

A scenic view of a mountain town, likely Courmayeur, with snow-capped peaks in the background. The town is built on a hillside, and the mountains are covered in dense green forests. The sky is clear and blue.

Processus microscopiques et macroscopiques en Physique Stellaire

S. Turck-Chièze Service d'Astrophysique / Irfu / CEA

Les grands axes du Programme National de **Physique** Stellaire

- Formation stellaire Chocs radiatifs
- Magnétisme Complexité, instabilités hydro M...
- Vers une nouvelle génération de modèles stellaires
.... Phases avancées instabilités, équation d'état
Opacités, chocs radiatifs
- Interaction étoile avec son environnement
.... Traitement atmosphère, transfert radiatif

Physique stellaire autour des grands lasers

Répond à une demande de l'

ASTROPHYSIQUE DU VINGT
ET UNIEME SIECLE

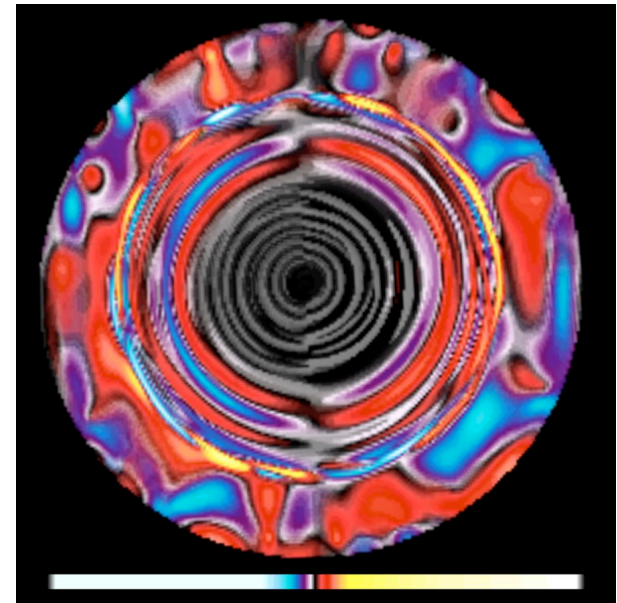
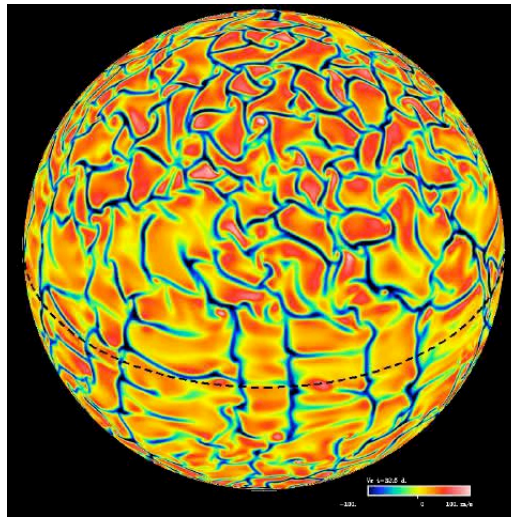
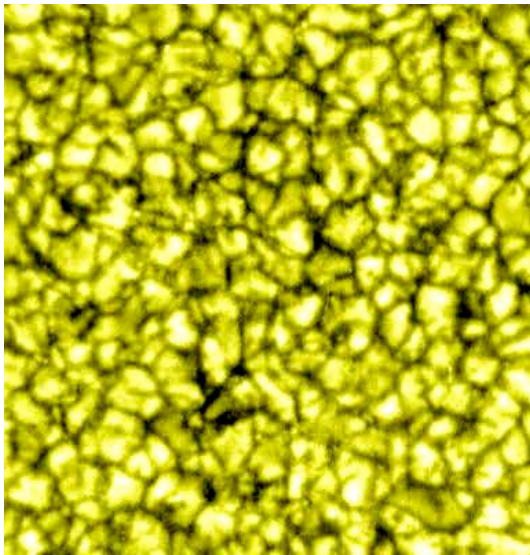
L'Astrophysique du 21ème siècle ...

- Comprendre la formation des étoiles
- Comprendre l'origine du magnétisme stellaire
- Comprendre l'explosion des supernovae
- Comprendre les systèmes étoile planètes et leur origine

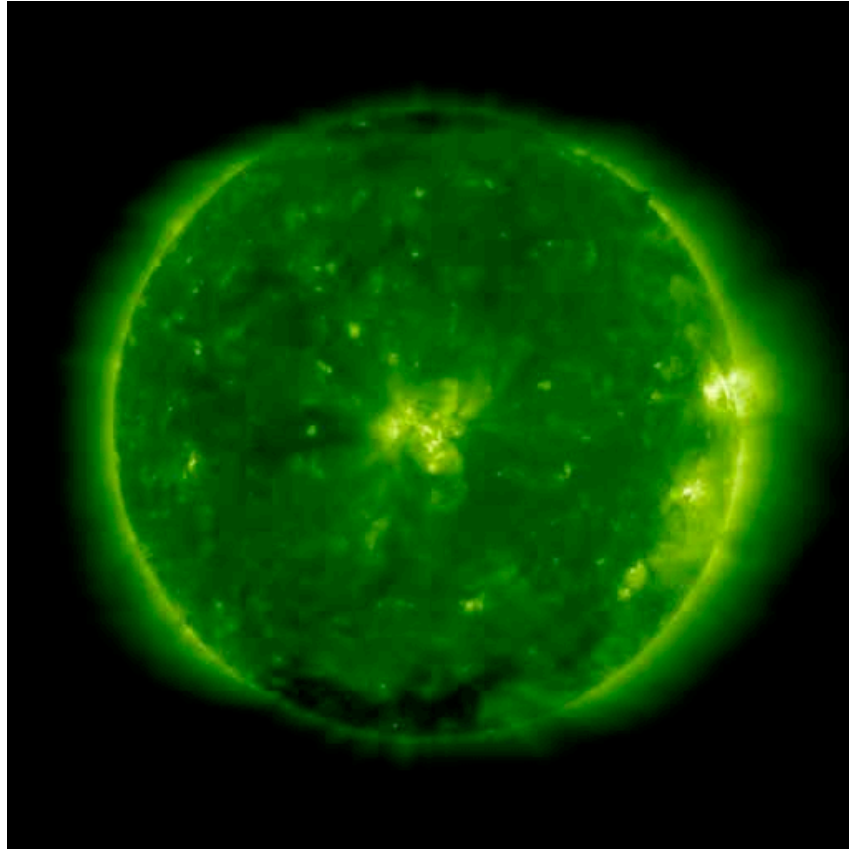
La nouvelle génération de modèles stellaires est encore dans l'enfance

Les difficultés principales aujourd'hui

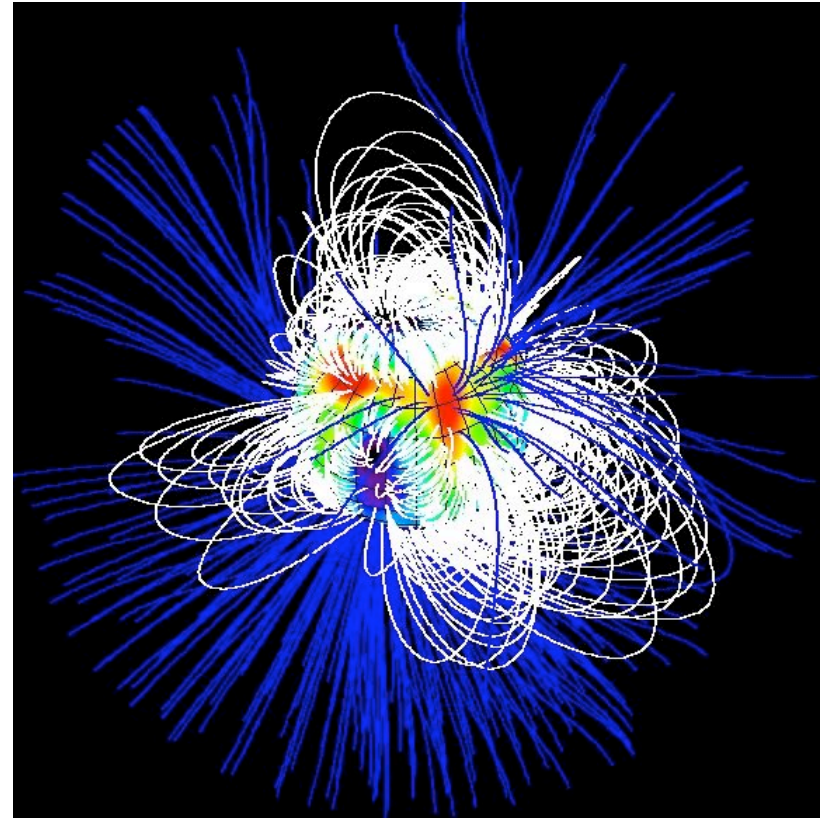
- Processus à considérer sont mêlés et il est difficile de trouver le dominant ou de bien signer le rôle de chaque processus
- Capacité des simulations numériques
 - Grandes échelles et petites échelles



- Grande capacité d'observations



Soleil vu par EIT /SoHO
tout au long du cycle 23



SU Aurigae vu par NARVAL
+ ESPADON

4 Exemples

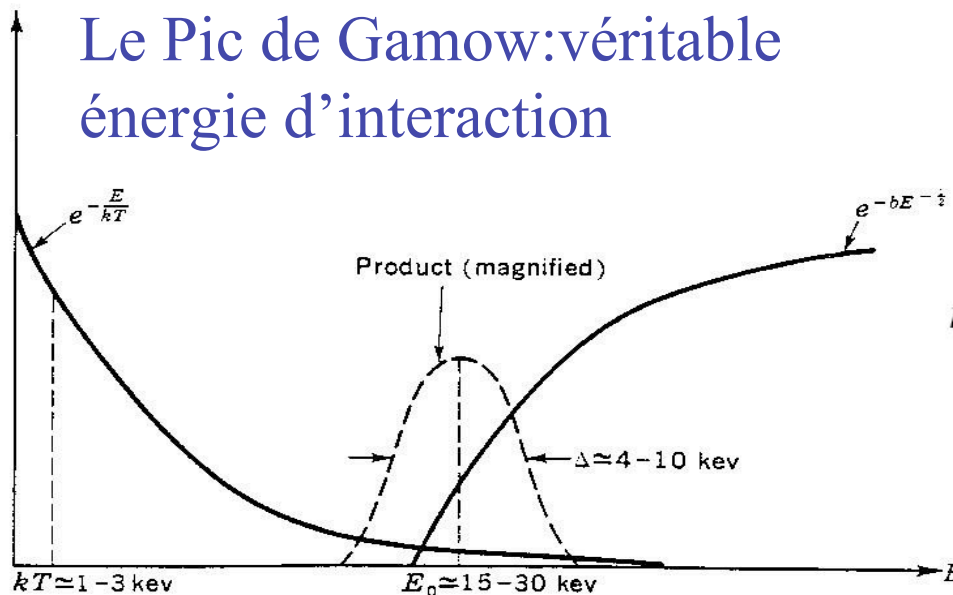
- Réactions nucléaires
- Le Soleil apporte des contraintes directes et indirectes
- Les régions d'instabilité dans le diagramme Hersprung Russell
- L'origine du magnétisme

- Exemple 1:

Les réactions nucléaires

Energie nucléaire

Le Pic de Gamow: véritable énergie d'interaction



$$E_0 = [b kT / 2]^{2/3} \quad E_0 = 1.220 (Z_1^2 Z_2^2 A T_6^2)^{1/3} \text{ keV}$$

Mesures de sections efficaces en laboratoire

$$\sigma(E) = \frac{S(E)}{E} P(E), \quad P(E) = e^{-G}, \quad G = 2\pi\eta,$$

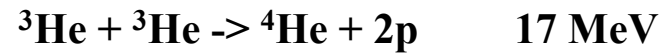
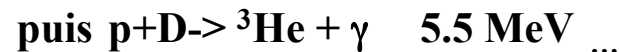
$$\eta = \left(\frac{\mu}{2}\right)^{1/2} \frac{Z_1 Z_2 e^2}{\hbar E^{1/2}},$$

Extrapolation au domaine de température,

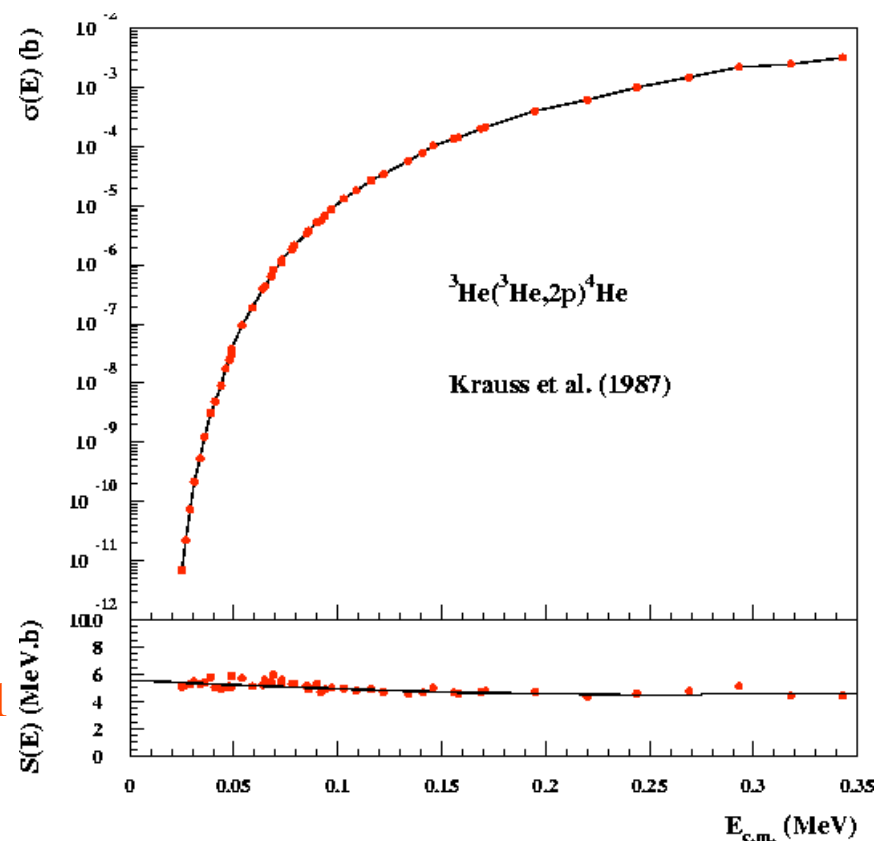
et au plasma: effet d'écrantage **centre solaire** $\Gamma = 1$

Dzitko et al. ApJ 1995;

20 ans de mesures + théorie: *Adelberger et al. Rev. Mod. Phys. 1998; Nacre*



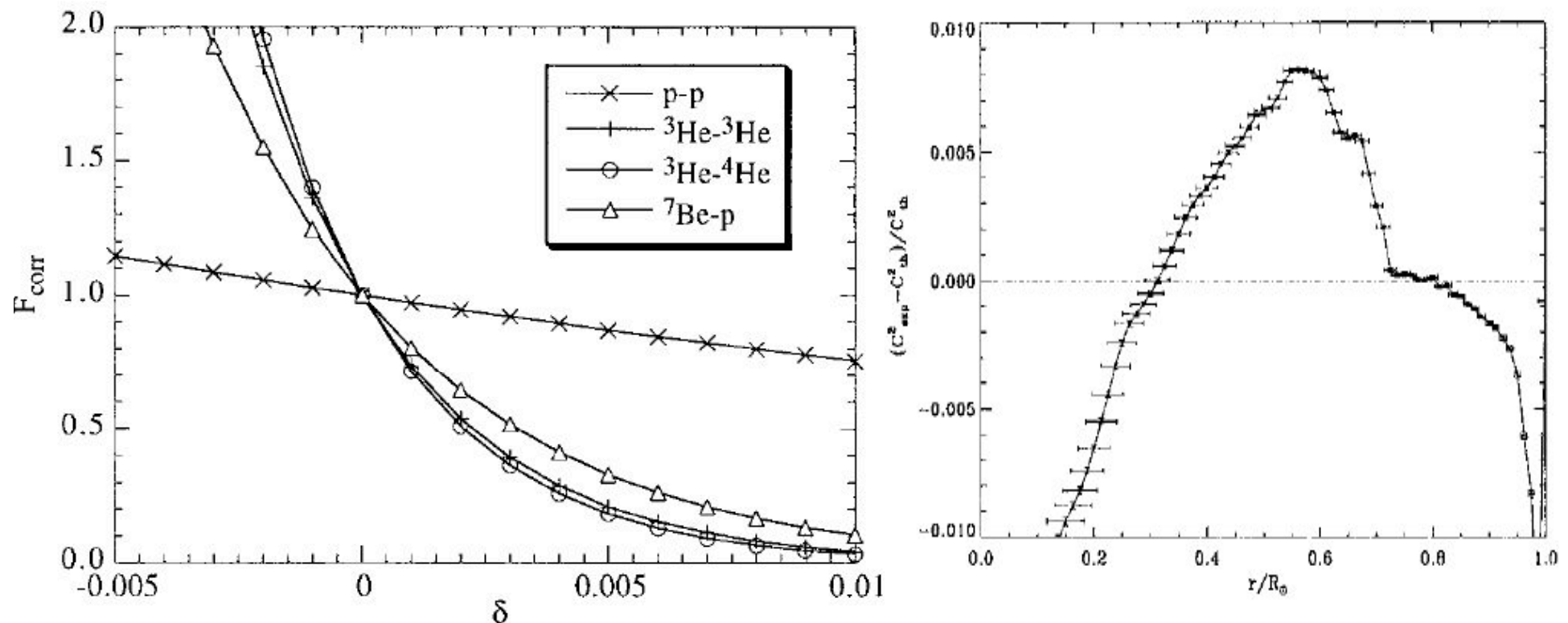
$$r_{12} \sim \int S(E) \exp(-E/kT - b/\sqrt{E}) dE,$$



Réactions nucléaires dans un plasma: distribution maxwellienne ?

$$(r_{12})_{\delta} = r_{12} F_{\text{corr}}(\delta).$$

$$F_{\text{corr}} = \left(1 + \frac{15\delta}{4}\right) \left(1 - \frac{7\delta E_0}{3kT}\right) e^{-\delta(E_0/kT)^2},$$



Impact d'une très faible déviation à la distribution de Maxwell-Boltzman et son impact sur les réactions nucléaires puis sur la vitesse du son

Turck-Chièze, Nghiem, Couvidat, Turcotte, Sol. Phys., 200, 323 (2001)

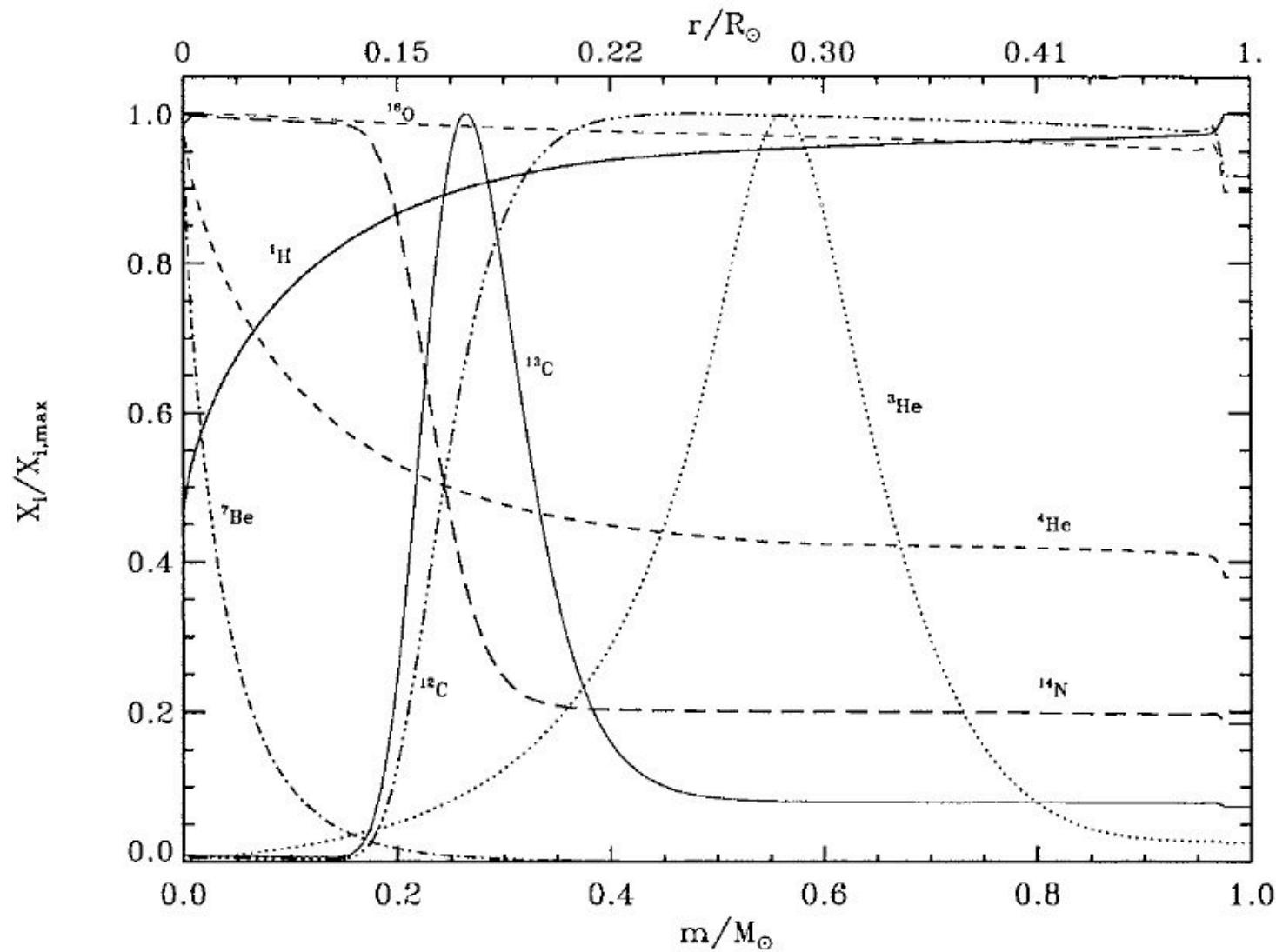


Figure 3. Top: radial dependence of the normalized abundances of the most crucial elements modified by the nuclear reactions. The maximum values are the following: H = 0.7386, ${}^3\text{He}$ = 0.00309, ${}^4\text{He}$ = 0.6350, ${}^7\text{Be}$ = 1.718×10^{-11} , ${}^{12}\text{C}$ = 0.0030, ${}^{13}\text{C}$ = 0.00044, ${}^{14}\text{N}$ = 0.0045, ${}^{16}\text{O}$ = 0.0085.

Expériences auprès des grands lasers

LMJ et NIF

Mesurer les taux de réactions directement

$$r_{12} \sim \int S(E) \exp(-E/kT - b/\sqrt{E}) dE$$

D+ T deviendrait

p +D

ou

$^4\text{He} + ^{12}\text{C}$

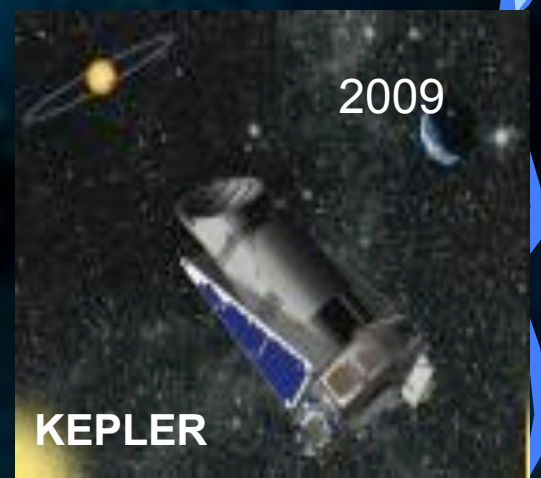
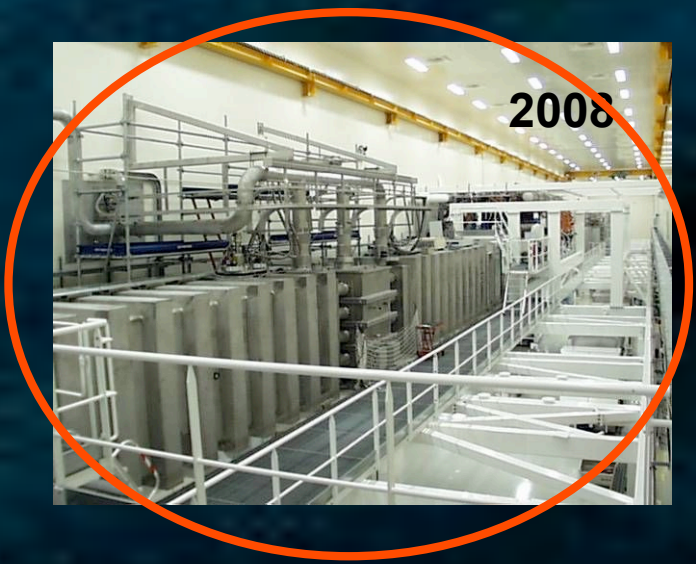
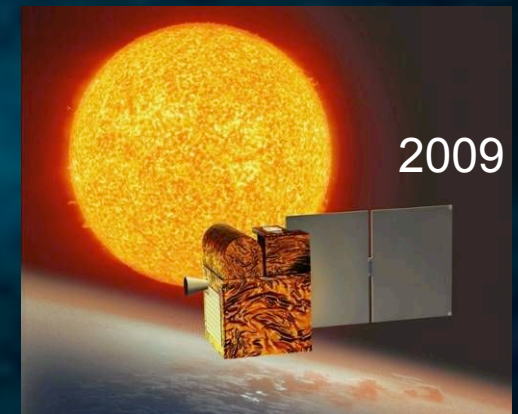
Exemple 2

Soleil: contraintes directes et indirectes
de la physique microscopique

encourage l'introduction des
processus dynamiques

SoHO COROT LIL SDO PICARD KEPLER

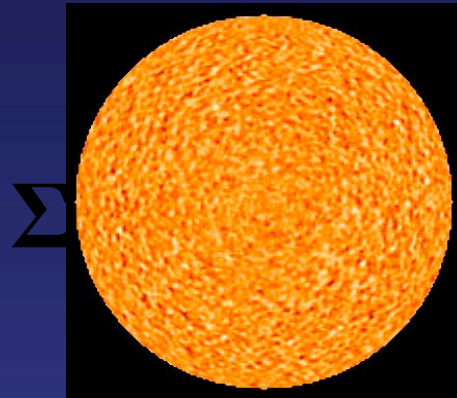
Développement de la sismologie solaire et stellaire



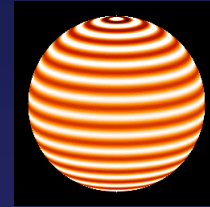
KEPLER

Observing Time Series

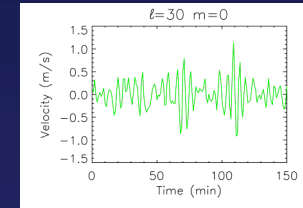
Global
Helioseismology



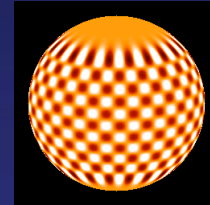
X



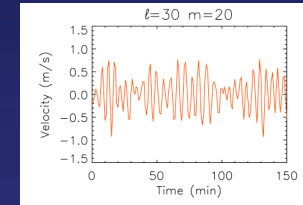
=



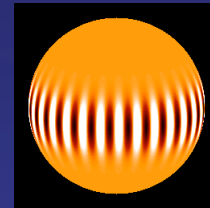
X



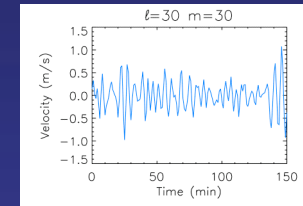
=



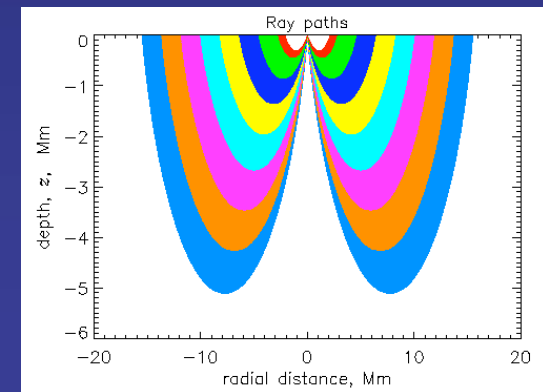
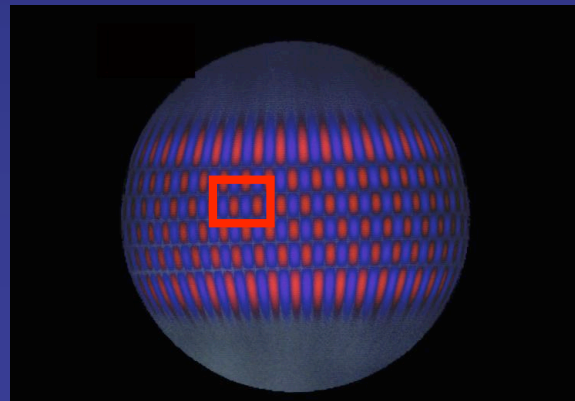
X



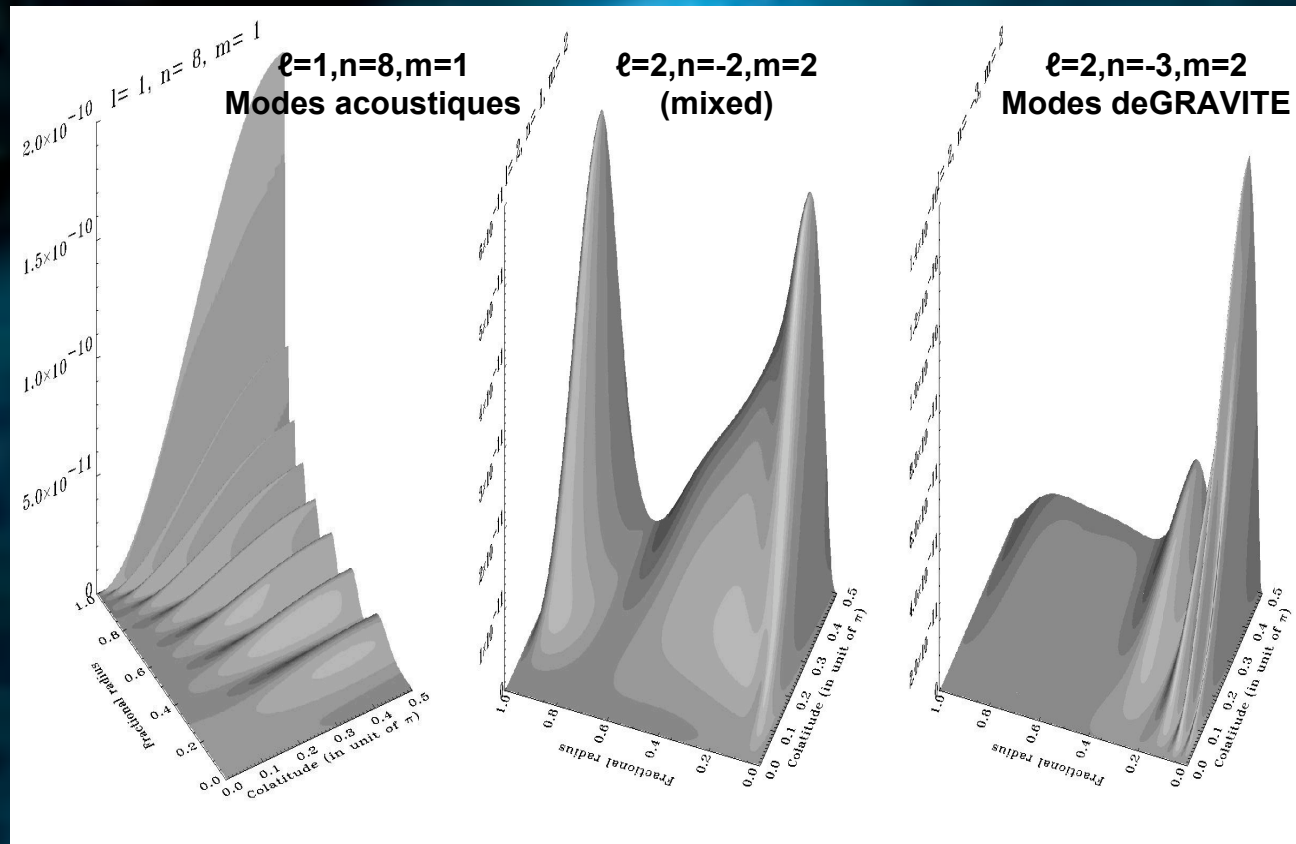
=



Local
Helioseismology



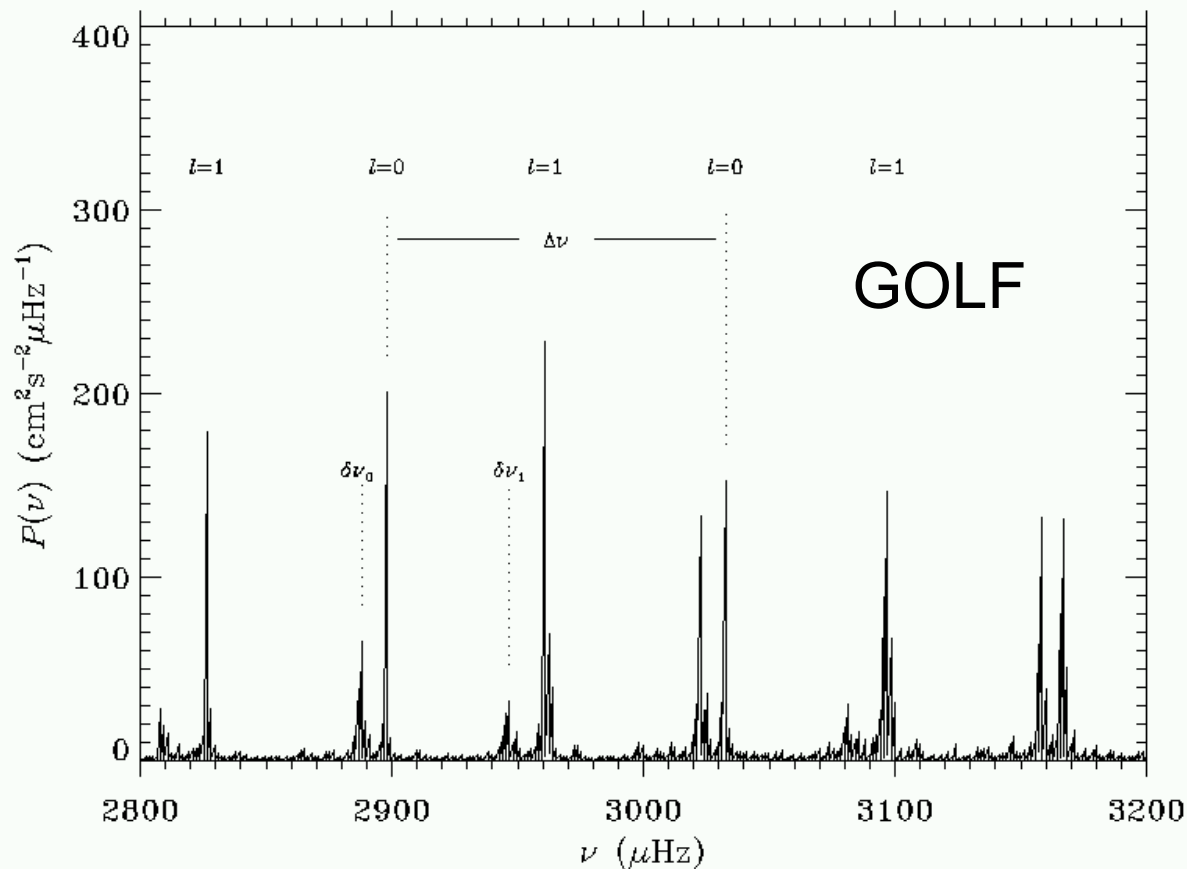
Quelles sont les régions sondées ?



Surtout la zone convective,
avec des millions de modes
aussi la région radiative

Principalement le
cœur des étoiles

Comparaison prédictions et observations



Extraction de l'écart à la vitesse du son théorique

Some characteristics of the modes

$$p'(r, \theta, \varphi, t) = p'(r) Y_l^m(\theta, \varphi) \exp(i\omega_{n,l,m} t),$$

and the vector displacement $\vec{\xi}$ as

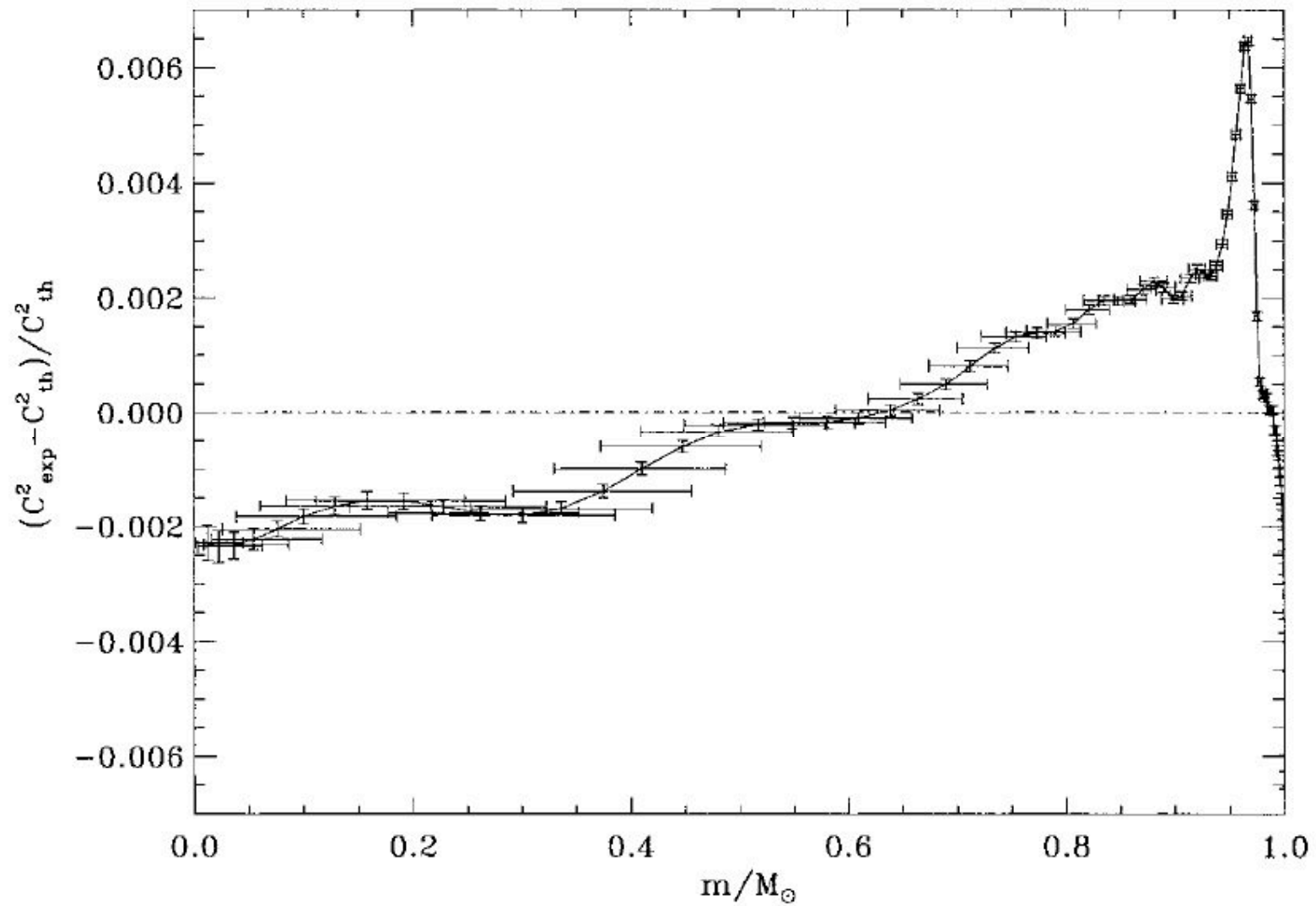
$$\vec{\xi}(r, \theta, \varphi, t) = \left(\xi_r(r), \xi_h(r) \frac{\partial}{\partial \theta}, \xi_h(r) \frac{\partial}{\sin \theta \partial \varphi} \right) Y_l^m(\theta, \varphi) \exp i\omega_{n,l,m} t$$

Dispersion equation

$$k_r^2 = \frac{1}{c_s^2} \left[F_l^2 \left(\frac{N^2}{\omega_{n,l,m}^2} - 1 \right) + \omega_{n,l,m}^2 - \omega_c^2 \right]$$

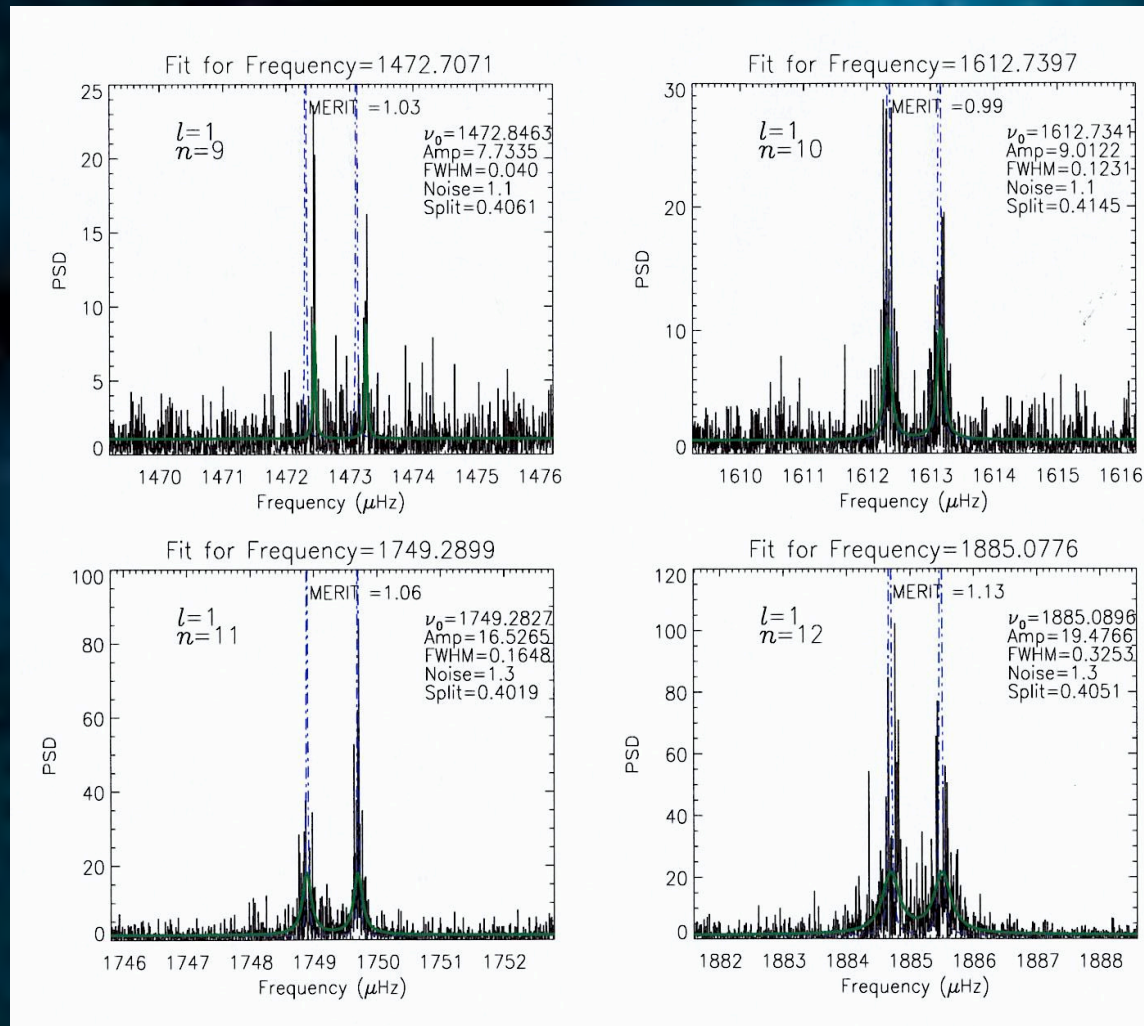
$F_l^2 = L^2 c_s^2 / r^2$ the Lamb frequency, $N^2 = g[1/\Gamma_1 d \ln p / dr - d \ln \rho / dr]$ the Brunt-Väisälä frequency, $\omega_c^2 = c_s^2(1 - 2dH_\rho/dr)/4H_\rho^2$ the acoustic cut-off frequency (~ 5.8 mHz), $H_\rho^{-1} = -d \ln \rho / dr$ the density scale height, Γ_1 the adiabatic exponent and $c_s^2 = \Gamma_1 p / \rho$ the sound speed.

Extraction de l'écart à la vitesse du son d'un modèle solaire à partir des fréquences de GOLF et MDI



Turck-Chièze et al. 2001, ApJ et Sol. Phys.

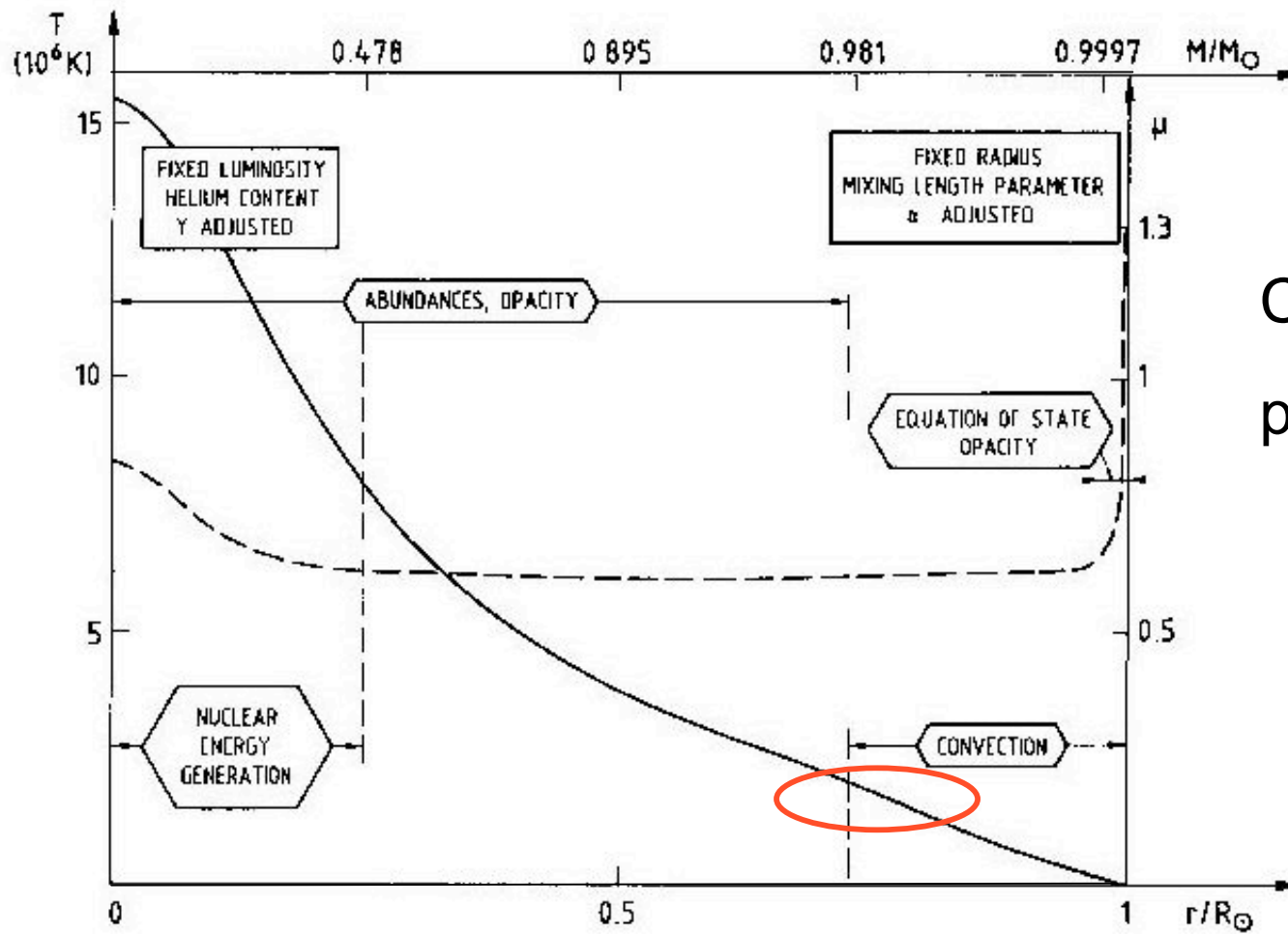
Extraction du splitting



Profil de rotation

Contraintes sur le champ magnétique

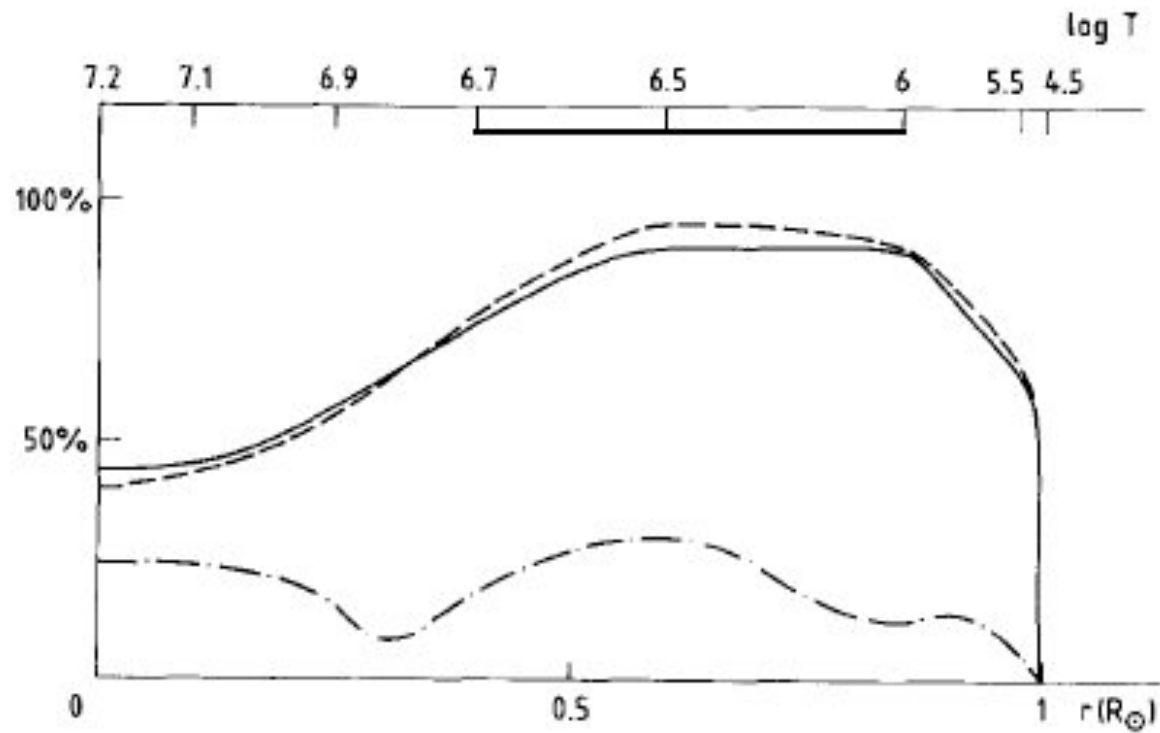
Sensibilité de la vitesse du son à la physique microscopique



$$C_s^2 = \gamma P/\rho$$

prop à T/μ

Contribution des éléments $Z > 2$ aux opacités du Soleil



Courtaud ..STC, Villemin Sol. Phys. 1990

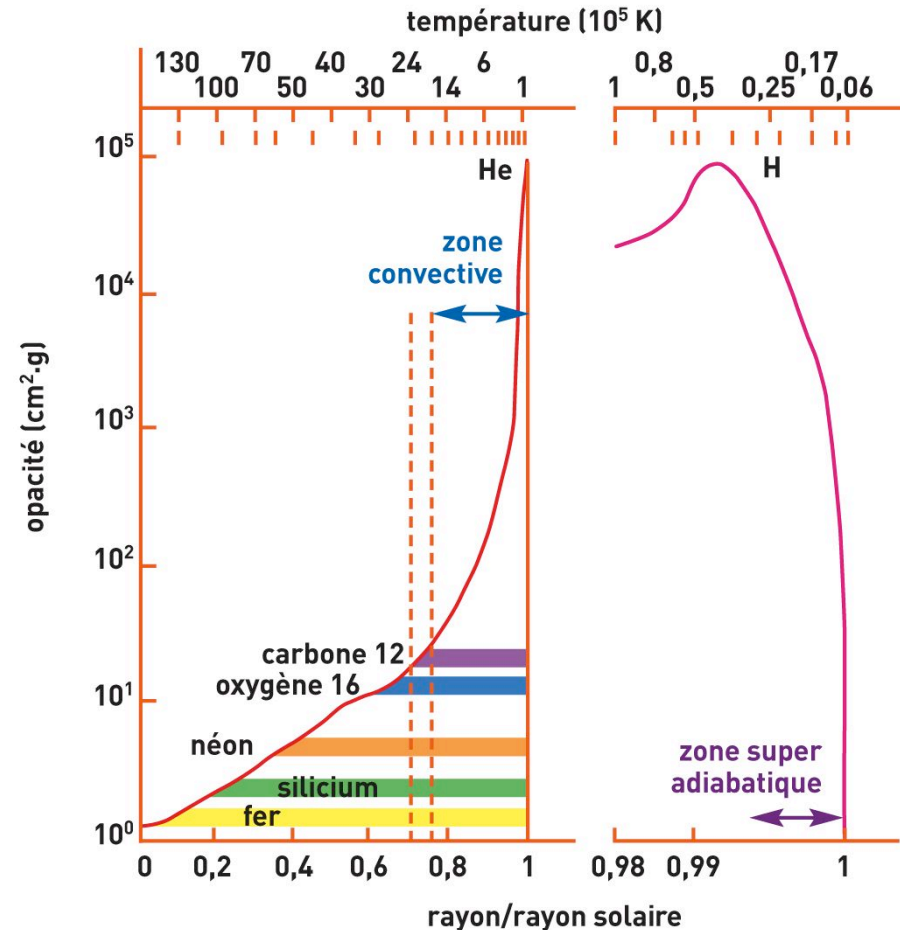
Les opacités gèrent la durée de vie des étoiles et leur évolution

$$dT/dr = - 3/ 4ac [\kappa\rho / T^3] [L(r)/ 4\pi r^2]$$

Moyenne de Rosseland

Degré d'ionisation
Equation d'état

Rôle important des éléments du
carbone au fer

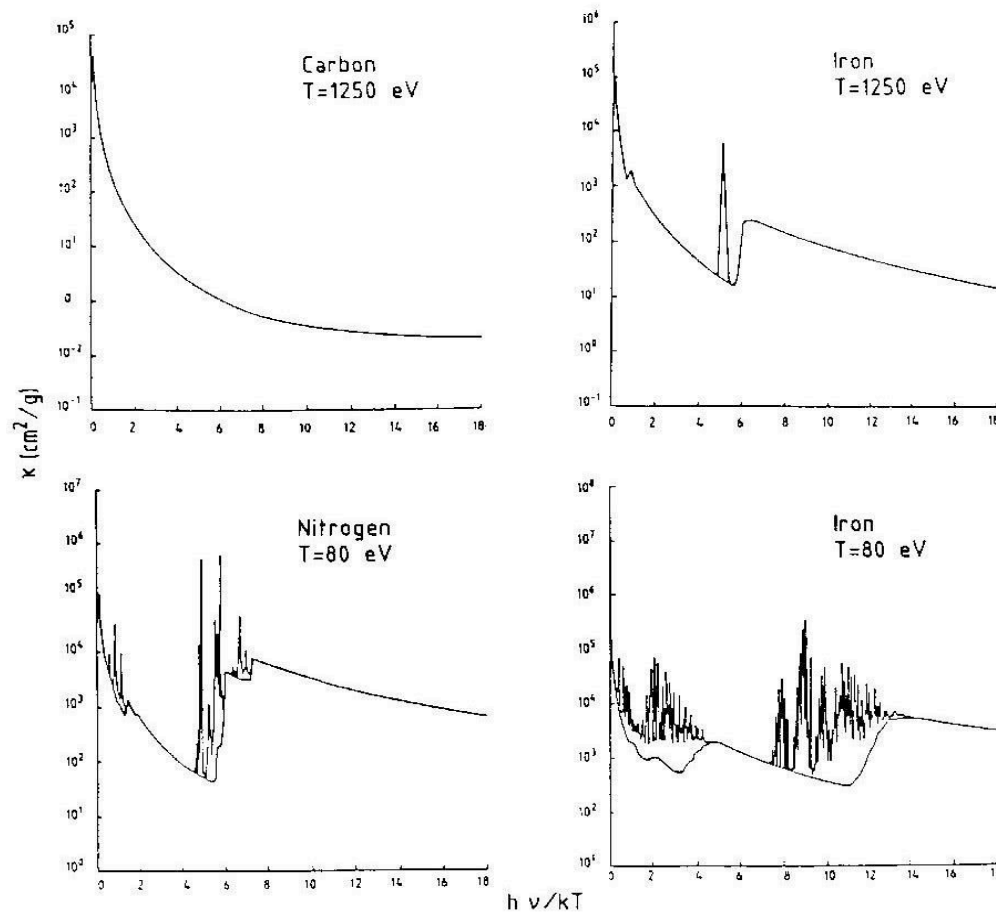


Aujourd'hui utilisation de **calculs atomiques de Livermore**: Rogers et Iglesias et al. 1996, tables disponibles pour calcul de mélanges adaptées à tout type d'étoiles, 2000

Les opacités stellaires

mélange de composition fixée dépendant de la position dans l'étoile

Hydrogène 0 à 72%, hélium 25 à 98% + 1 à 2 % éléments plus lourds fraction masse

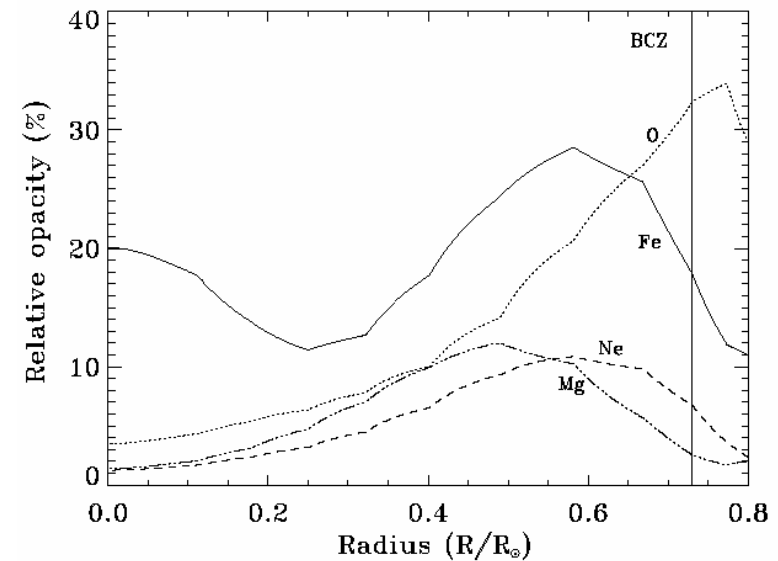


Fe quelques 10^{-4} en fraction nombre

CNO quelques 10^{-3}

libre-libre Z^2

lié-libre Z^4



Soleil aujourd'hui avec nouvelle composition

Opacité en fonction du paramètre de dégénérescence

$$\eta = E_{\text{Fermi}}/E_{\text{th}}$$

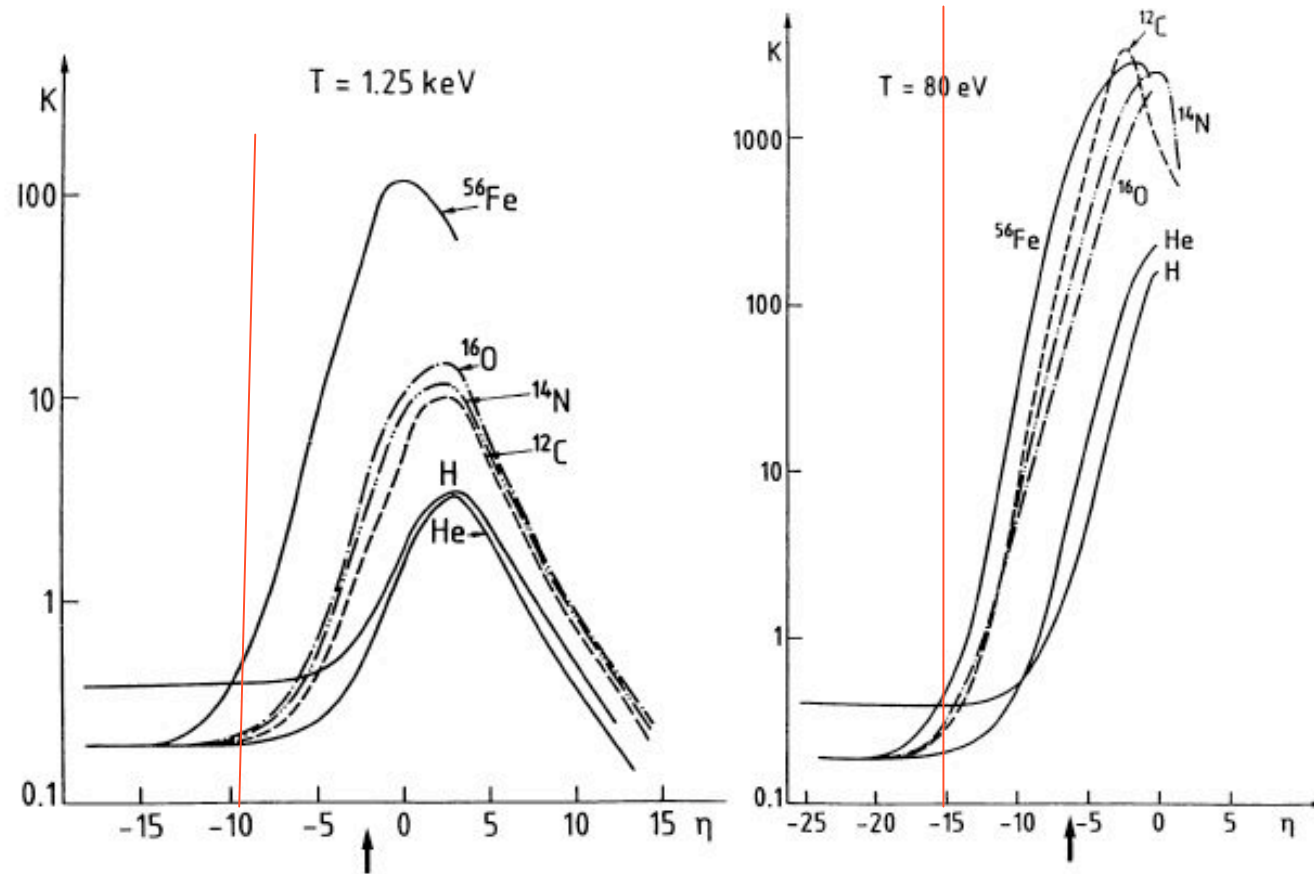
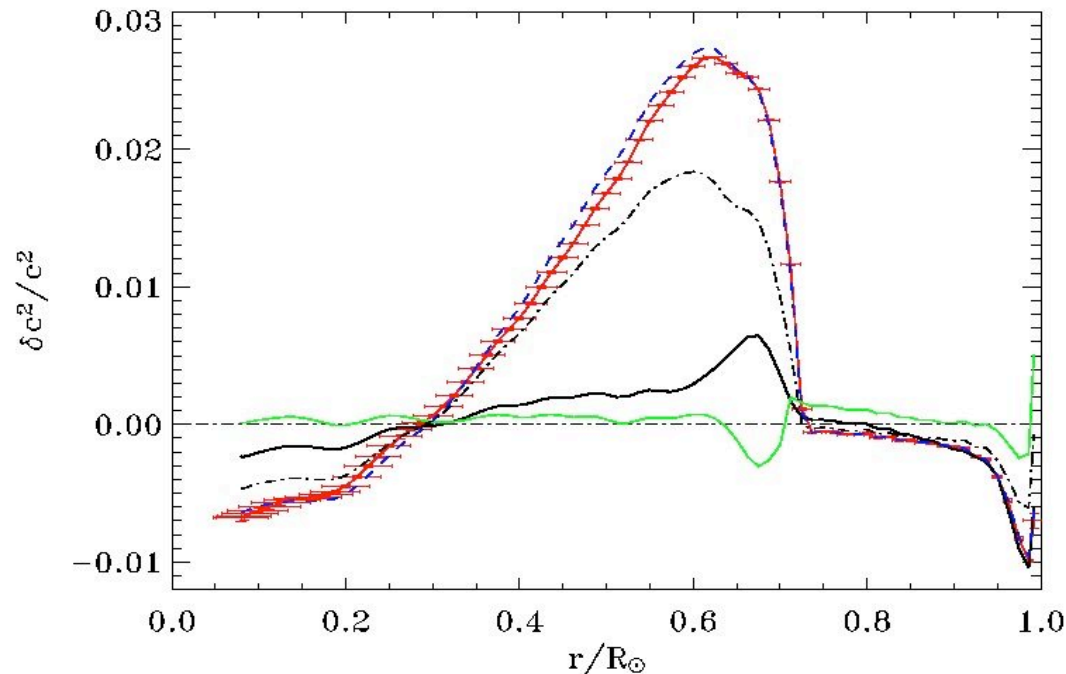


Fig. 2. Variation of total opacity against the degeneracy parameter η for the main elements. The decrease of the curves at high density (large η) is due to electronic conduction (calculations from Los Alamos). The arrow shows the solar density condition.

Diagnostic sismique: profil de vitesse du son

Phénomènes dynamiques, instabilités magnétohydrodynamiques à introduire
Abondance en CNO réestimée à la baisse de 20-30% (Grevesse -> Asplund)?



Turck-Chièze et al. ApJ, 2001, 2004, 2008

Mesurer des coefficients d'absorption dans les conditions correspondant aux intérieurs stellaires est nécessaire !!!

Effets de densité, effets d'ionisation par pression

ppIII chain: ${}^7\text{Be} + p \rightarrow {}^8\text{B}$ ${}^8\text{B} \rightarrow {}^8\text{Be}^* + e^+ + \nu_e$ ${}^8\text{Be}^* \rightarrow 2{}^4\text{He}$ (${}^8\text{B}$ neutrinos)

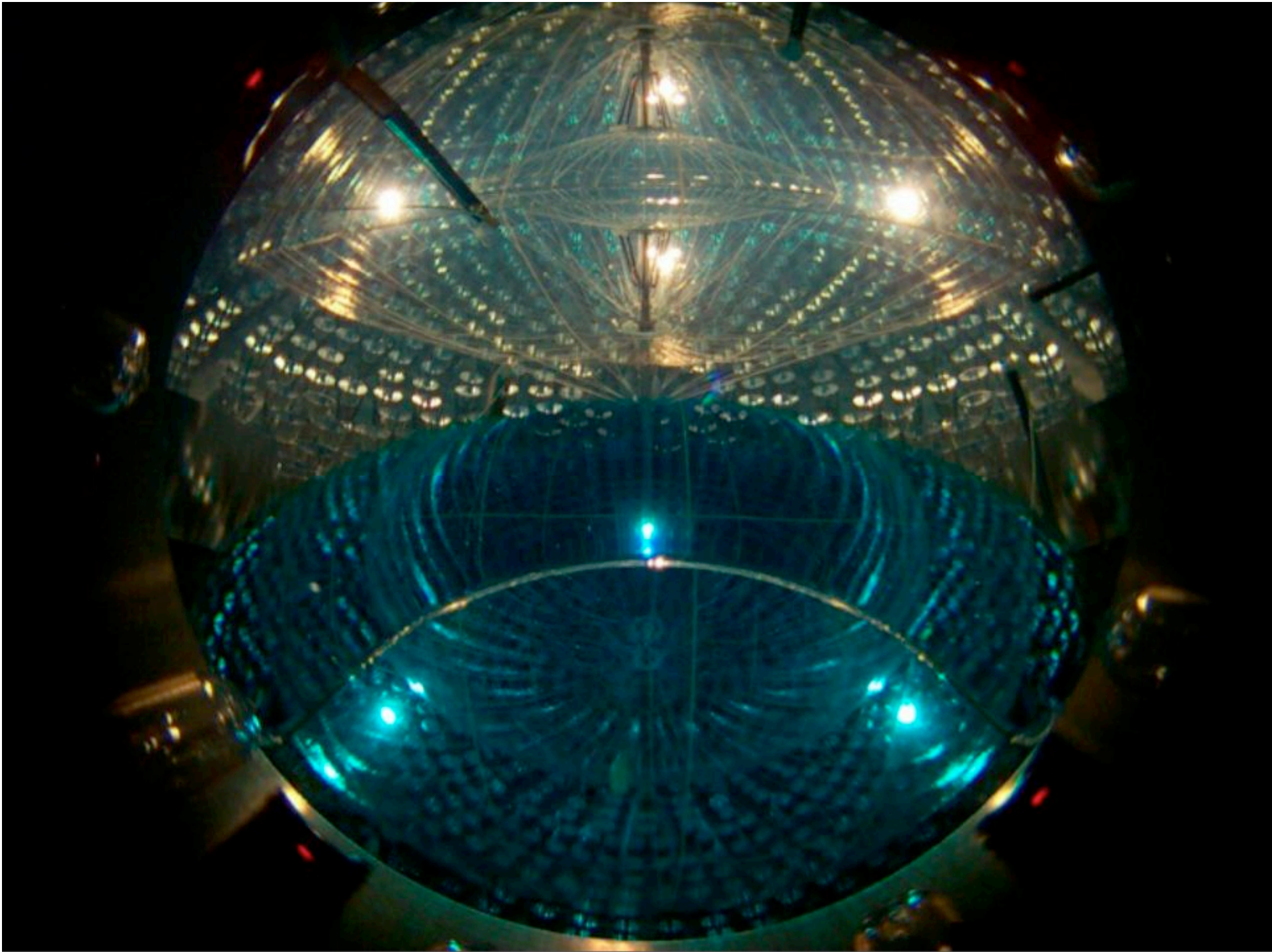
${}^8\text{B}$ sont très sensibles à la température centrale Φ prop T ²⁰⁻²⁴

Table 1

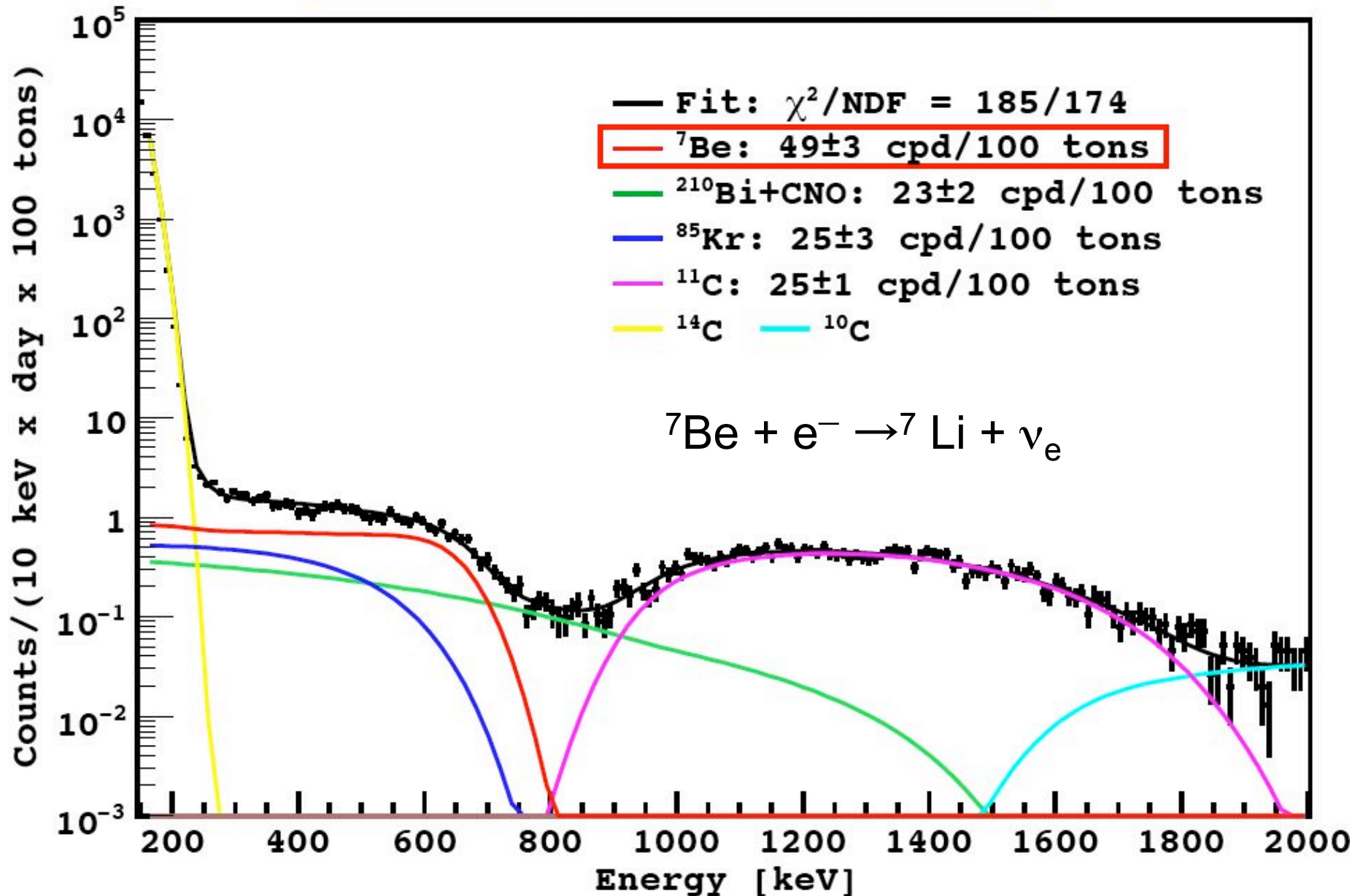
Time evolution of the neutrino flux prediction associated with the reaction ${}^7\text{Be}(p, \gamma){}^8\text{B} \rightarrow {}^8\text{Be}^* + e^+ + \nu_e \rightarrow {}^4\text{He}$, for our solar models. Also mentioned are the corresponding central temperature T_c , initial helium content Y_0 and the origin of the improvements introduced in the corresponding solar model. These results are compared to the recent results of the SNO detectors (Ahmed 2004 and references therein).

Year	Boron flux	T_c	Y_0	Problem solved
1988	3.8 ± 1.1	15.6	0.276	CNO opacity, ${}^7\text{Be}(p, \gamma)$
1993	4.4 ± 1.1	15.43	0.271	Fe opacity, screening
1998	4.82	15.67	0.273	Microscopic diffusion
1999	4.82	15.71	0.272	Turbulence in tachocline
2001	4.98 ± 0.73	15.74	0.276	Seismic model
2003	5.07 ± 0.76	15.75	0.277	Seismic model + magnetic field
2004	3.98 ± 1.1	15.54	0.262	- 30% in CNO composition
2004	5.31 ± 0.6	15.75	0.277	Seismic model + updated ingred.

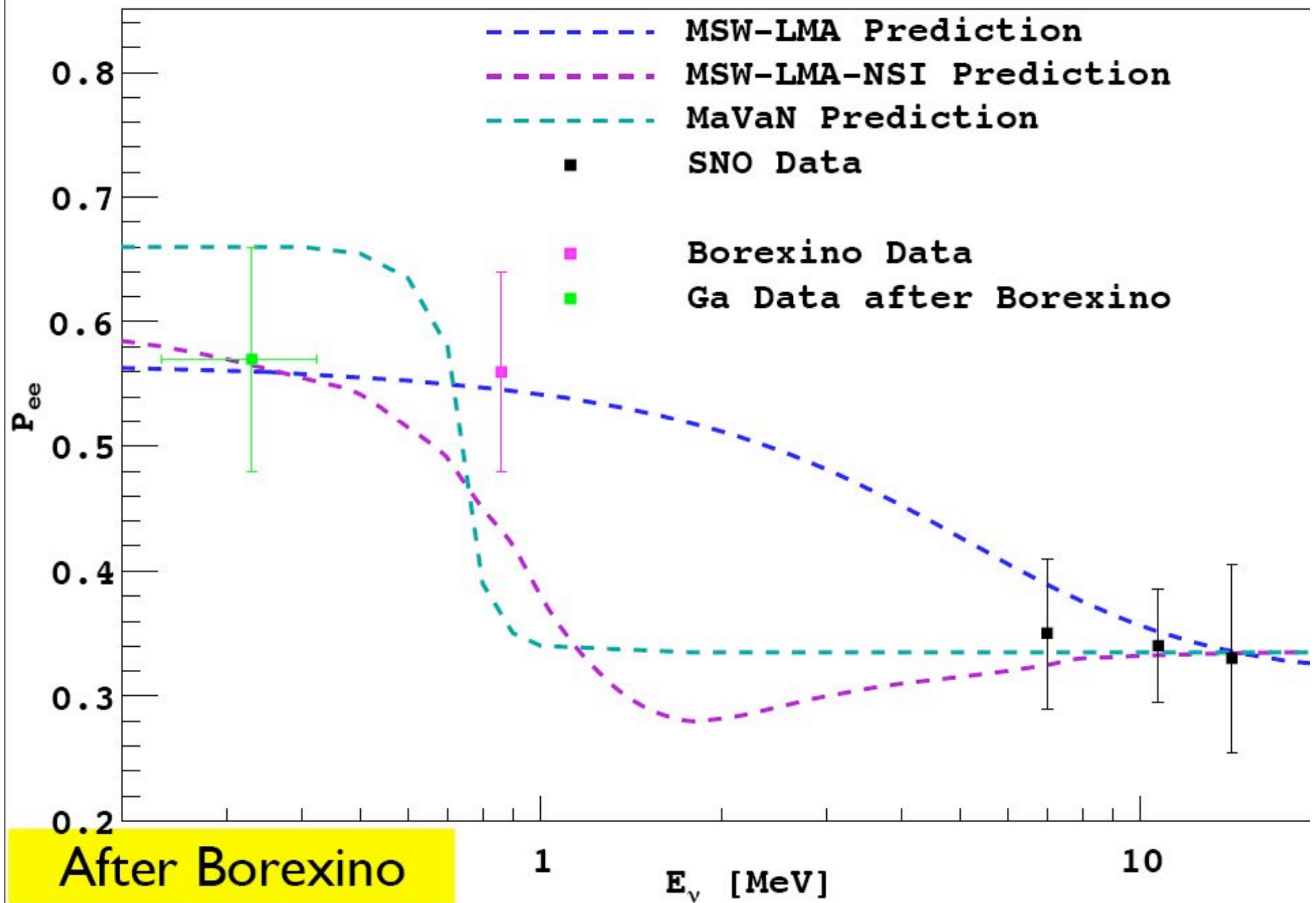
SNO results $5.27 \pm 0.27 \pm 0.38$ (2004)



New Results: 192 Days



Solar Neutrino Survival Probability



Neutrino Magnetic Moment

$$\left(\frac{d\sigma}{dT}\right)_W = \frac{2G_F^2 m_e}{\pi} \left[g_L^2 + g_R^2 \left(1 - \frac{T}{E_\nu}\right)^2 - g_L g_R \frac{m_e T}{E_\nu^2} \right]$$

EM current affects
cross section σ
Spectral shape sensitive
to μ_ν
Sensitivity enhanced at
low energies ($\sigma \approx 1/T$)

$$\left(\frac{d\sigma}{dT}\right)_{EM} = \mu_\nu^2 \frac{\pi \alpha_{em}^2}{m_e^2} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{E_\nu} \right)$$

Estimate	Method	90% C.L. $10^{-11} \mu_B$
SuperK	^8B	<11
Montanino et al.	^7Be	<8.4
GEMMA	Reactor	<5.8
Borexino	^7Be	<5.4

Constat

Physique microscopique est raisonnablement sans contrôle pour les plasmas de couplage intermédiaire

Deux sondes totalement différentes conduisent à des conclusions similaires

Mais il n'y a pas de relation biunivoque entre un phénomène physique et une observable

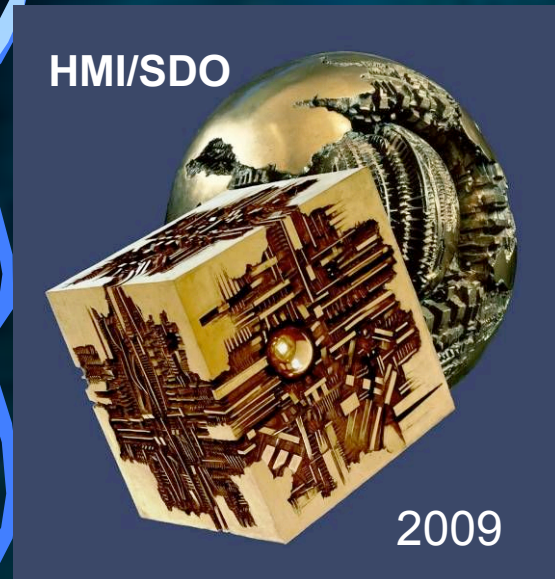
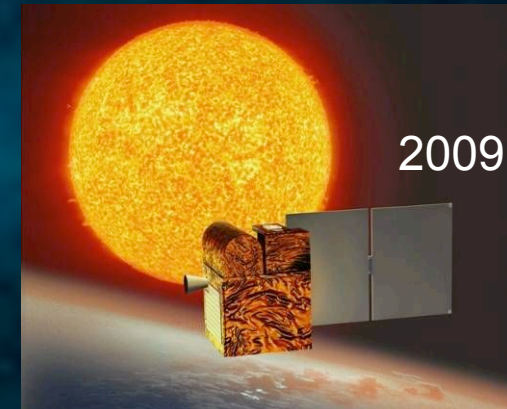
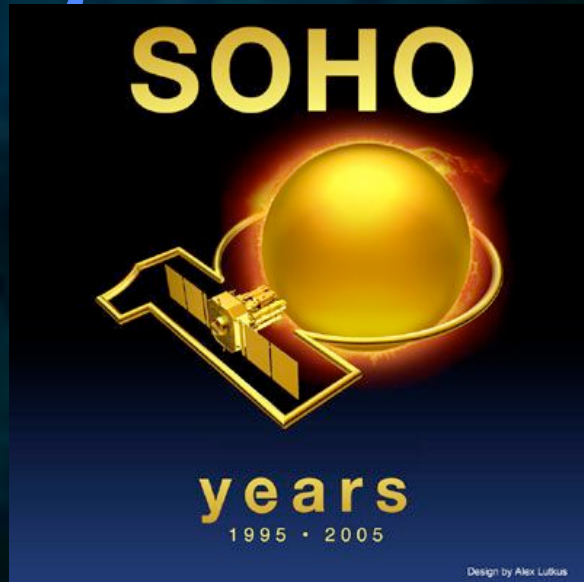
Vérifier par l'effet du plasma sur l'ionisation partielle des éléments de carbone à fer

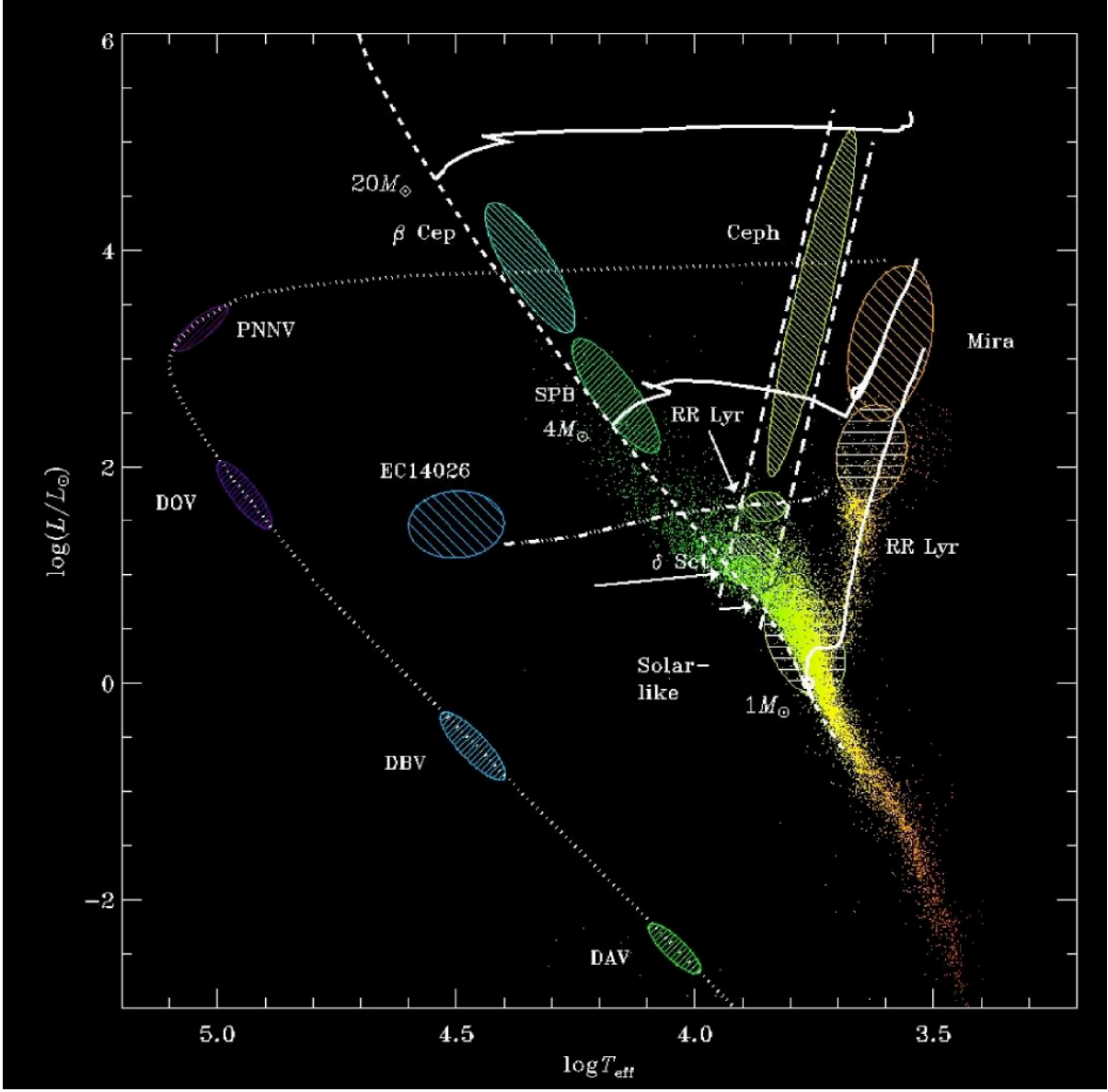
Exemple 3

Les régions d'instabilité

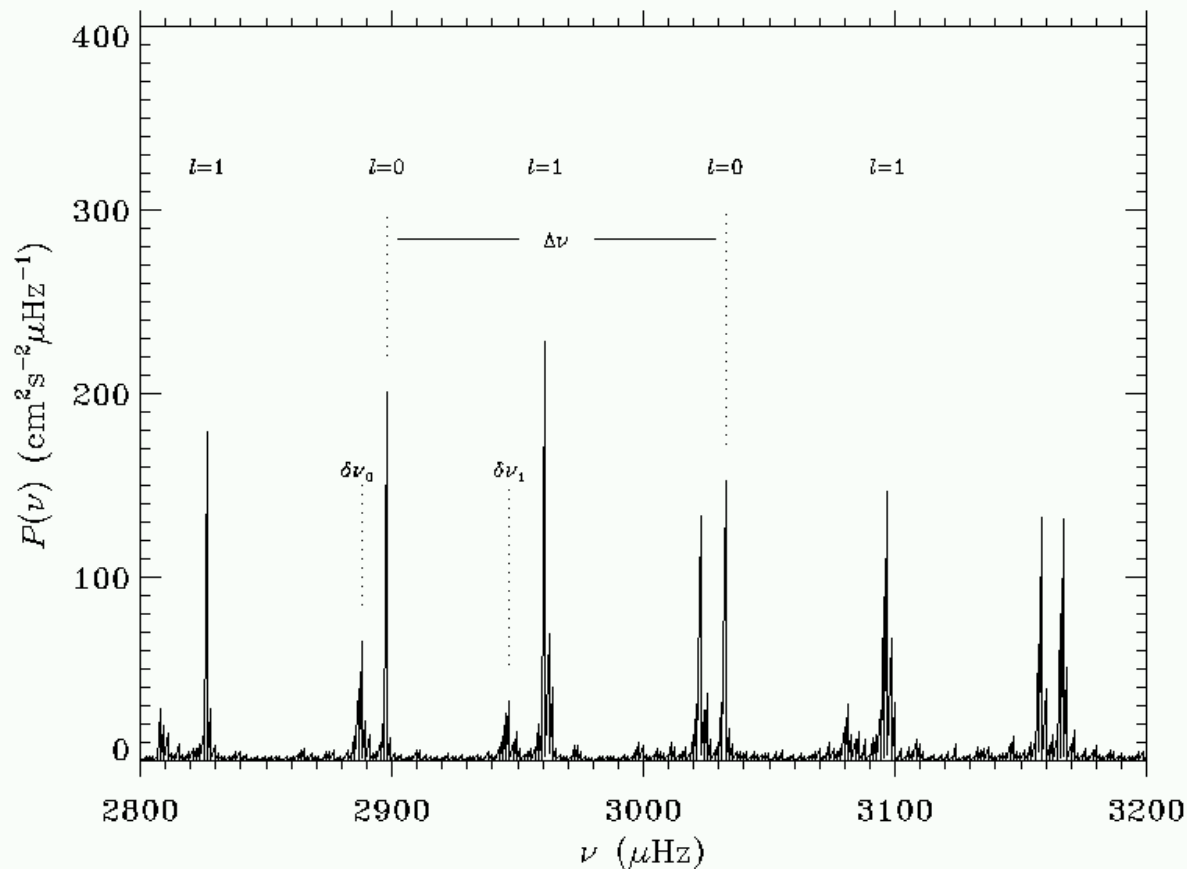
SoHO COROT LIL SDO PICARD KEPLER

Développement de la sismologie solaire et stellaire





Comparaison prédictions et observations

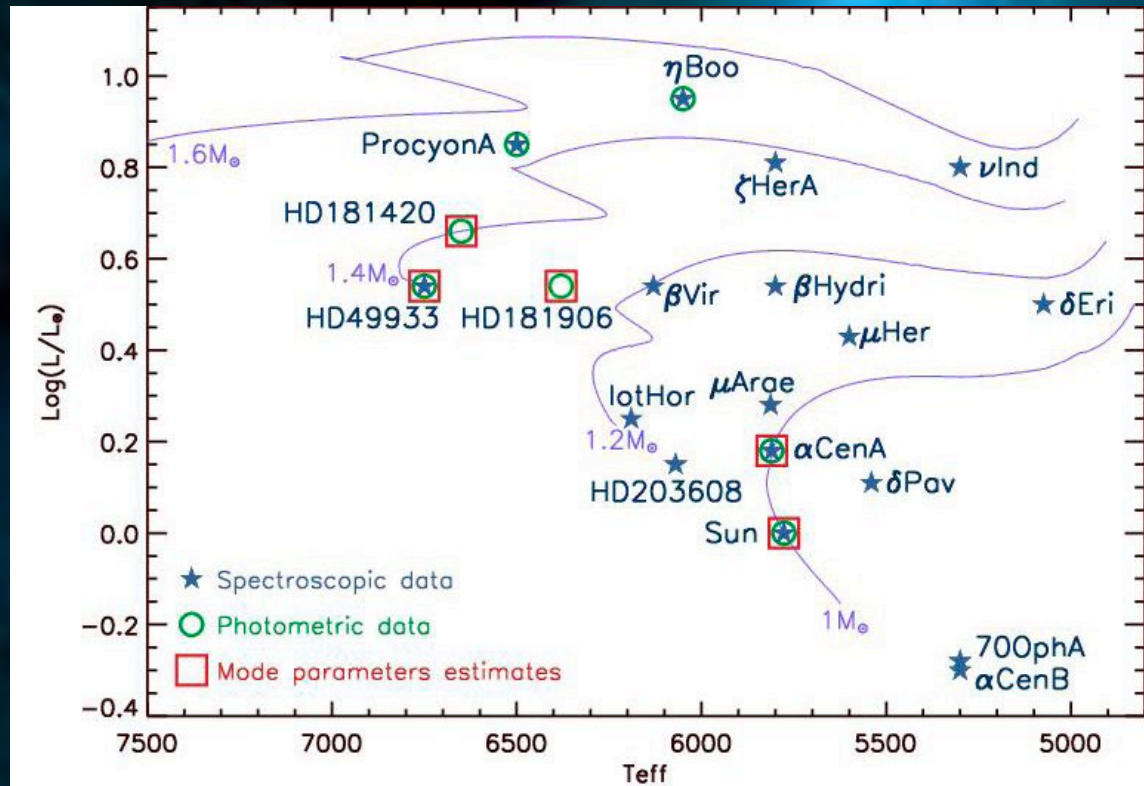


Extraction des
régions de
transition CR

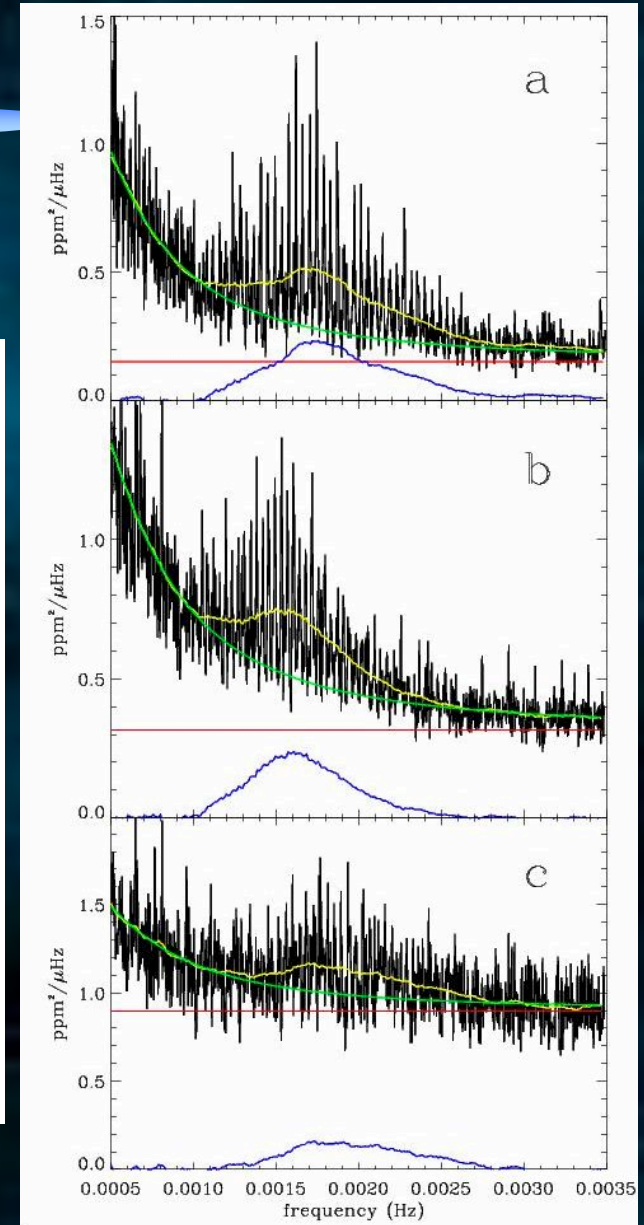
et de l'hélium

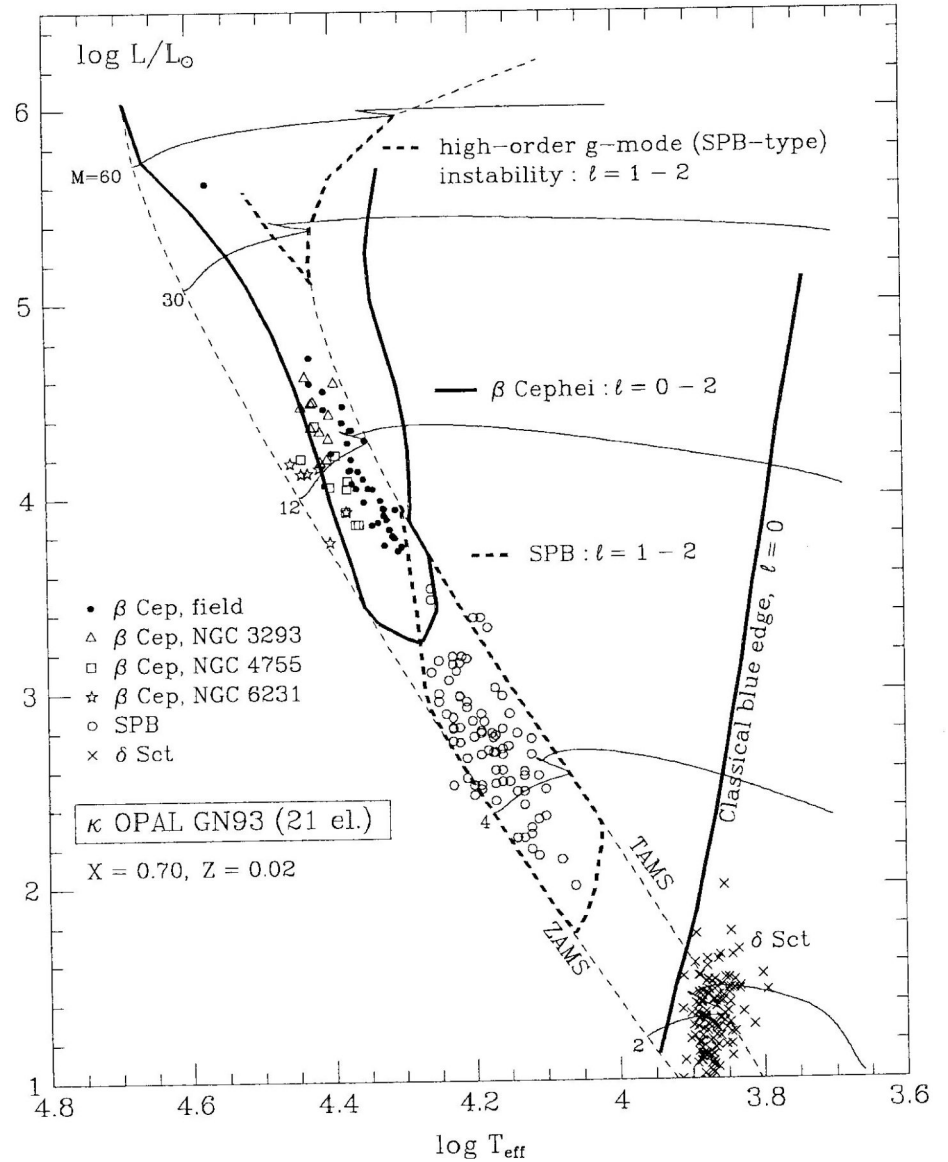
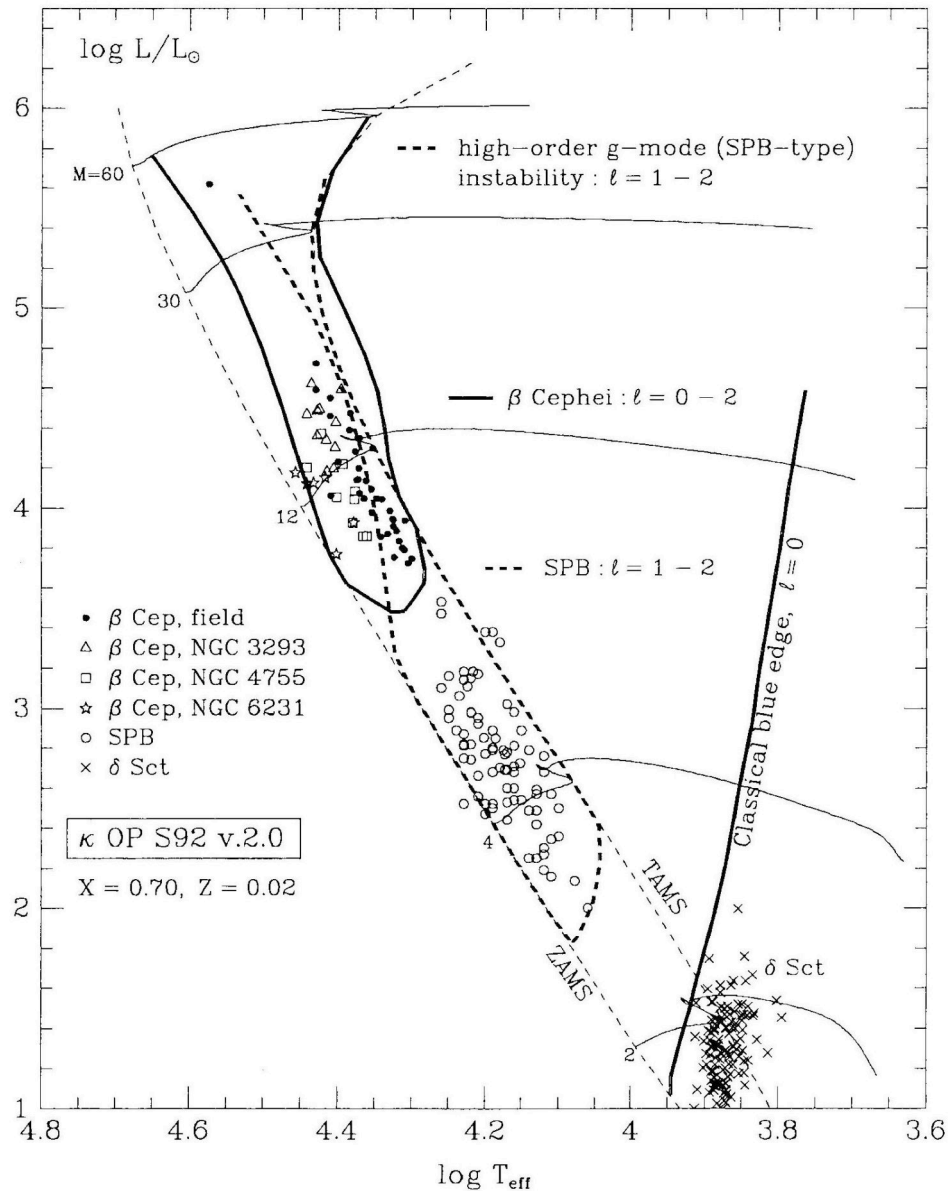
Information sur
la rotation

COROT premiers résultats



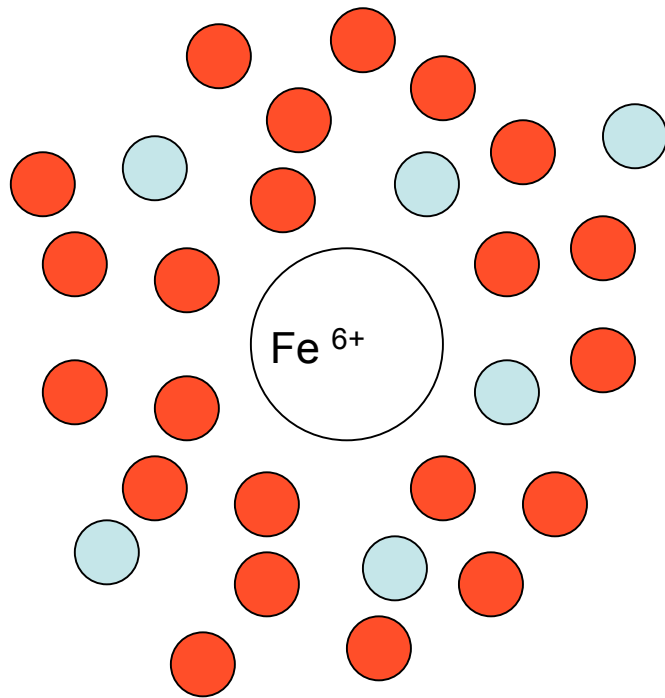
HD49933 40 modes





Les observations semblent mieux reproduites avec les opacités OP plus sensibles aux atmosphères (Patmyatnykh 1999)

Besoins de vérifier par des mesures d'opacités stellaires

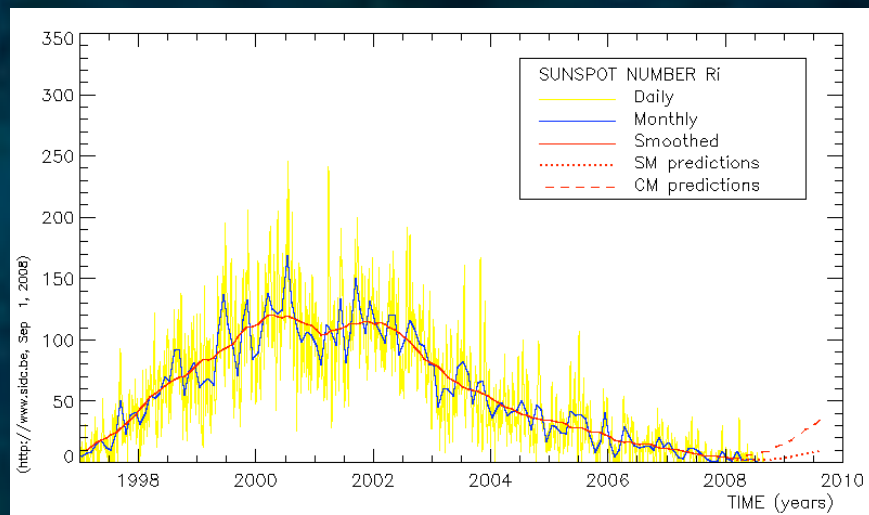
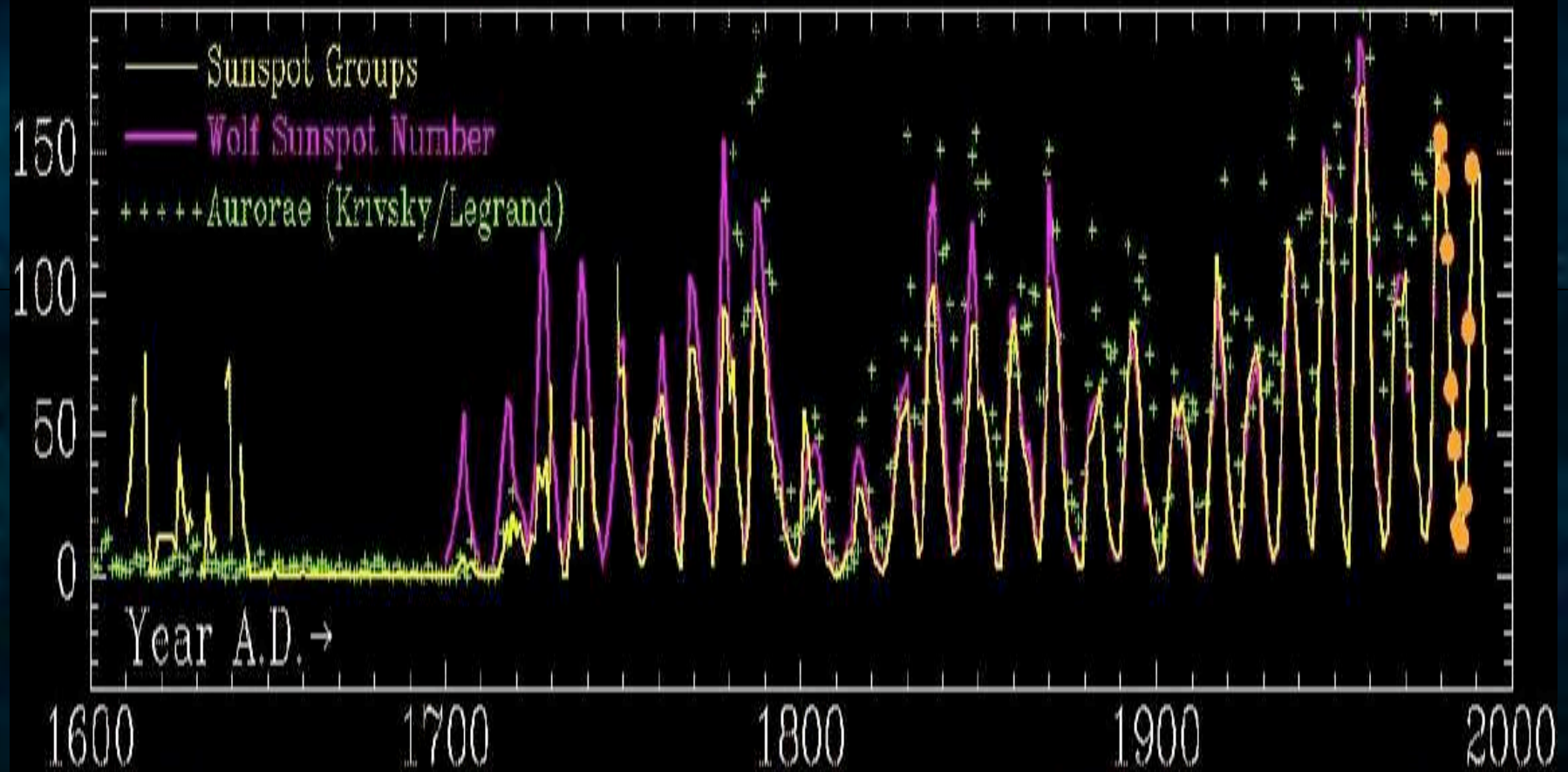


- élément individuel
- élément dans un mélange
 T, ρ_{eff} (environ $4 \rho_{\text{sol}}$)
- Besoin de vérifier l'ionisation partielle des éléments (EOS)
- Tables $T = 0.5 \text{ eV} \text{ } 45 \text{ keV}$
- $\log \rho / T_6^3 -8, 5$
 $\rho : \text{qq}10^{-3} \text{ g/cm}^{-3} \text{ } 1000 \rho_0$

Bien choisir les cas intéressants et le cheminement !



L'origine du magnétisme stellaire



Equations MHD de l'évolution stellaire

- $dM/dr = 4\pi r^2 \rho$ $\nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0$ cons. masse
- $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$

$$dP/dr = - [M(r) G/r^2] \rho$$

$$(\partial \mathbf{v} / \partial t + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} + 2\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{v}) = -\nabla P + \rho \mathbf{g} + 1/4\pi(\nabla \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B} - \nabla \cdot \mathbf{D} - (\nabla P - \rho \mathbf{g}) \quad \text{équation moment}$$

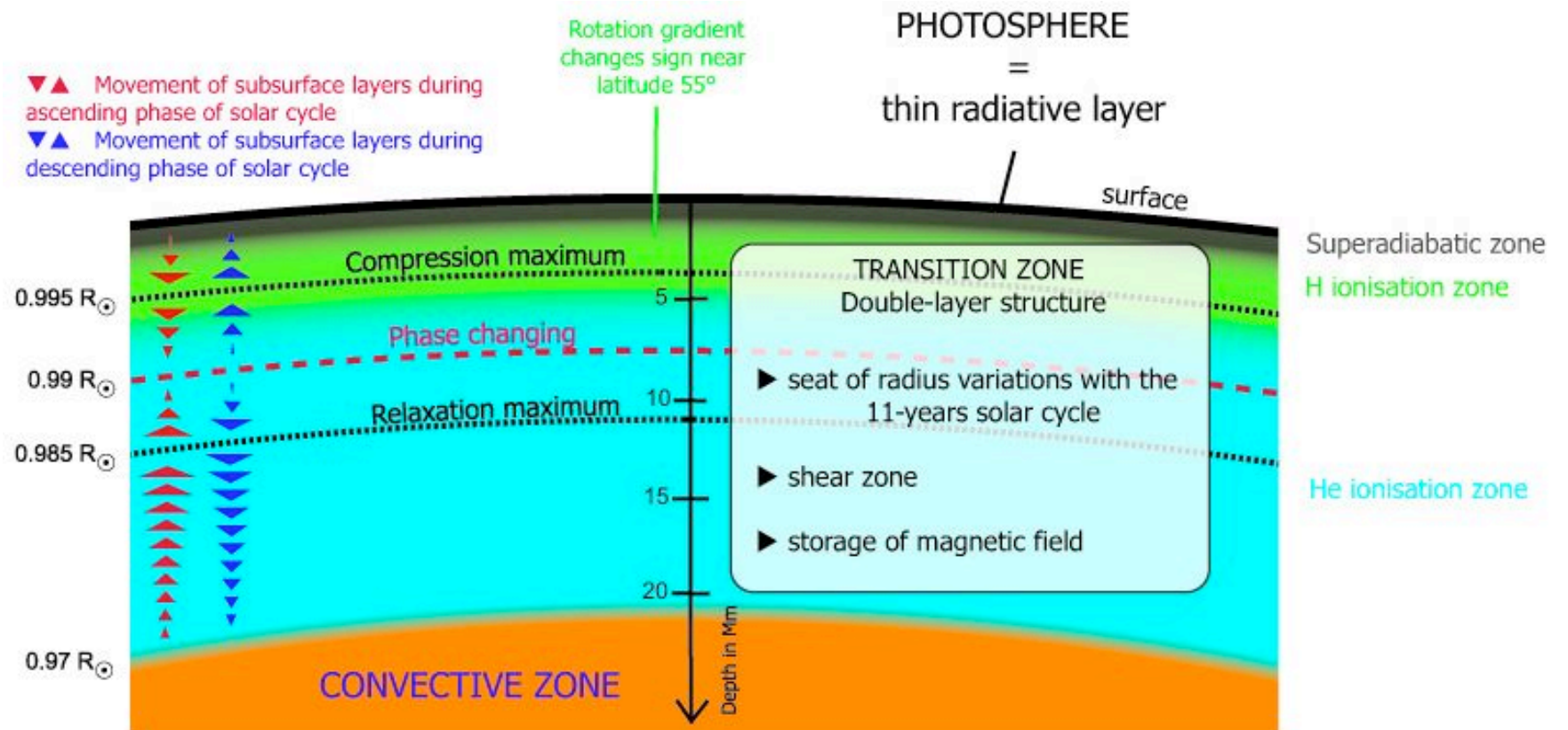
- $dL/dr = 4\pi r^2 \rho (\varepsilon_{\text{nucl}} - T dS/dt)$

$$\rho T \partial S / \partial t + \rho T \mathbf{v} \cdot \nabla (S + S) = \nabla \cdot [\kappa_r \rho c_p \nabla (T + T) + \kappa \rho T \nabla (S + S)] + 4\pi \eta / c^2 j^2 + 2\rho \mathbf{v} [e_{ij} e_{ij} - 1/3(\nabla \cdot \mathbf{v})^2] + \rho \varepsilon$$

équation énergie

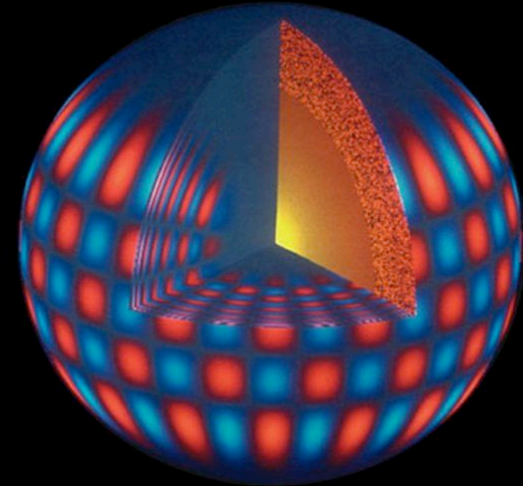
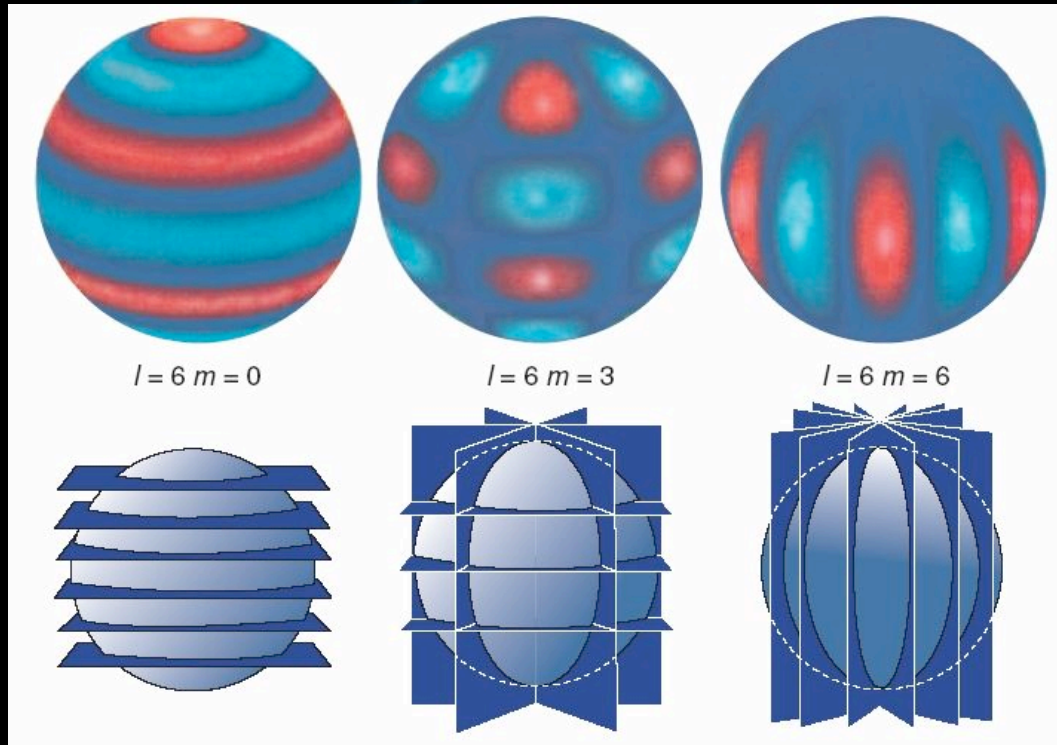
$$\partial \mathbf{B} / \partial t = \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) - \nabla \times (\eta \nabla \times \mathbf{B}) \quad \text{équation d'induction}$$

$$\mathbf{v} = (v_r, v_\theta, v_\phi) \quad \mathbf{B} = (B_r, B_\theta, B_\phi) \quad \mathbf{j} = c/4\pi(\nabla \times \mathbf{B}), \quad c_p, \kappa_r, \nu, \kappa, \eta, D$$

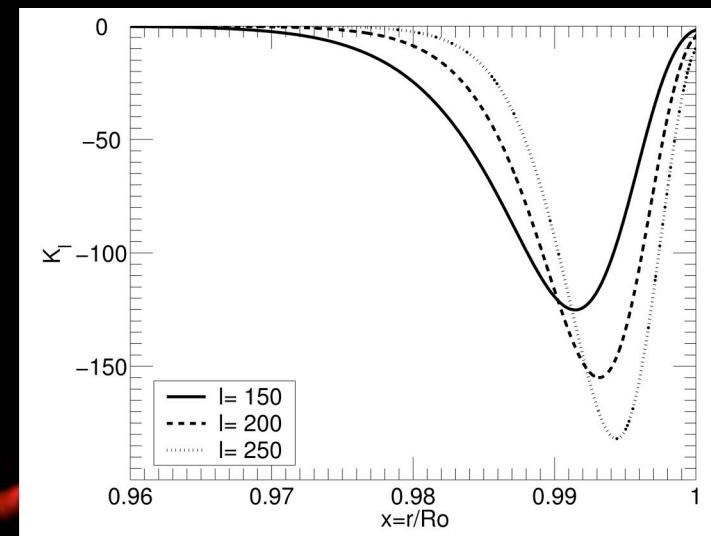


Lefebvre et al. ApJ, 2008

f -modes en héliosismologie

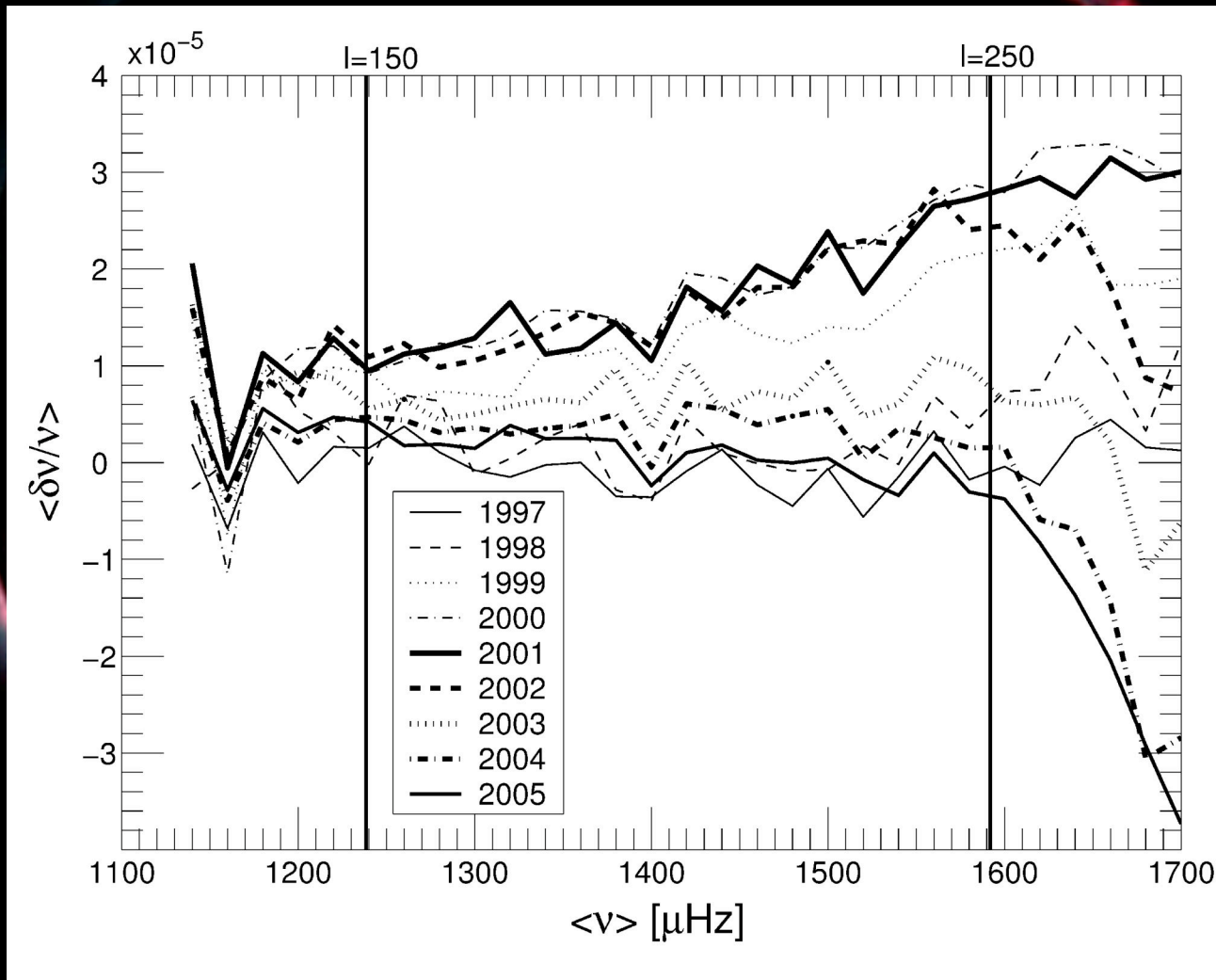


-  Oscillation modes \rightarrow 3 numbers l, n, m
-  f -modes $\rightarrow n = 0 \rightarrow$ surface waves



Variation des fréquences des modes f provenant de MDI avec le cycle solaire

Lefebvre et
Kosovichev
ApJ 2006



Etude des modes f



Dziembowski & Goode (2004)

$$\left(\frac{\delta\nu}{\nu}\right)_{r,0} = -\frac{3l}{2\omega^2 I} \int dI \frac{g}{r} \frac{\delta r}{r}$$

$$\left(\frac{\delta\nu}{\nu}\right)_i = \int_0^{R_\odot} K_l \frac{\delta r}{r} dr$$

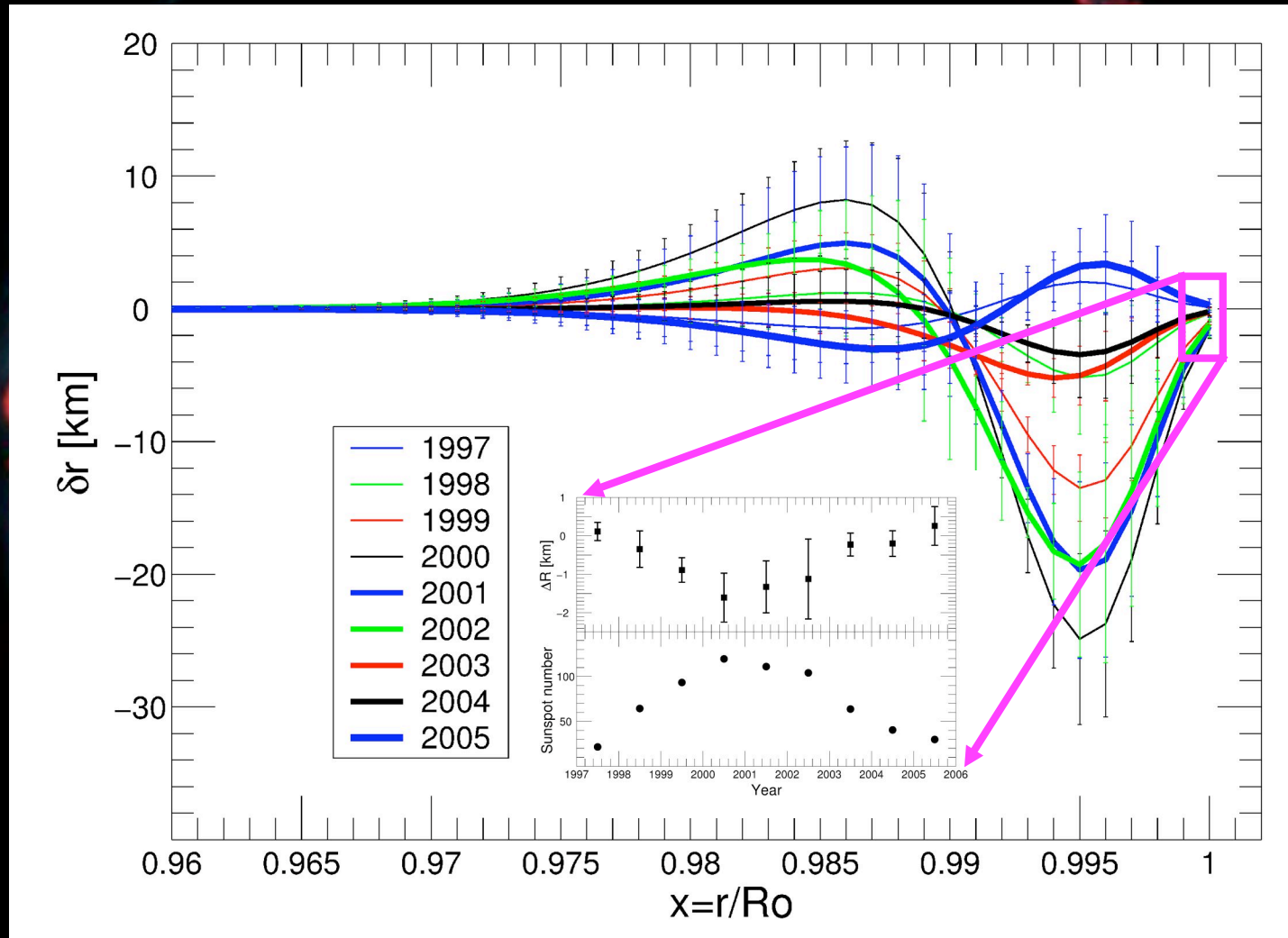
$$K_l = -\frac{3l}{2\omega_l^2 I_l} \rho \left| \vec{\xi}_l \right|^2 g r$$

- ☺ ν frequency of f-mode
- ☺ r radius of the considered layer
- ☺ l degree of f-mode
- ☺ I moment of Inertia
- ☺ ω eigenfrequency
- ☺ g acceleration due to gravity
- ☺ K_l kernel associated to degree l
- ☺ ξ_l mode eigenfunction
- ☺ ρ density

$\delta r/r$ constant with depth

$$\frac{\Delta\nu_l}{\nu_l} = -\frac{3}{2} \frac{\Delta R}{R}$$

Variation des couches de sous surface



Différence de modèles avec différents rayons

$$R_1 < R_2 = 1.0000 < R_3$$

$$R_1 - R_2 \approx -170 \text{ km}$$

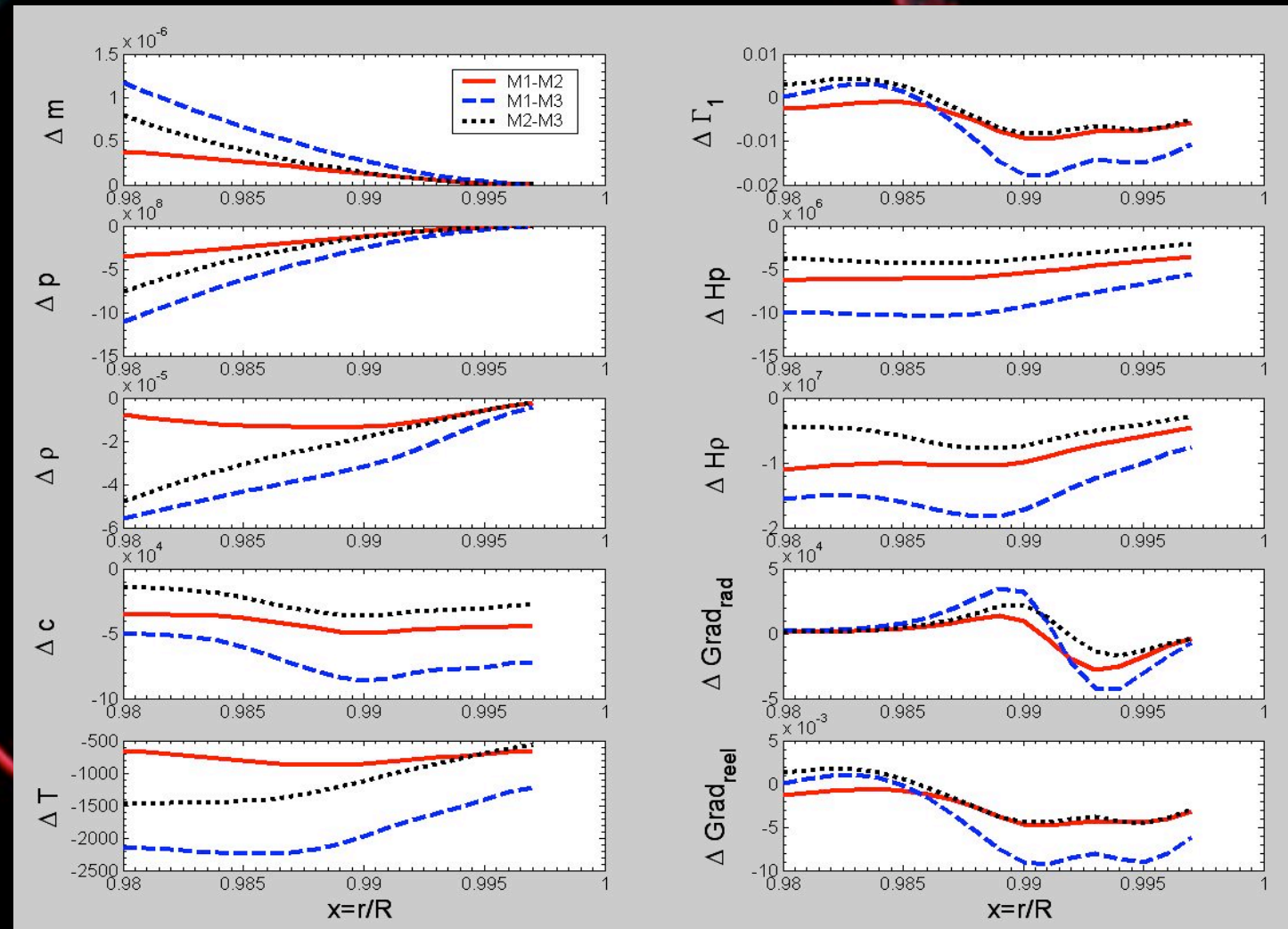
$$R_1 - R_3 \approx -280 \text{ km}$$

$$R_2 - R_3 \approx -120 \text{ km}$$

$$\rightarrow \Delta R/R \approx 1-4 \cdot 10^{-4}$$

→ Prédiction d'une variation de 10 km du rayon solaire au cours du cycle

Rôle impliqué de l'équation d'état et du champ magnétique



Conclusion

La Physique stellaire du XXI ème siècle est riche et des questions clés doivent être résolues

Les expériences à haute densité d'énergie sont difficiles mais prometteuses, elles sont nécessaires pour décorréler le rôle des différents processus dans les observables

Aux expériences proposées cette semaine, il faudra rajouter à terme des expériences de taux de réactions et peut être d'instabilité magnétique

Certaines propriétés des plasmas sont encore mal connues effet collectif du plasma, coefficients de transport

C'est un programme d'au moins 10 ans d'une communauté mixte Astrophysique-Physique des Plasmas qui doit se développer. Cette communauté est formée, c'est à l'interface qu'une science originale peut émerger

**Nous devons être inventif pour
accompagner ce passage au
multidimensionnel de la Physique
Stellaire**