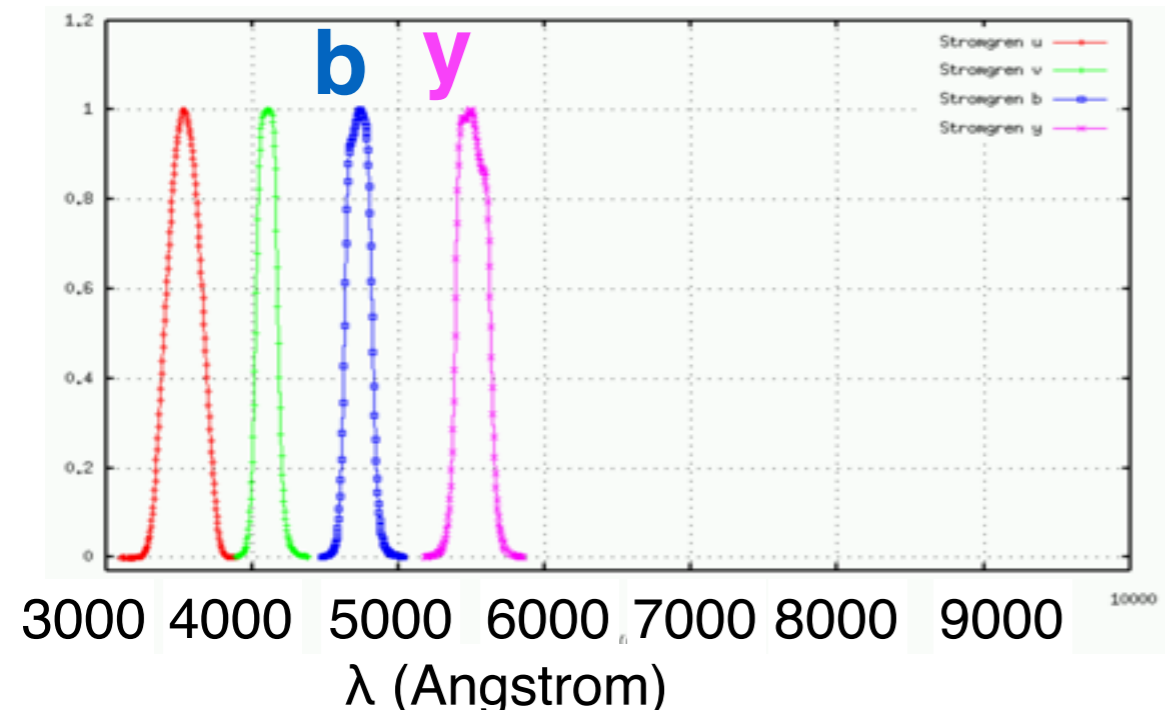
## ◆ Johnson filters



$$B - V = m(B) - m(V)$$

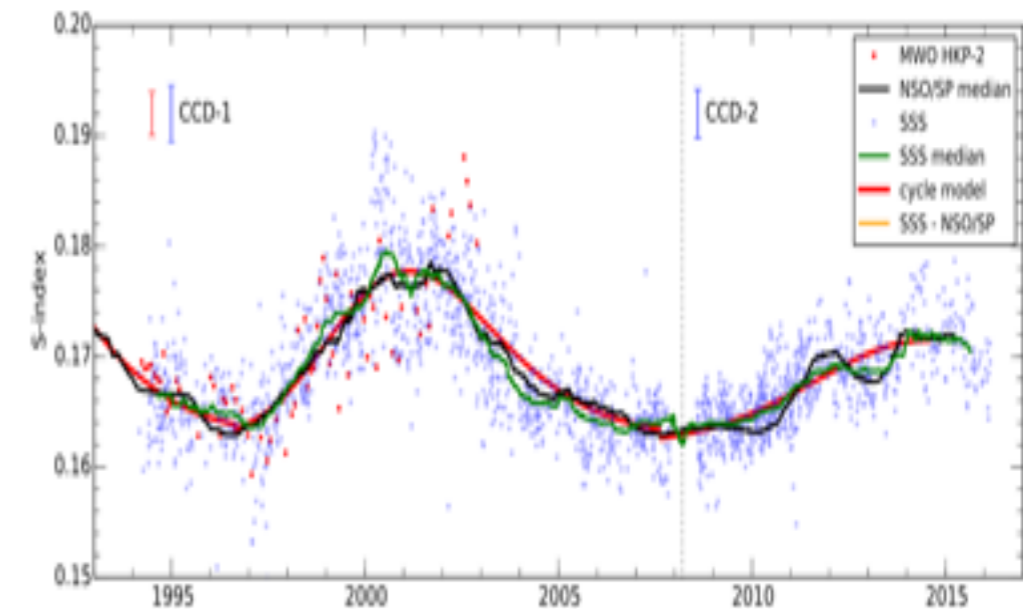
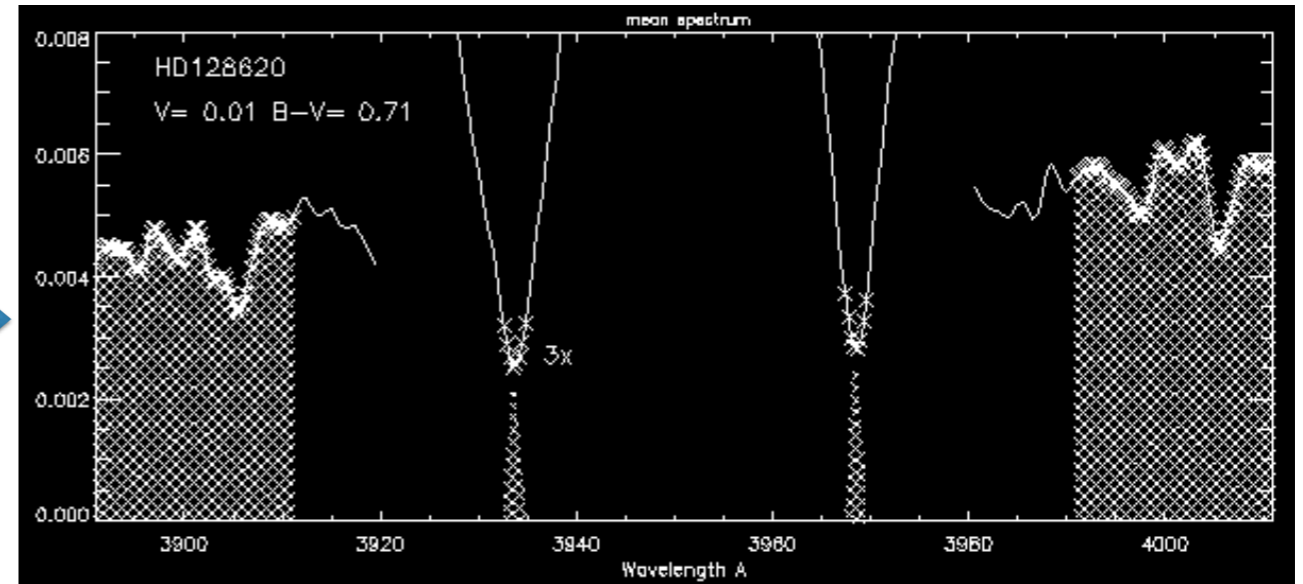
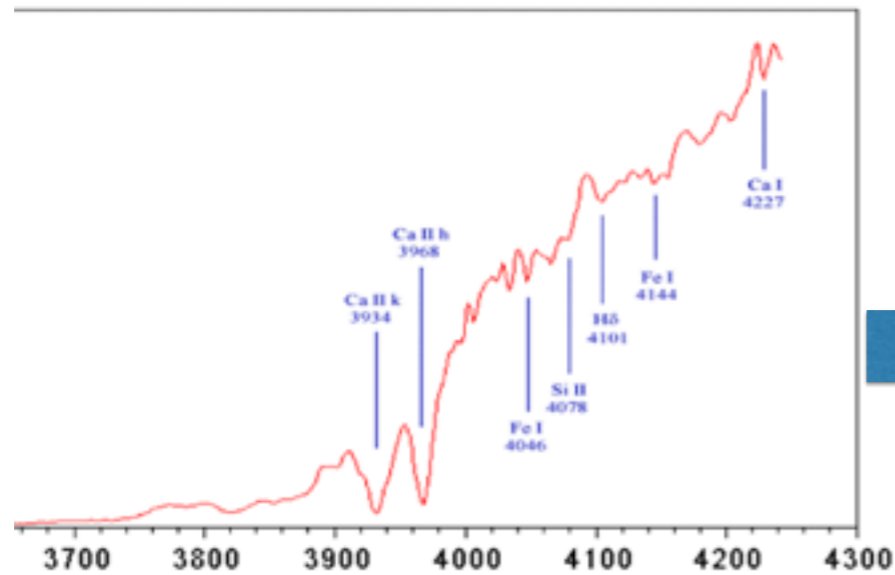
<0: bluer than Vega  
>0: reder than Vega

## ◆ Stromgren filters



Stromgren b-y can be converted somehow to Johnson B-V

# Indices de l'activité stellaire



$$S = \alpha \frac{N_H + N_K}{N_R + N_V}$$

$$R'_{HK} = \frac{F_{HK}}{\sigma T_{eff}^4} - R_{phot}$$

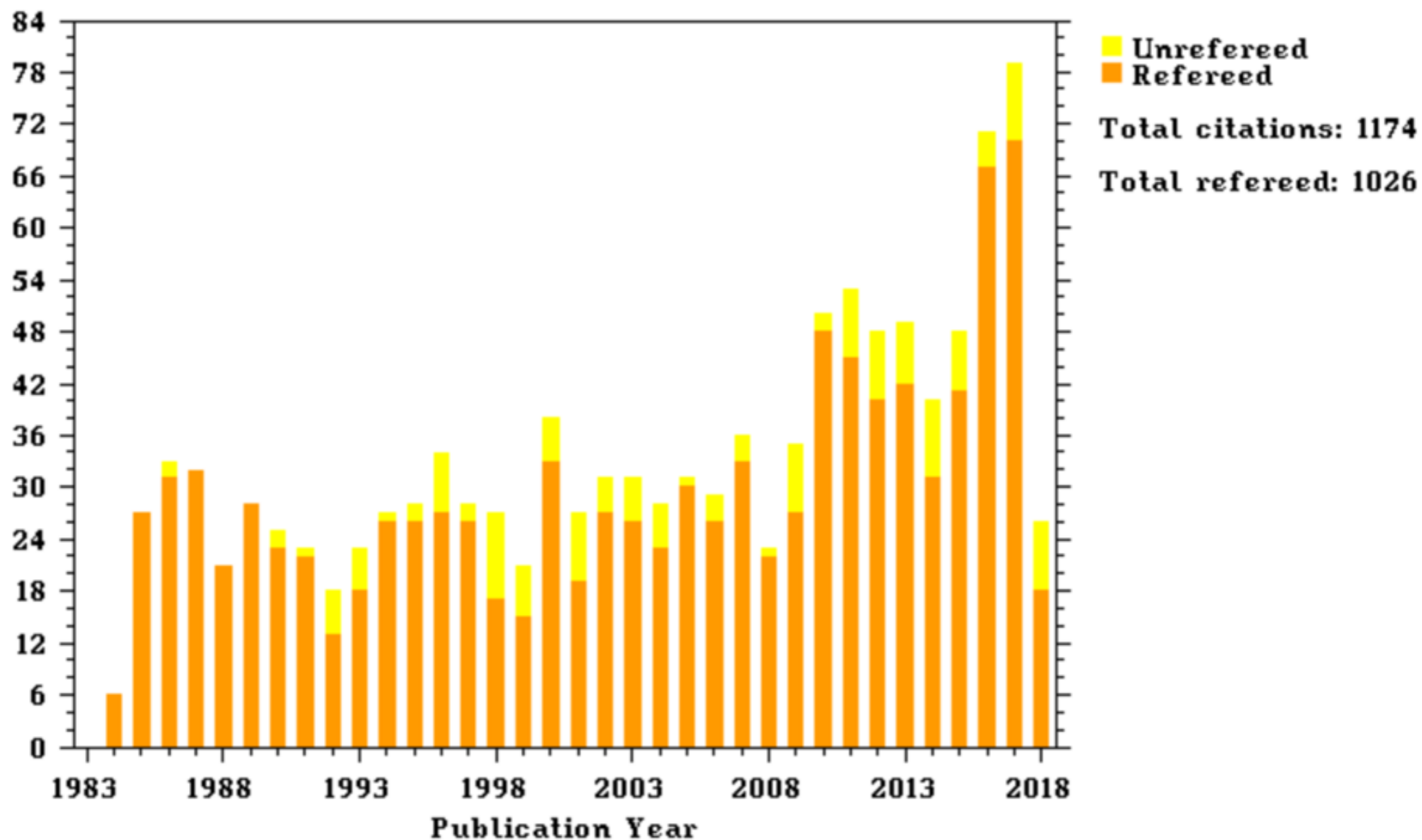
◆ S-index (Vaughan+ 1978, Egeland+ 2017):

- ✿ R et V varient avec la température de surface, difficile de comparer d'étoiles en étoiles

◆  $R'_{HK}$  (Noyes+1984)

- ✿  $F_{HK}$  is the total flux per  $\text{cm}^2$  at the stellar surface in the H and K passbands. Fraction of the star's luminosity going into H+K chromospheric emission.
- ✿  $R_{phot}$  prend en compte la contribution photosphérique dans les bandes H et K, ne dépend que de B-V
- ✿ Uncertainty  $\sim > 15\%$  (Radick+2018)

Citations/Publication Year for 1984ApJ...279..763N



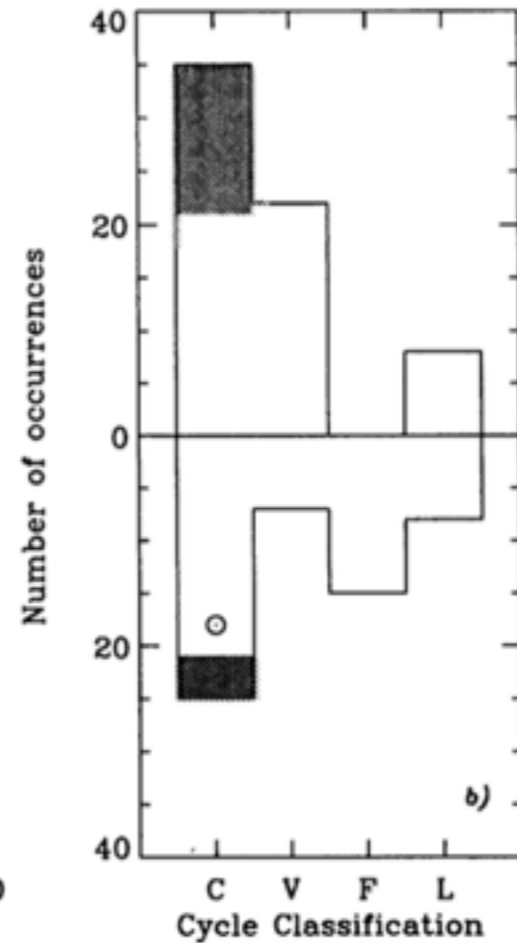
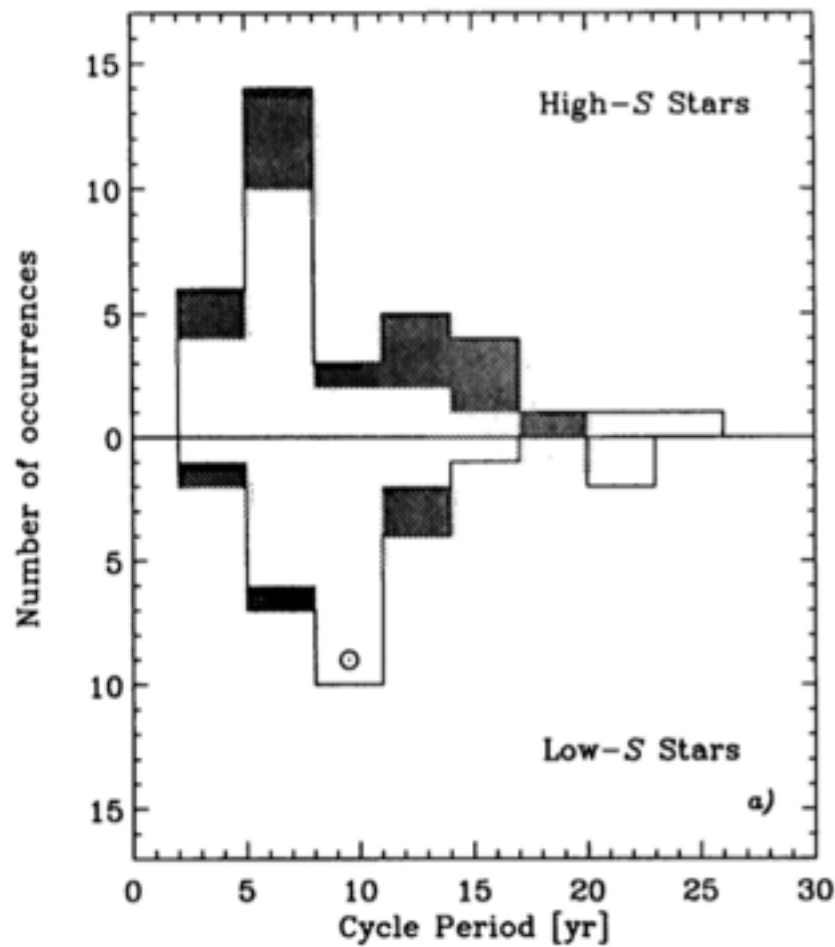
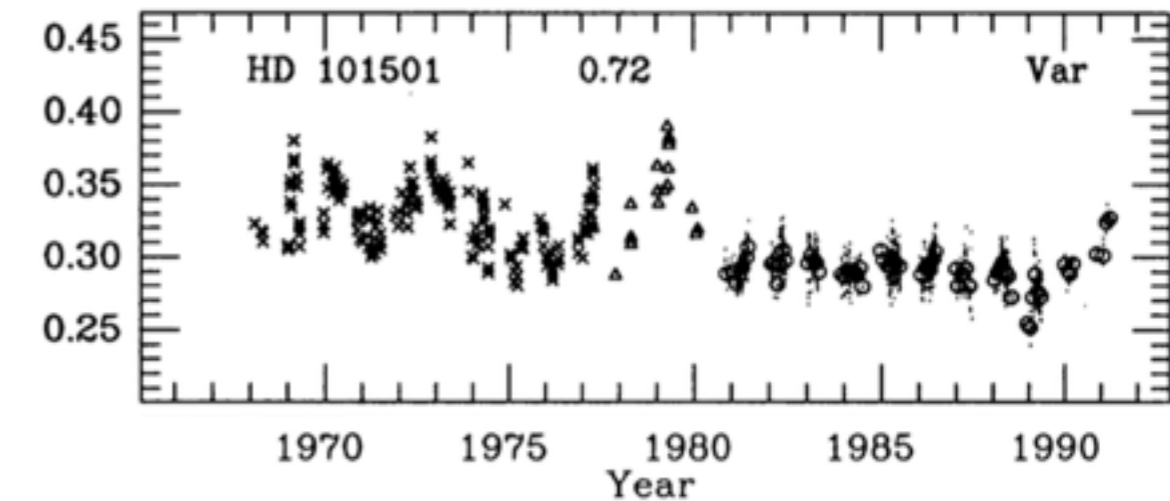
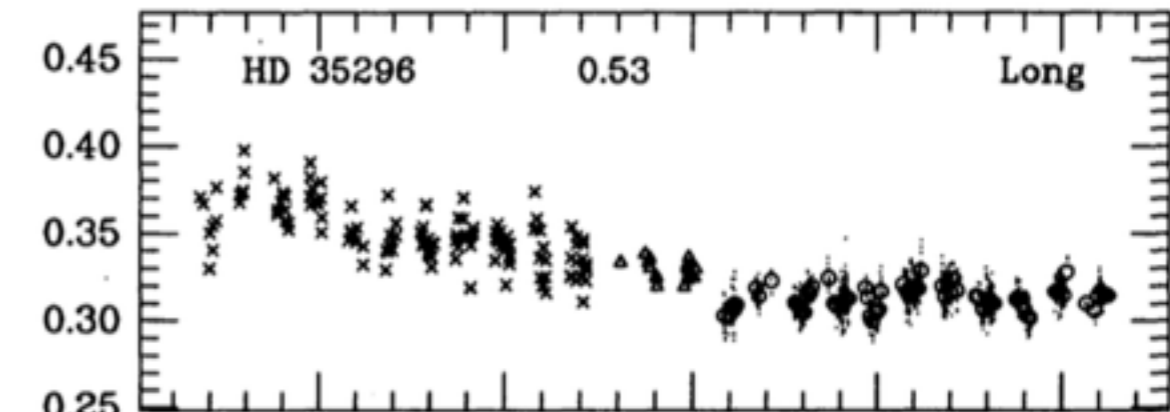
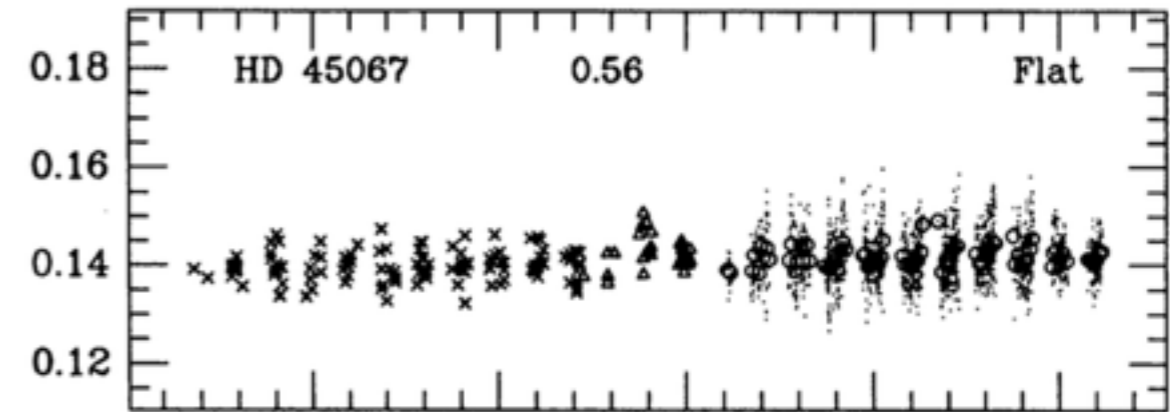
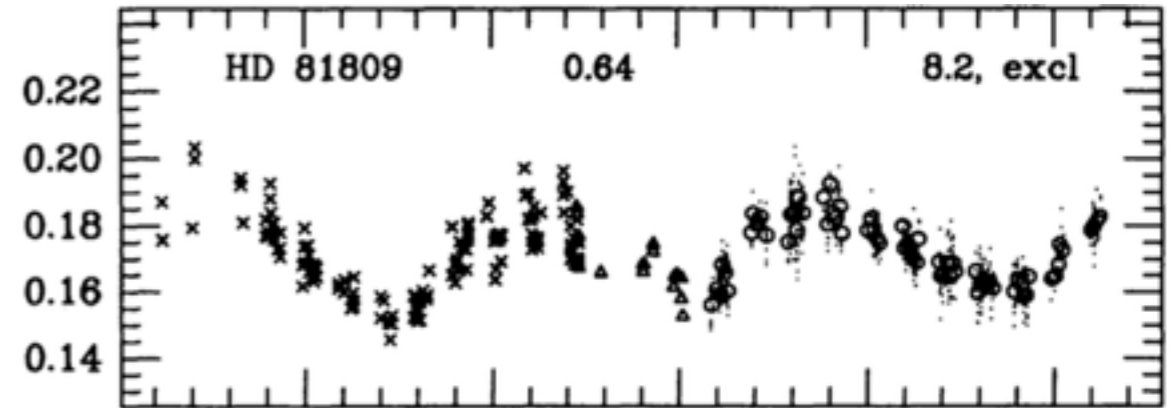


# Observations au sol de l'activité de solar-like stars

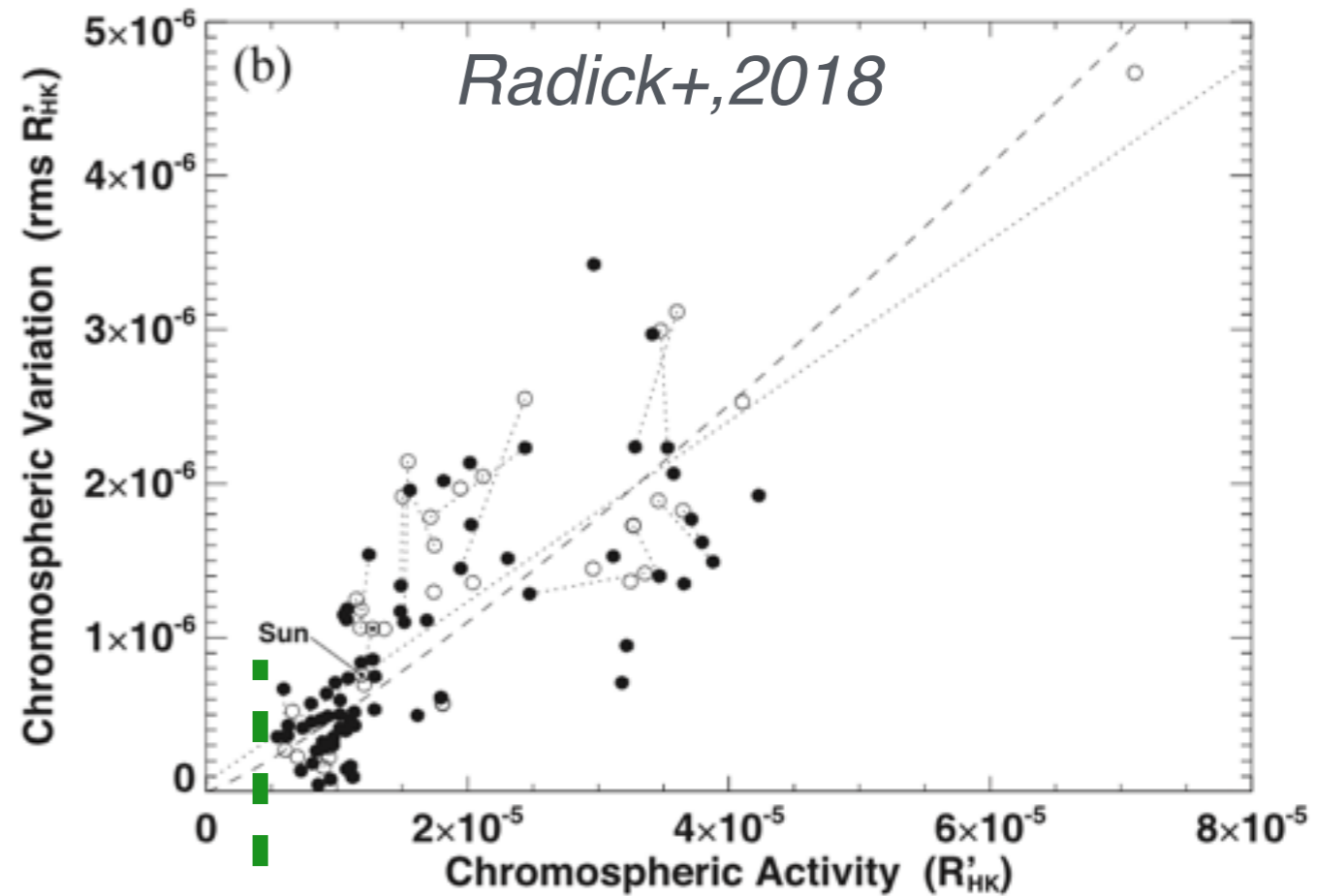
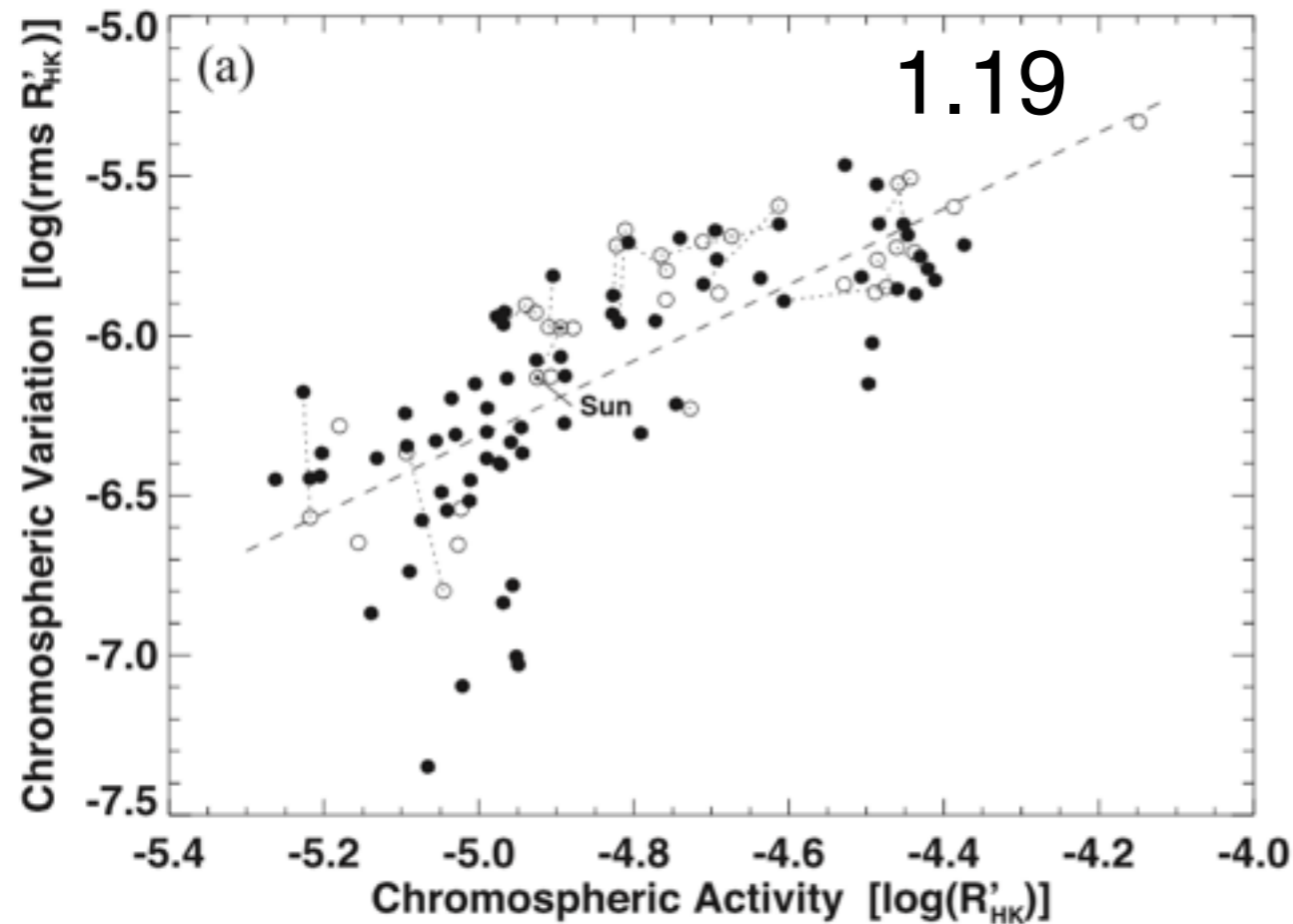
- ◆ Ca II K&H
  - ◆ Wilson, 1978: 1966-1977: chromospheric CaII H+K emission for almost 100 stars
  - ◆ Mount Wilson Obs. (MWO), 1977-2002: continued (Baliunas+, 1995,1998)
  - ◆ Lowell Observatory (Solar Stellar Spectrograph-SSS): 1984-present
  - ◆ HARPS and others..
- ◆ Photospheric variability
  - ◆ 1984-2000, b & y photometric variability of several stars among which observed at MWO
    - ✿ NB: b & y observations rely on differential photometry (each targeted star is observed with 3 others comparisons stars, assumed to be quasi not variable)

# Type of variability

- ❖ Variable, **Cycle-like** (included two cycle
- ❖ **Variable**, irregular
- ❖ Variable, **long-term trend**
- ❖ **Flat**.



# Chromospheric variability vs activity



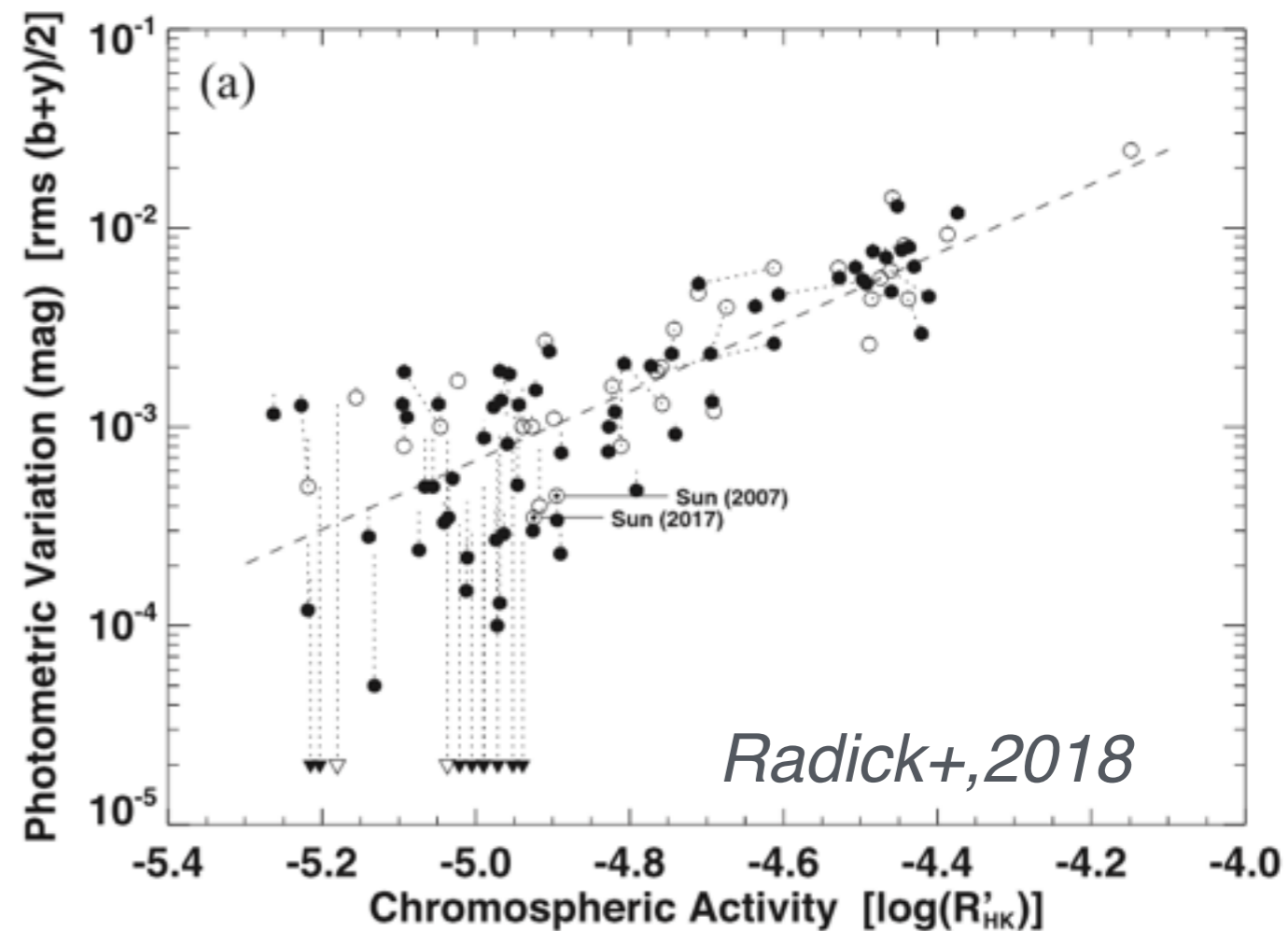
Log  $R'_{hk} > 0.5 \cdot 10^{-5} \rightarrow$   
includes basal emission

- ◆ Chromospheric variations increase with chromospheric activity:
  - ✿ Both power law and linear regression looks good.
- ◆ Variability ends at finite  $R'_{HK}$



# Photospheric variability vs chromospheric activity

- ◆ NB: Long term (=1yr-rms, not cycle variations) photospheric variability correlated with chromospheric activity.
- ◆ Variability increases with activity

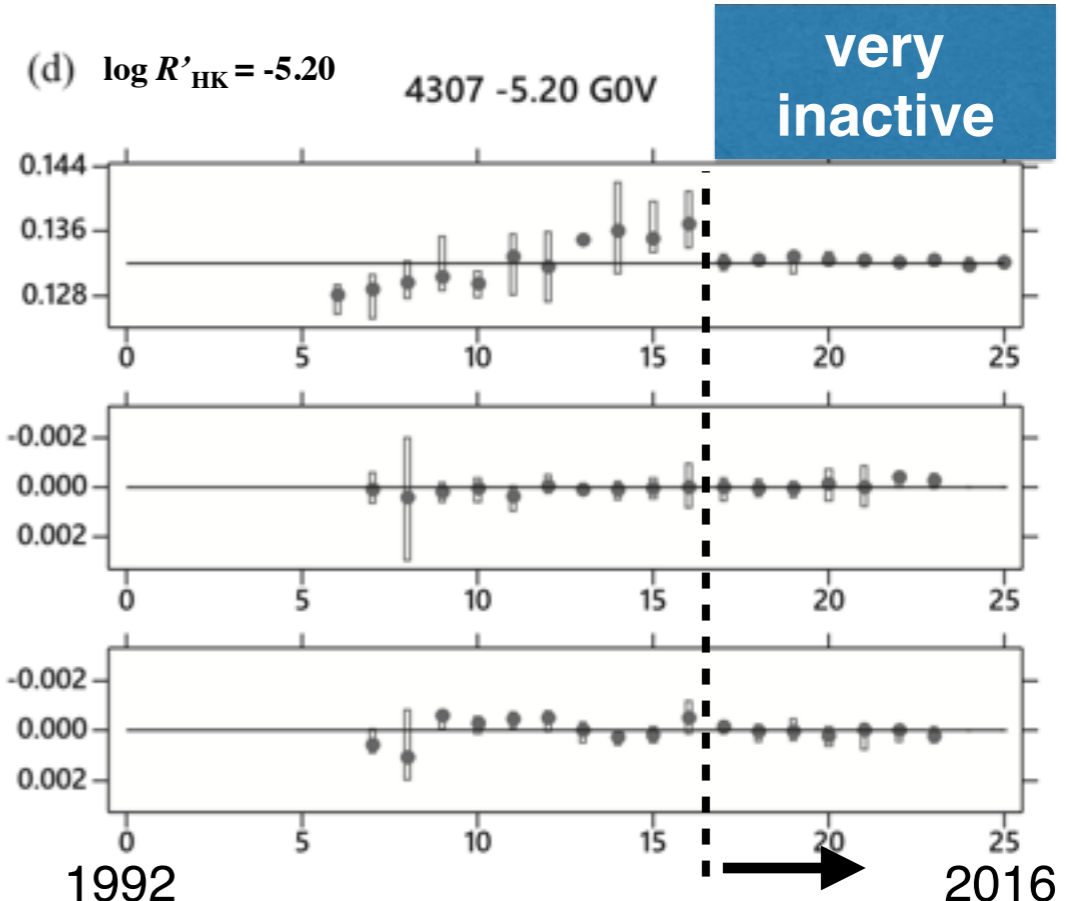
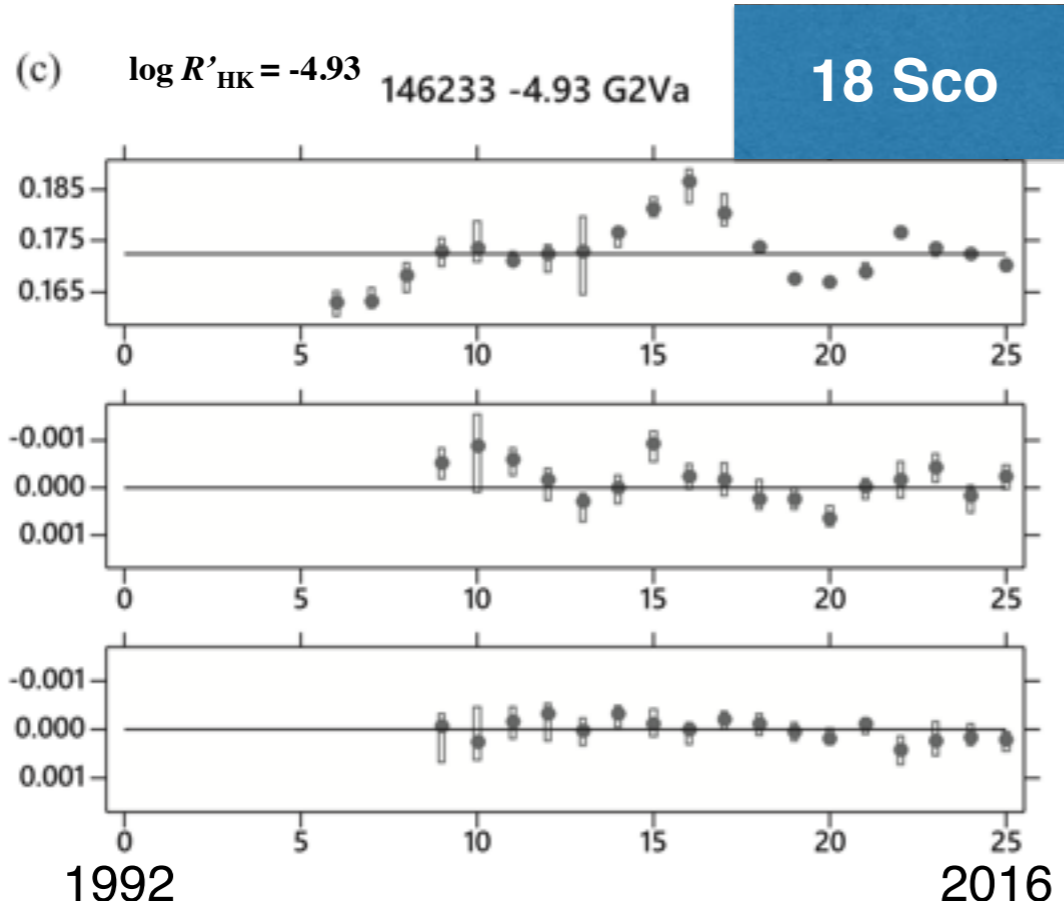
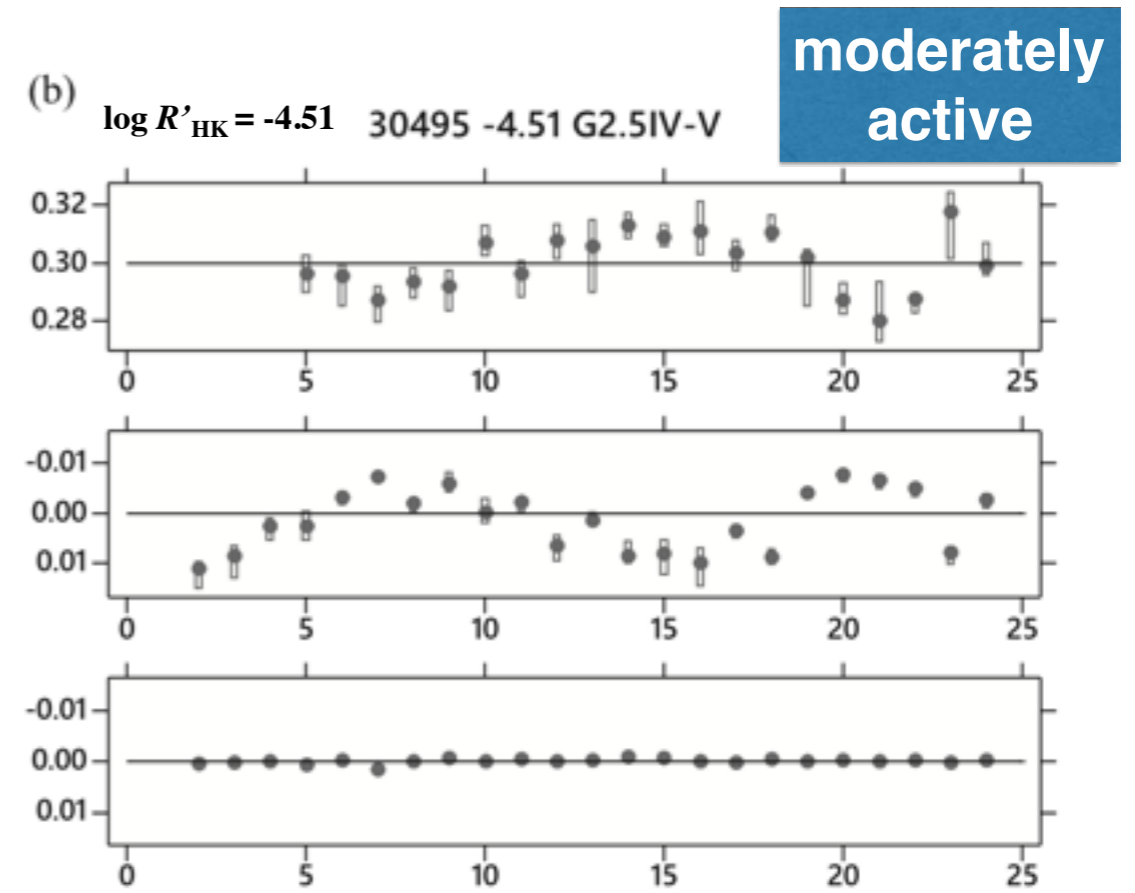
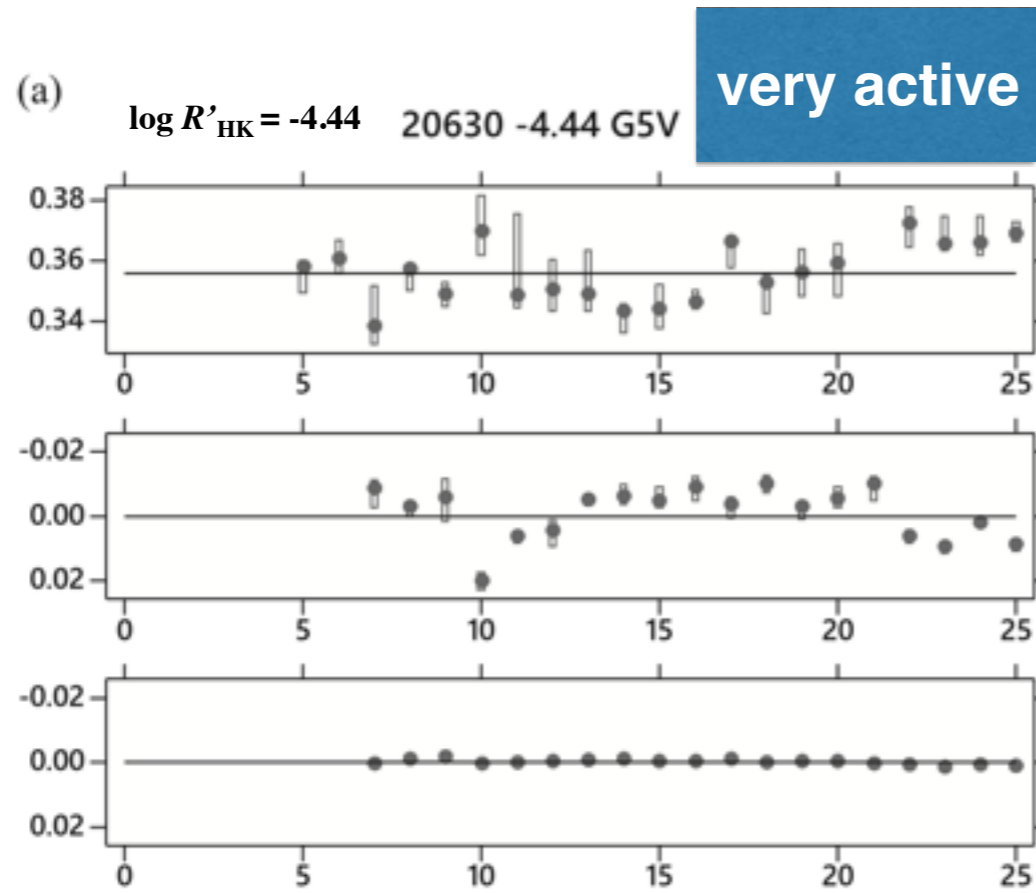


- ◆ Why is the Sun below the trend line ?
  - ✿ b&y variability overestimated for less active stars
  - ✿ Uncertainty in estimation of the Sun b & y !
  - ✿ The Sun has less b&y variability because of its inclination
  - ✿ excluded: metallicity (stars are not very different, maybe the Sun is a little bit metal rich)
  - ✿ very good balance of spots and faculae on the Sun.

Median  
seasonal S-  
index

tri-mean) (b  
+y)/2  
differential  
magnitude

(b+y)/2 for  
comparison  
star



1992

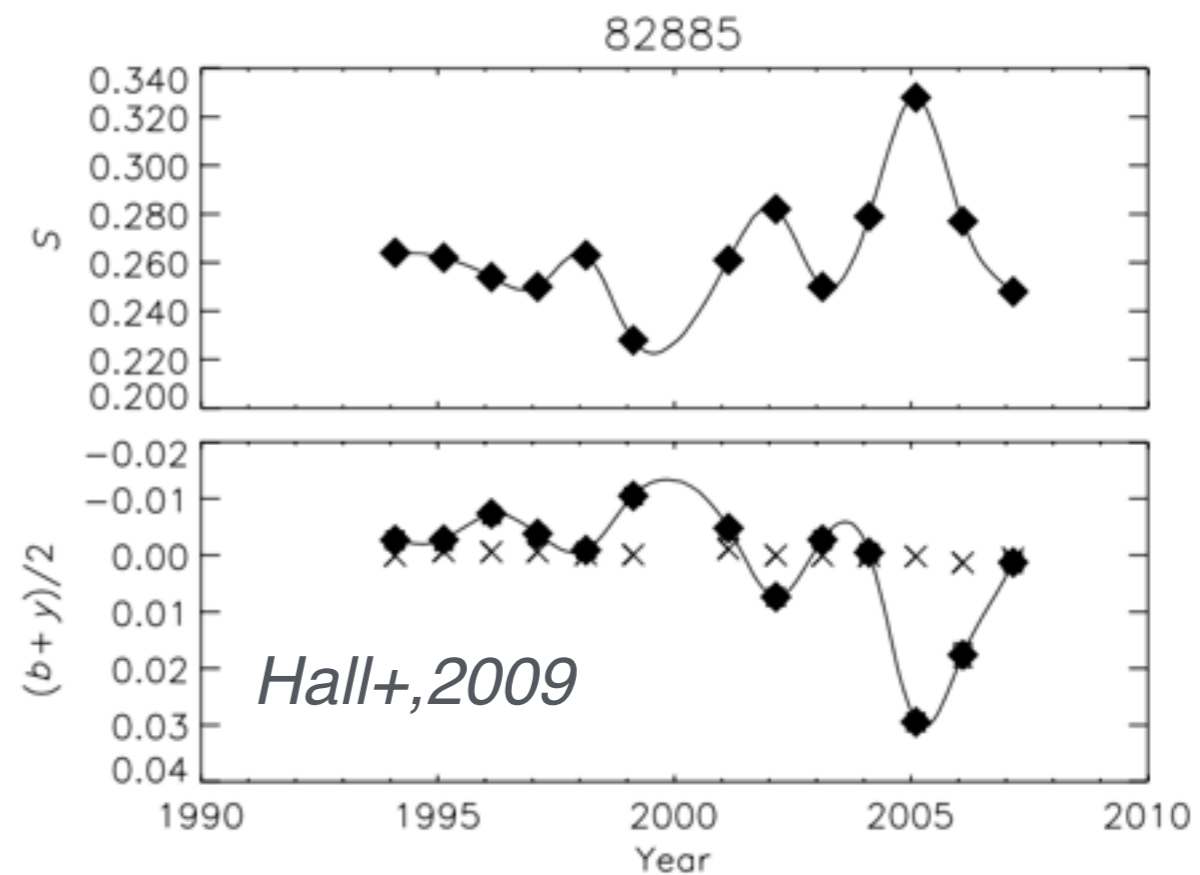
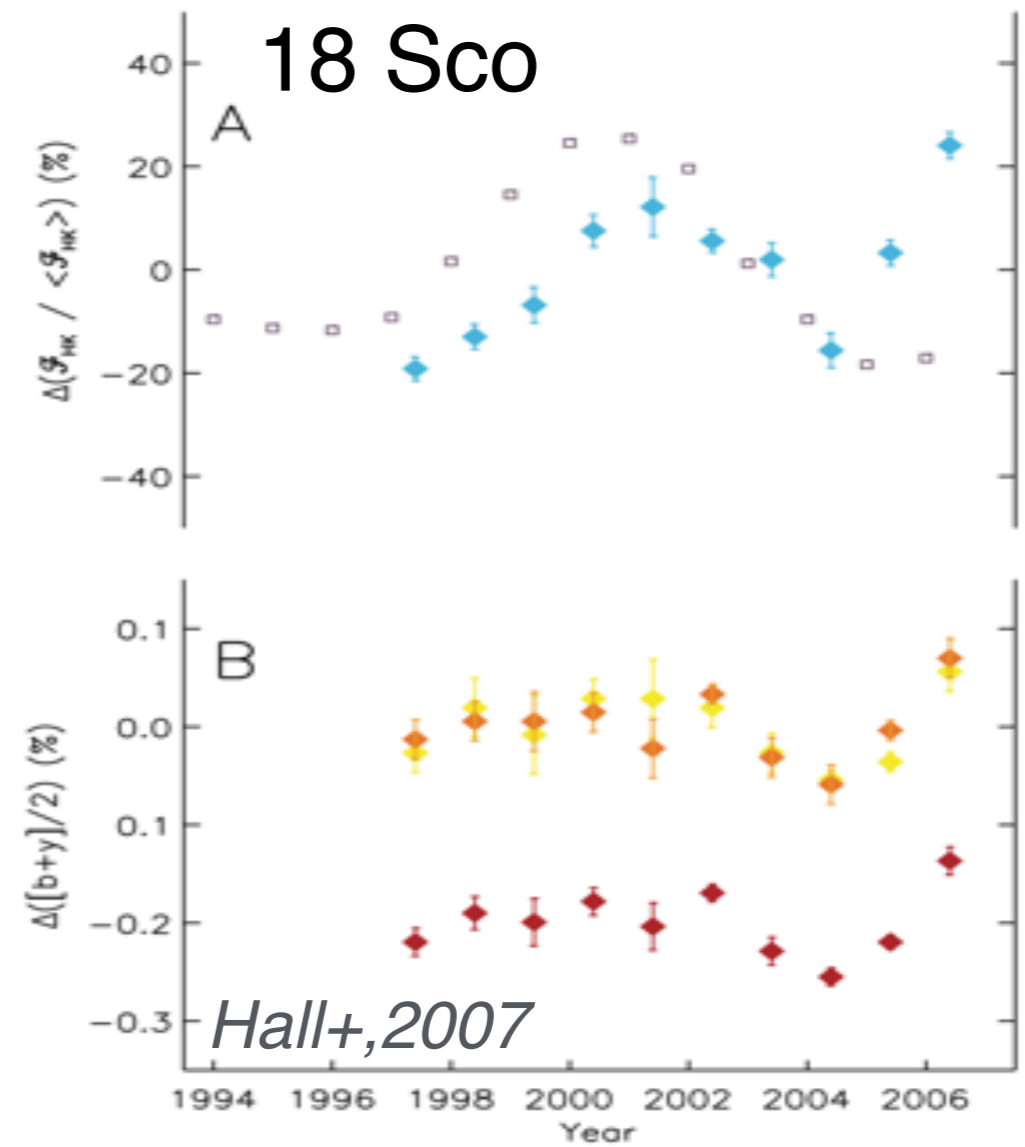
2016

1992

2016

# Spots or faculae dominated ?

- ◆ Both kind of stars exist.



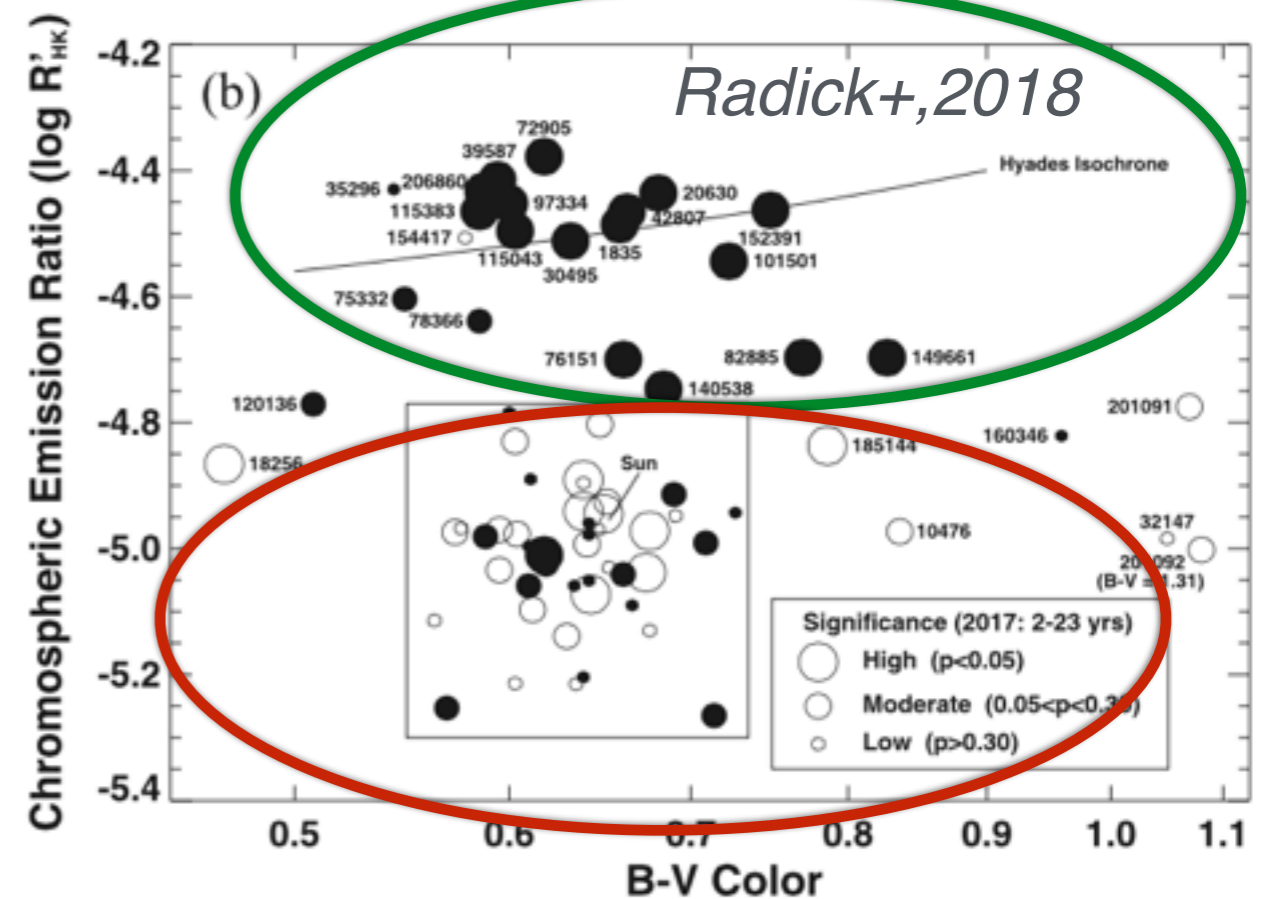
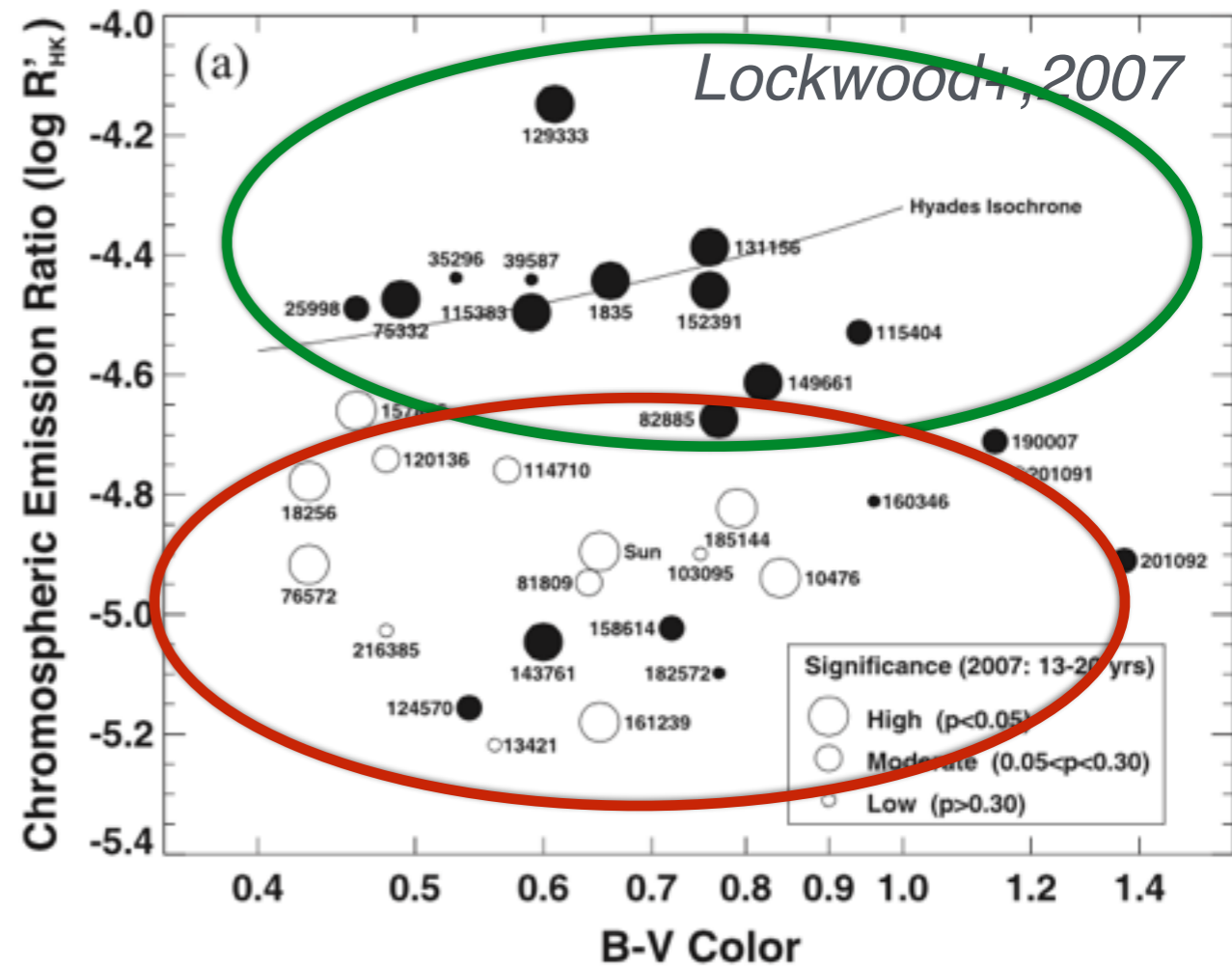


# Spots or faculae dominated ? (2)

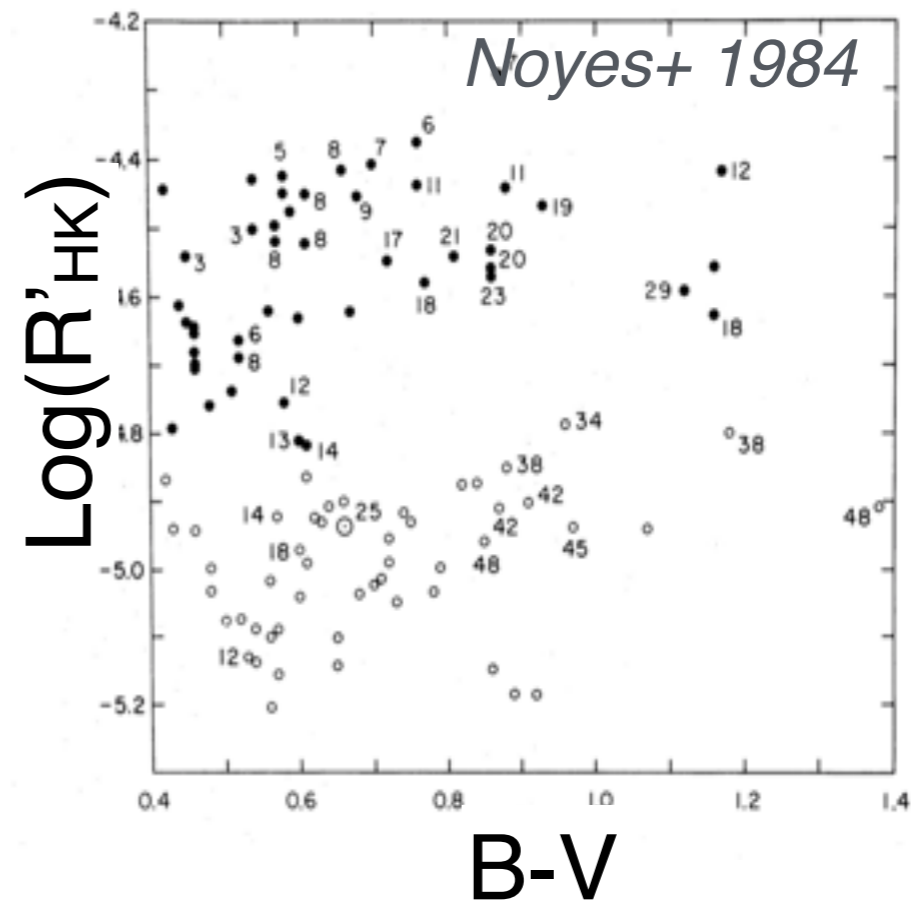
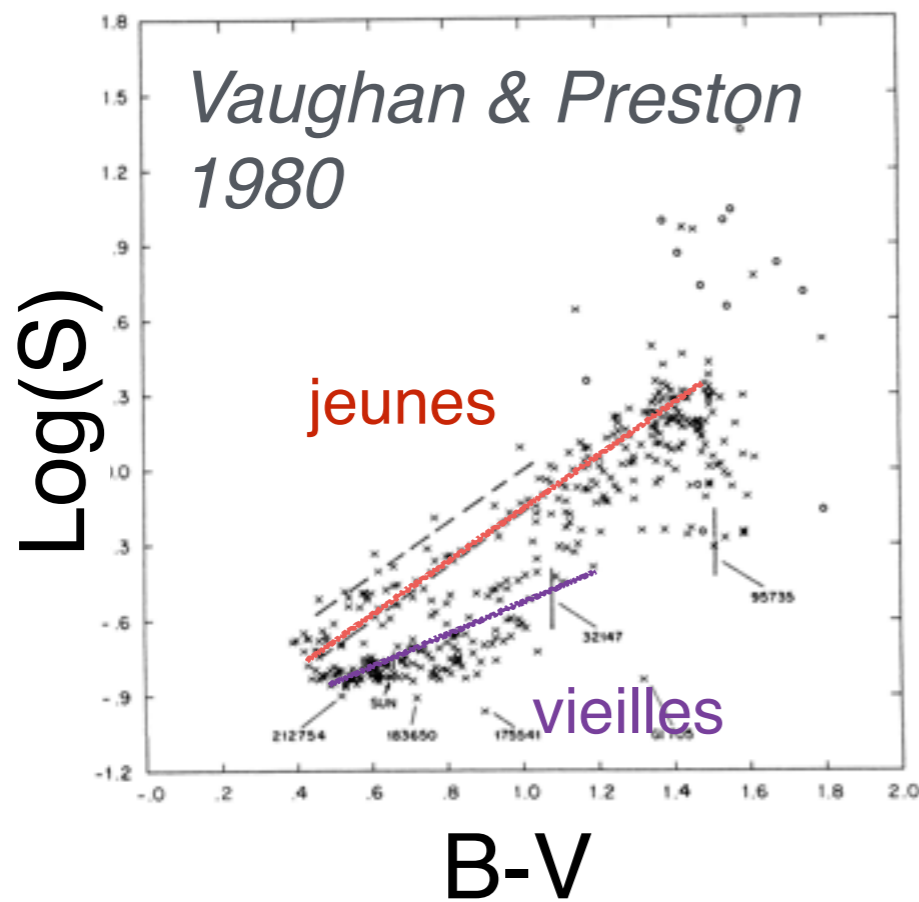
Un correlated: Young, active, relatively rapidly rotating stars. Spots dominated, negative correlation at rotational and cycle timescale

Correlated: Older, less active, more slowly rotating Sun-age stars. Faculae dominated

- ◆ The separation is not far from the Vaughan & Preston gap
- ◆ Note that among the less active stars, the Sun has a comparatively smooth, regular activity cycle.



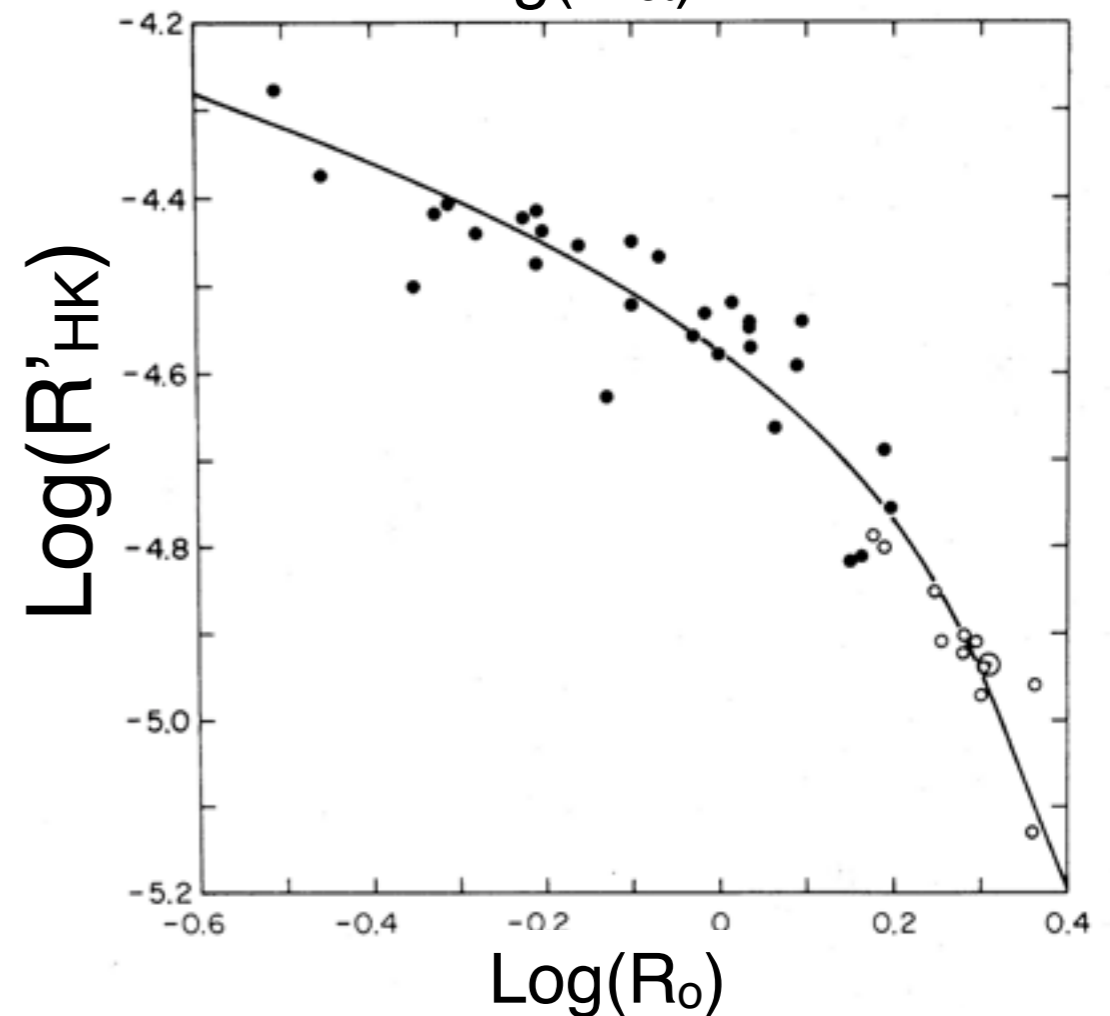
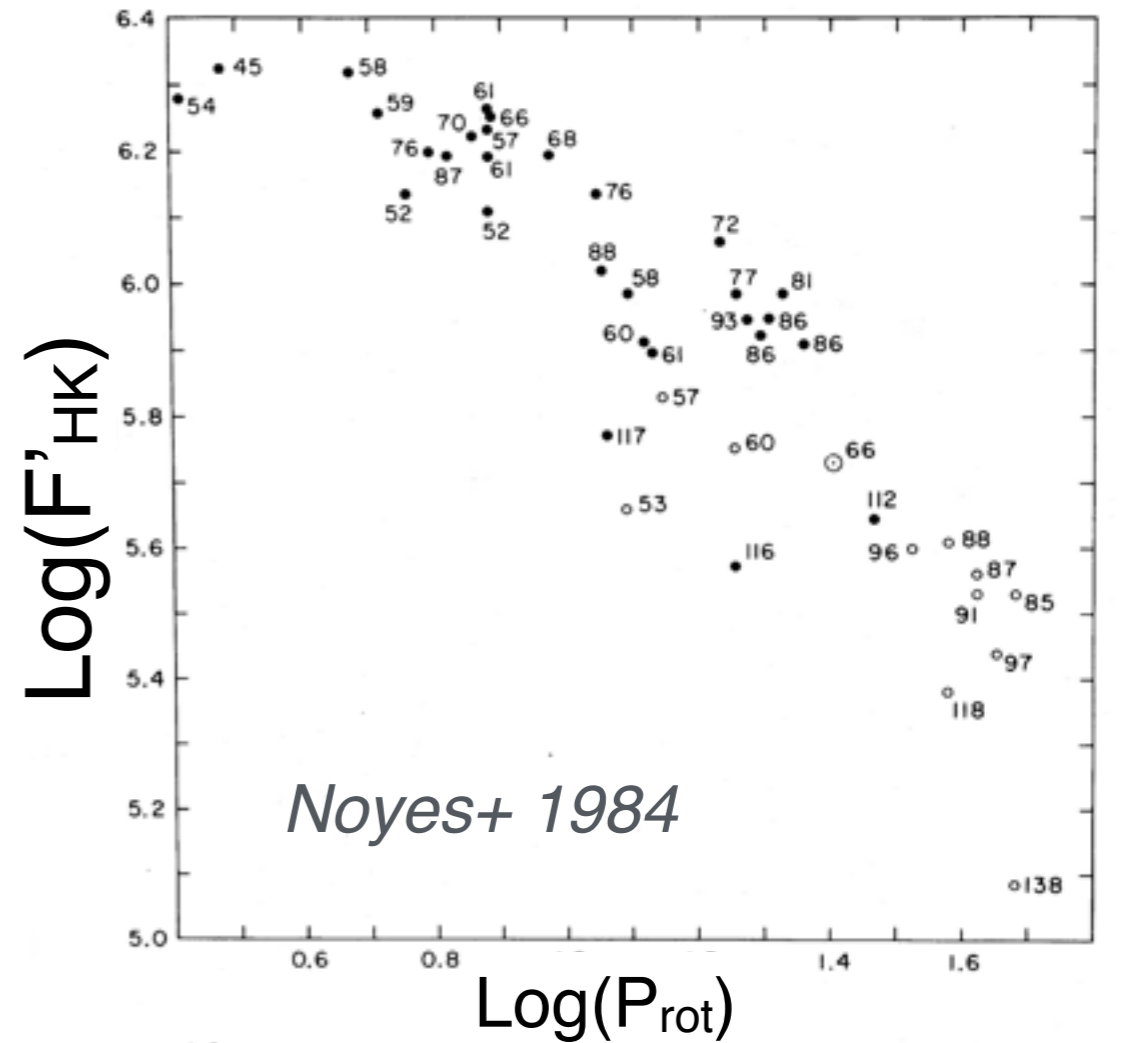
# The Vaughan&Preston gap (1)



- ◆ Vaughan&Preston gap: empty region in the chromospheric activity vs B-V diagram
- ◆ What is causing the GAP ?
  - ✿ Distinct stellar population: young and active vs old and inactive ? Vaughan & Preston 1980
  - ✿ Different dynamo mechanism ? Durney+ 1981
  - ✿ Fast spin-down of stars at some critical moment Noyes 84
- ◆ Is the Bohm-Vitense gap equivalent ?
- ◆ Why is the Sun sitting in the middle ?

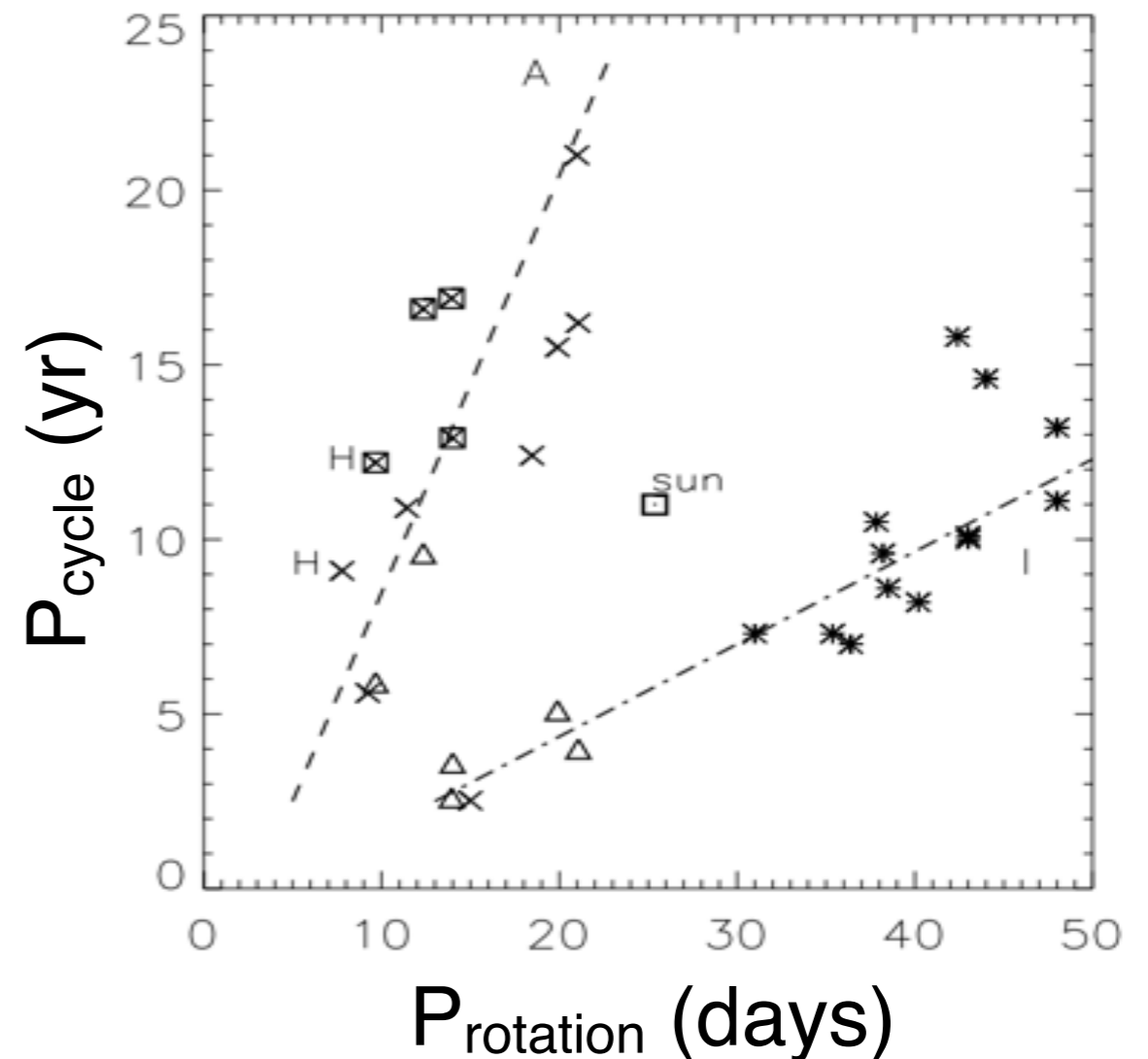
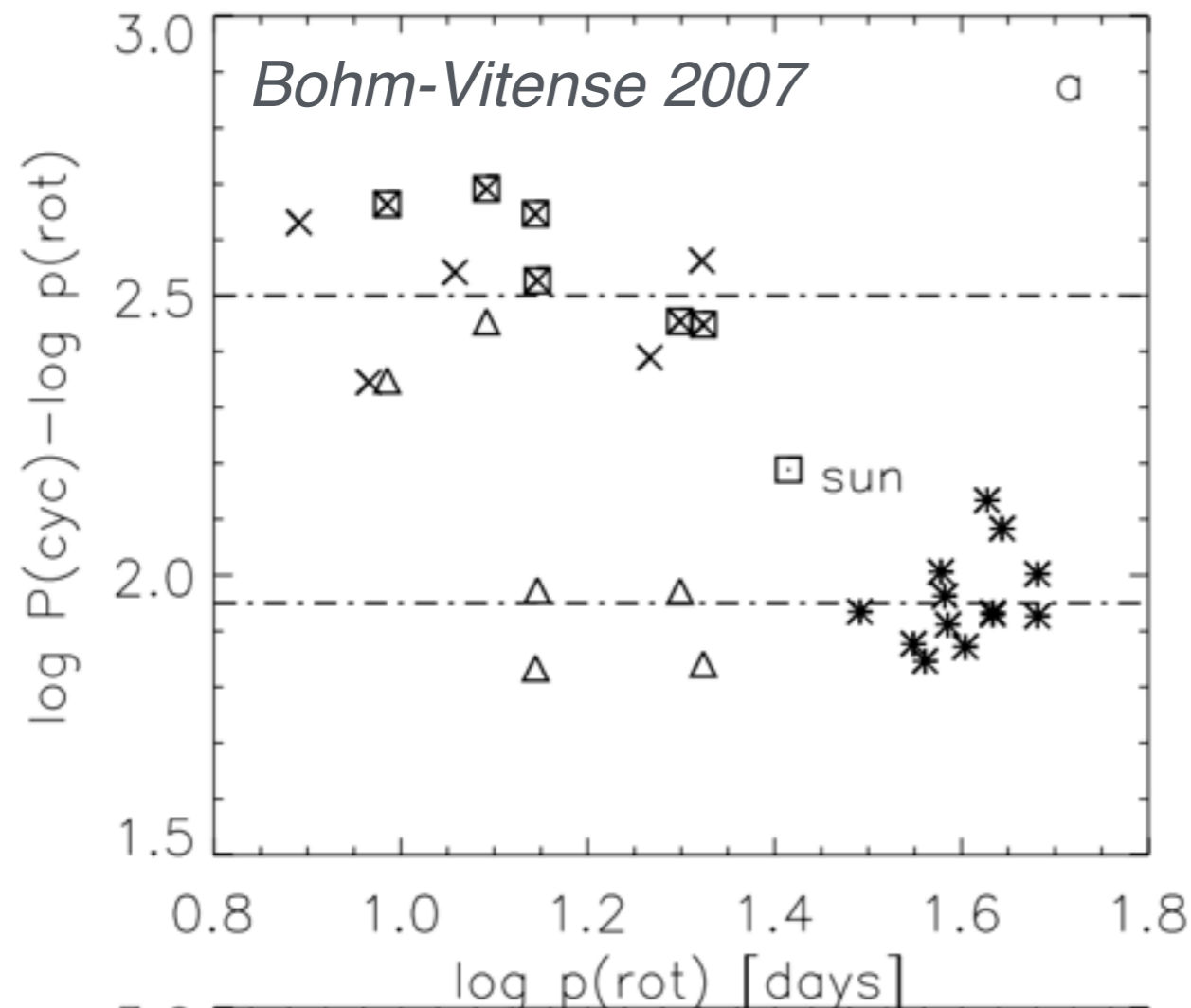
# The Vaughan&Preston gap (2)

- ◆ Chromospheric activity decreases with rotation rate and therefore with age (Skumanich 1972)
  - ✿ Only one branch here
- ◆ It exists a parameter, the Rossby number, that allows to « group » all stars :  $R_o = P_{rot} / \tau_c$ 
  - ✿ Take into account both the rotation period and the spectral type
  - ✿ important for dynamo modeling
  - ✿ Support only one different dynamo mechanisms for the two branches



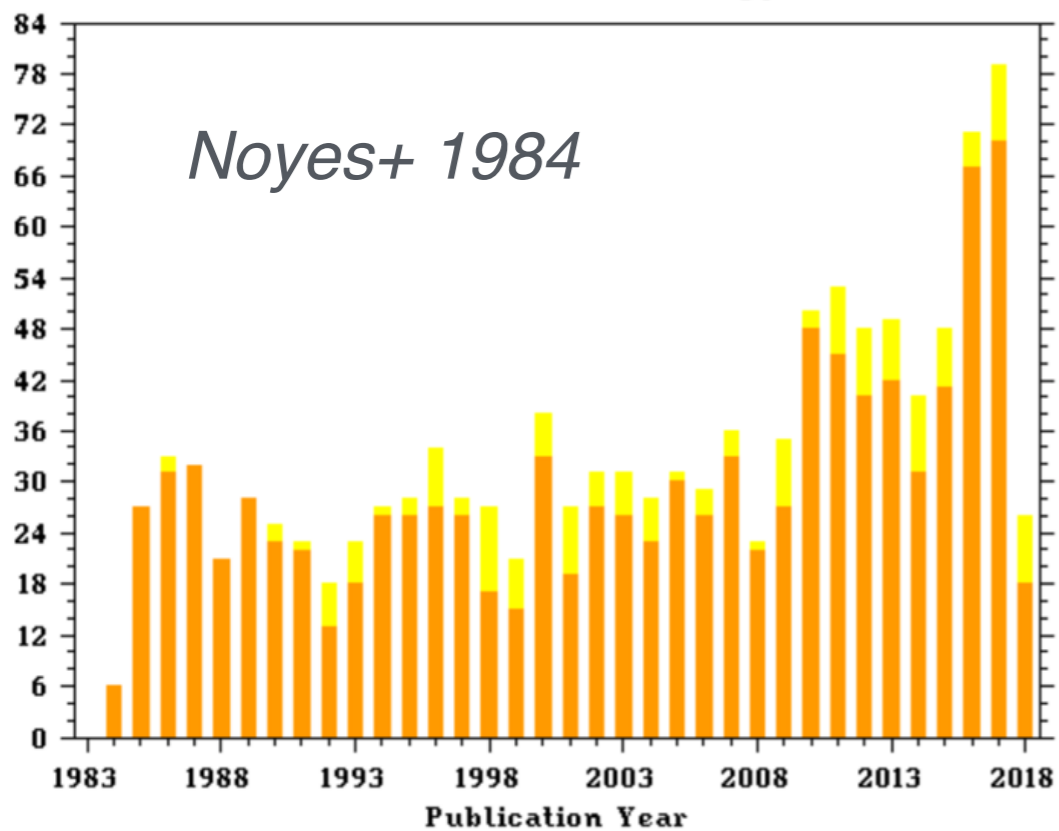


# The gap and the position of the Sun

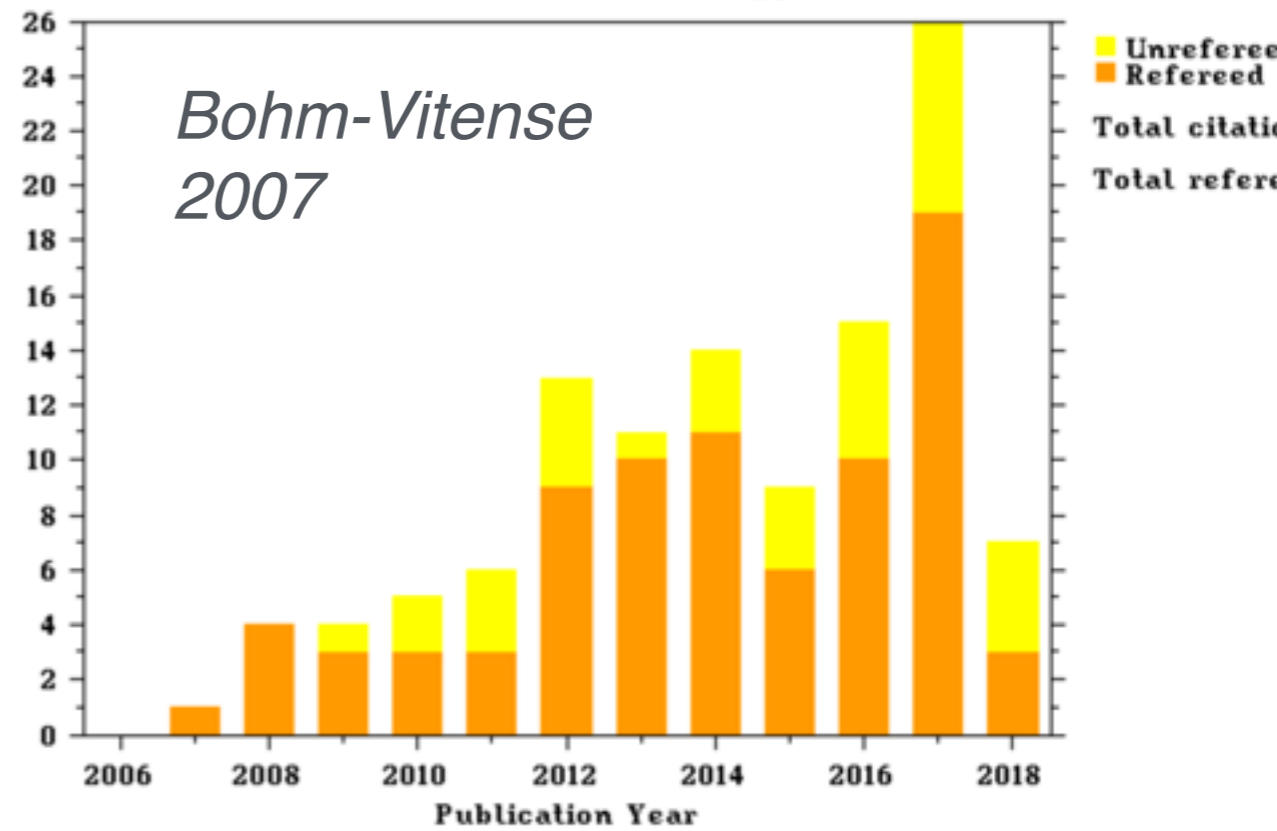


- ◆ Ratio  $P_{\text{cycle}}/P_{\text{rot}}$  roughly constant for each branch
- ◆ Means  $P_{\text{cycle}}$  increases with  $P_{\text{rot}}$
- ◆ Why is the Sun sitting in the middle ?

Citations/Publication Year for 1984ApJ...279..763N

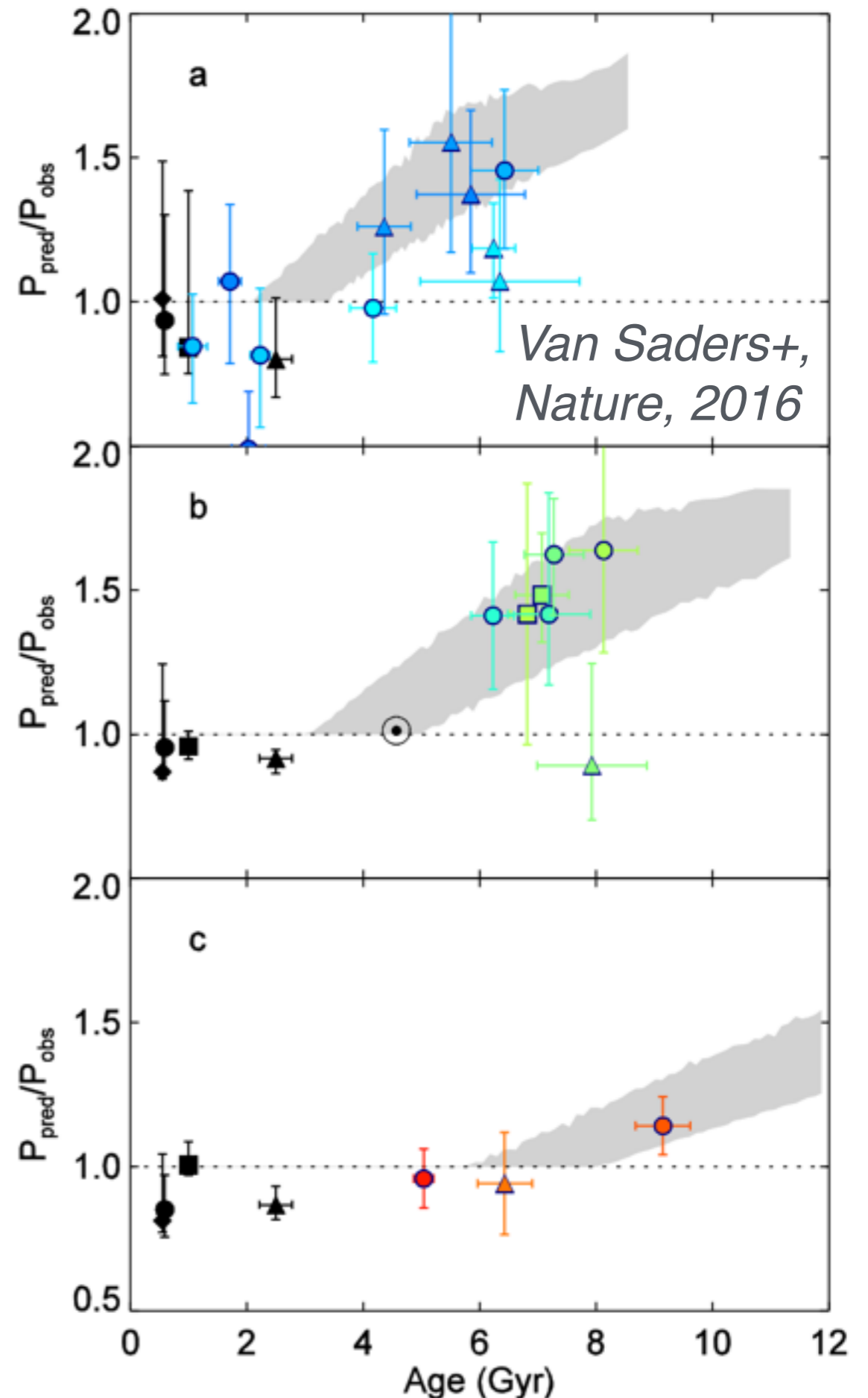


Citations/Publication Year for 2007ApJ...657..486B



# A recently proposed explanation for the gap (1)

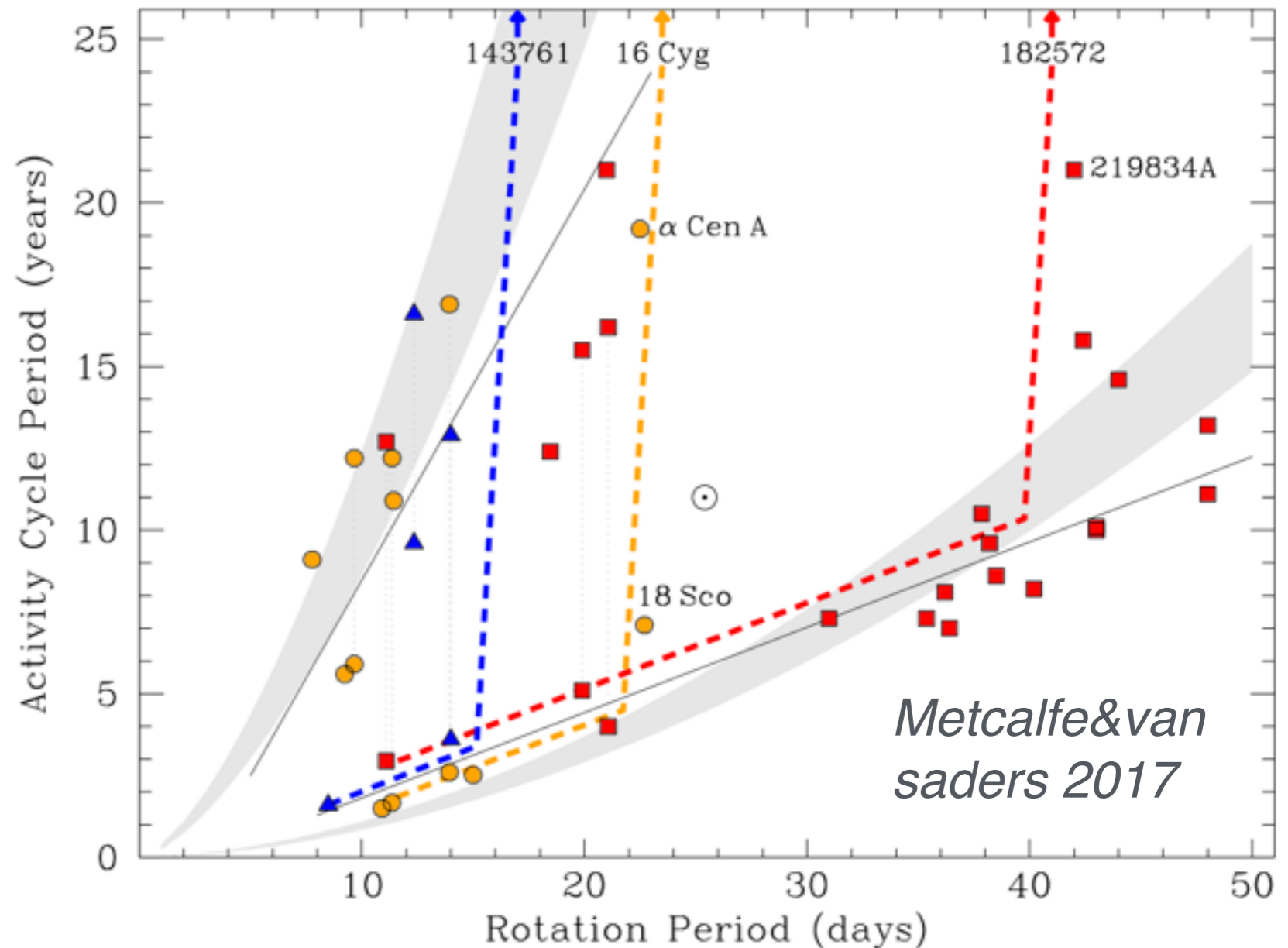
- ◆ Rotation decrease with age (magnetic braking)
- ◆ But old stars rotate faster than expected
- ◆ Only models including a critical Rossby number ( $\sim 2$ ) above which the magnetic braking is strongly reduced (rotation decrease less quickly) can reproduce the observation





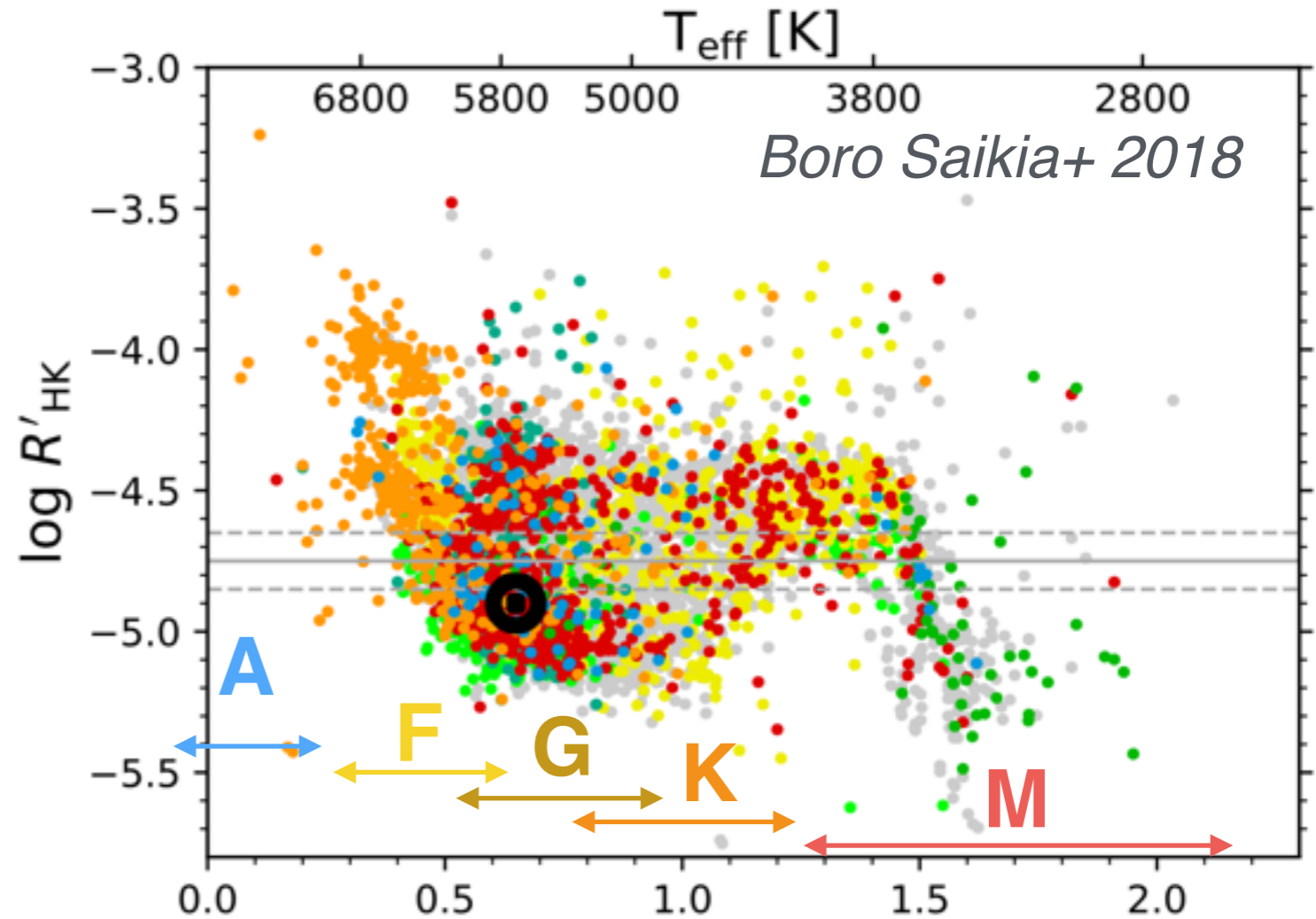
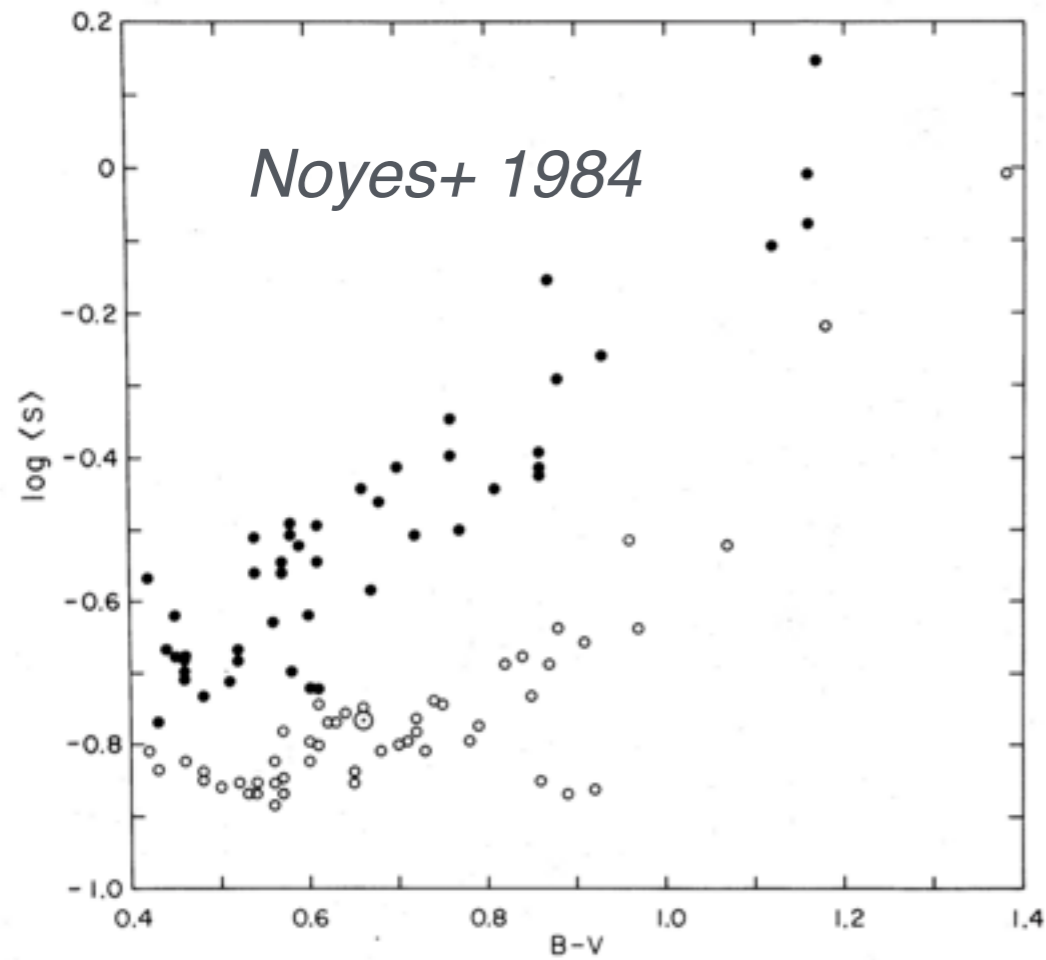
# A recently proposed explanation for the gap (2)

- ◆ With age, rotation period increases.
- ◆ Above the critical Rossby number, rotation periods increase much less quickly..
- ◆ ... while cycle period reacts somehow...

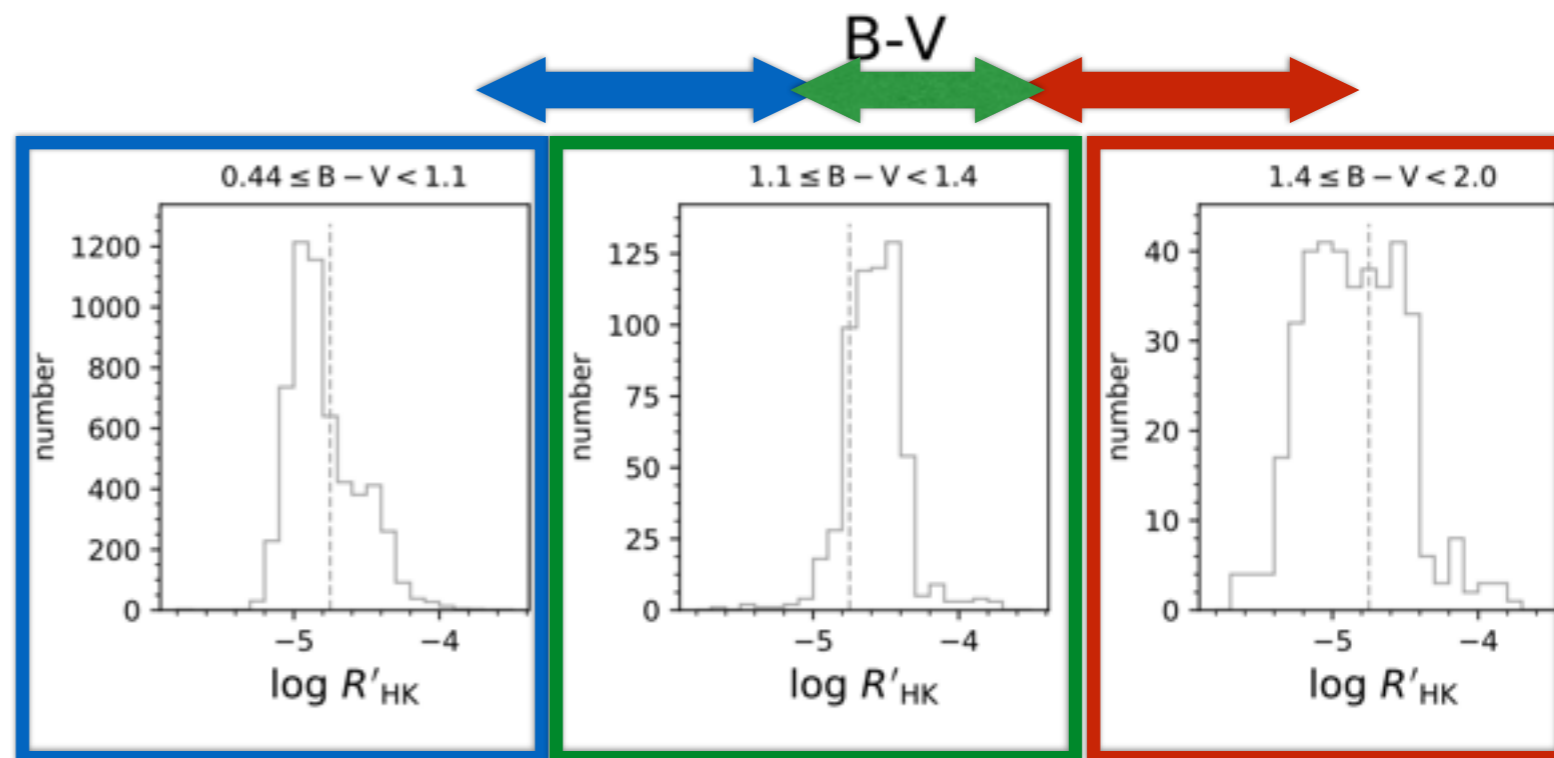


- ◆ Or simply a sample problem ?

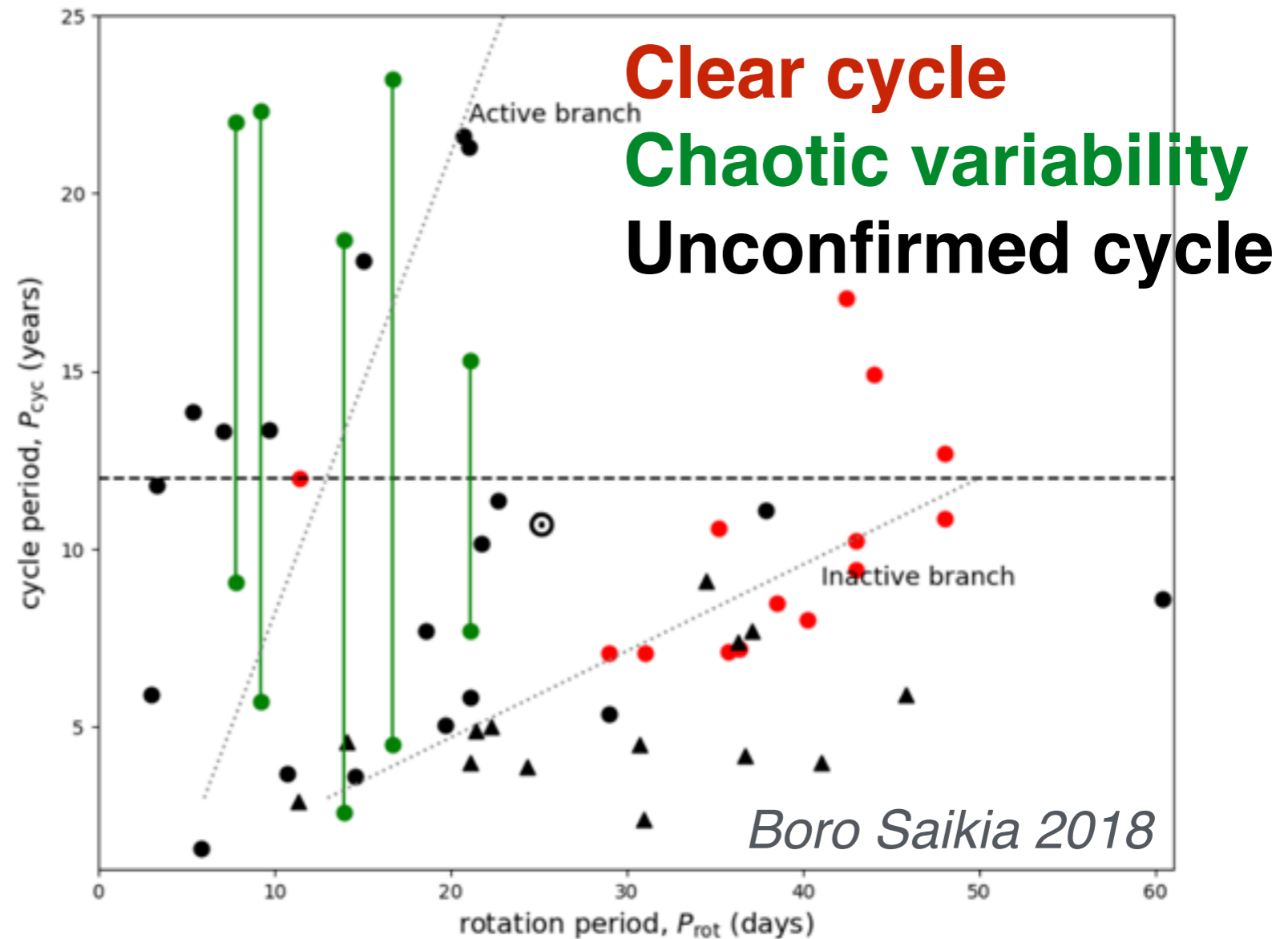
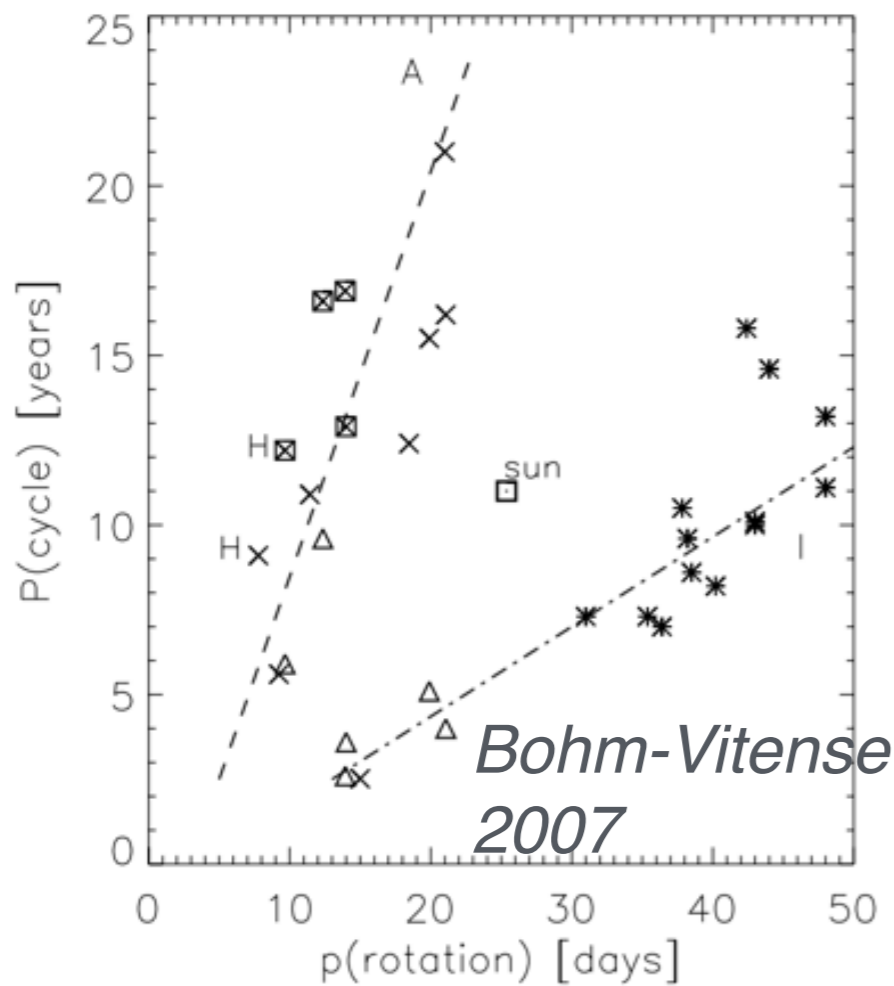
# Is the gap existing ?



- ◆ Is the gap existing ?
- ✿ Maybe just a continuous decrease in activity as the star is spinning down with age on the MS



# Is the gap existing ? (2)



- ◆ Clear cycle only on the Inactive branch
  - ✿ Linear relation with  $P_{rot}$
- ◆ Stars with Multiple and Probable cycles fill the gap
  - ✿ Sun not alone anymore
  - ✿ No clear relation with  $P_{rot}$

# What is influencing stellar variability beyond rotation ?

## ◆ Metallicity

- ✿ Somehow in the dynamo ?
- ✿ Fraunhofer lines increase the variability in the solar case, as an effect of radiative transfert Shapiro+ 2015, Karoff+ 2018

## ◆ Inclination (relative effects) Shapiro+ 2016

- ✿ going from an inclination of  $90^\circ$  (view from ecliptic) to  $0^\circ$ , the area of magnetic features decreases because of the activity bands.
- ✿ Spots appear less dark or even bright when close to the limb
- ✿ Faculae are brighter near the limb in visible, and darker in UV
- ➔ Variability increases in the visible and decreases below 400nm. (with decreasing variability)



**the end**