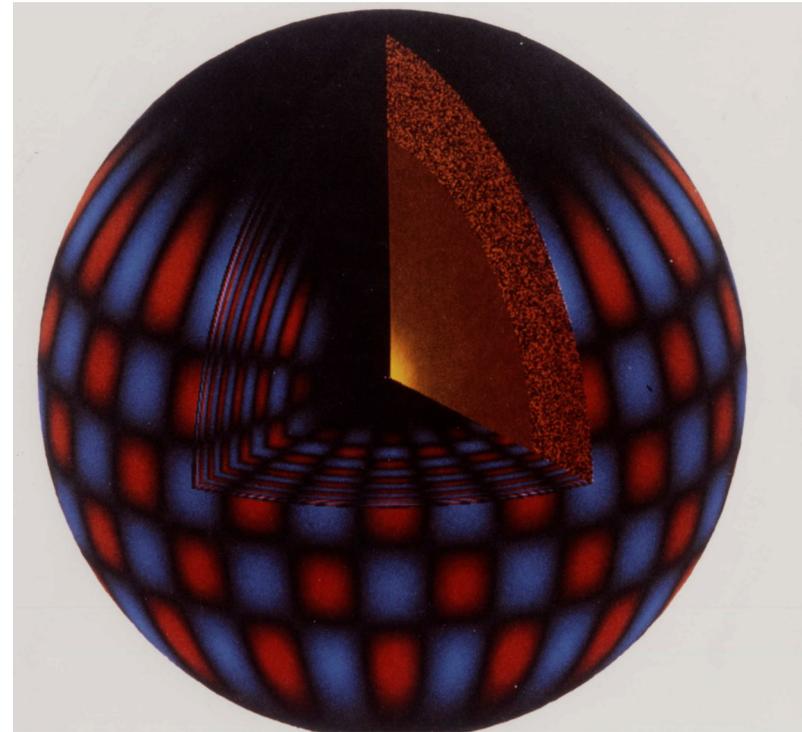


# Astrophysique Nucléaire et Plasmas Stellaires

- R. Garcia
- P. Nghiem
- S. Couvidat
- J. Ballot
- S. Brun
- S. Turck-Chièze
  
- M. Cassé

## Sismologie



## Expériences laboratoire

Faire sauter les verrous de l'évolution stellaire ?

# Programme

- Etoiles comme laboratoire pour la physique de base
- Introduction à la sismologie
- Résultats récents avec SoHO
- Perspectives scientifiques
- Perspectives spatiales

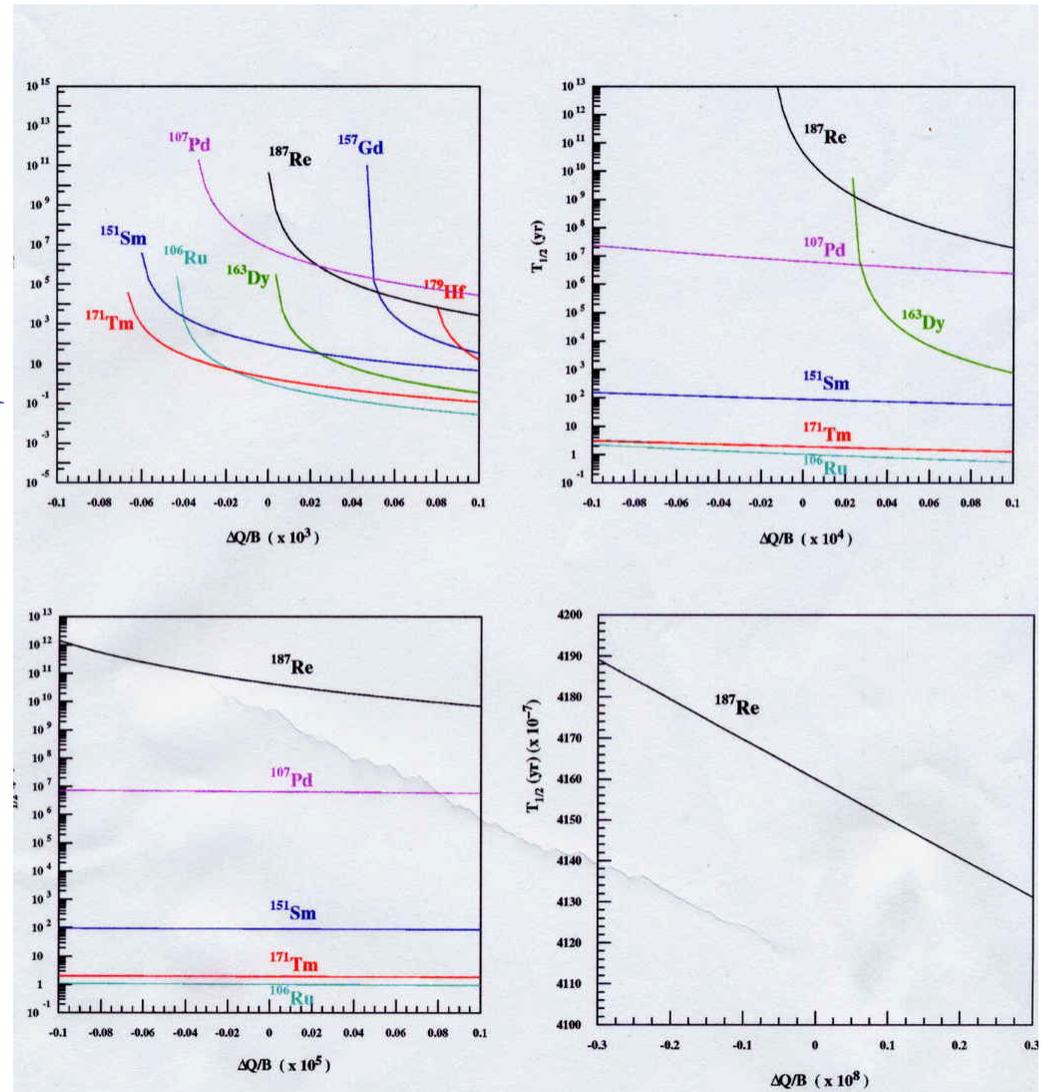
# Les constantes sont t'elles constantes

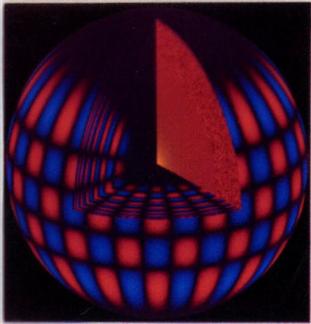
?

- Olive, Pospelov, Quian, Coc, Cassé, Vangioni Flam, 2002
- Contrainte sur  $\Delta\alpha/\alpha < 1-2 \cdot 10^{-8}$ :  $^{147}\text{Sm}$
- $\Delta\alpha/\alpha < 8 \cdot 10^{-9}$ :  $^{187}\text{Re}$

Si l'on considère les effets purement coulombiens + durée de vie

- Soleil: laboratoire: G

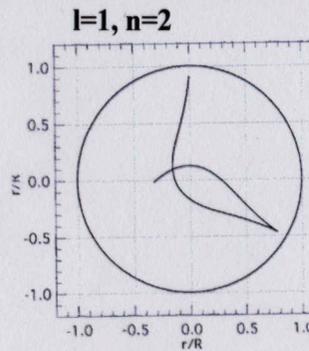
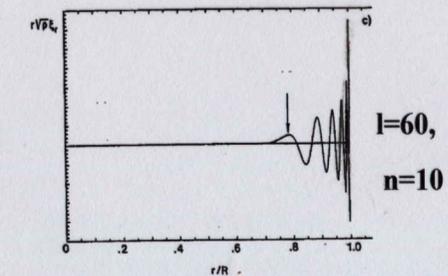
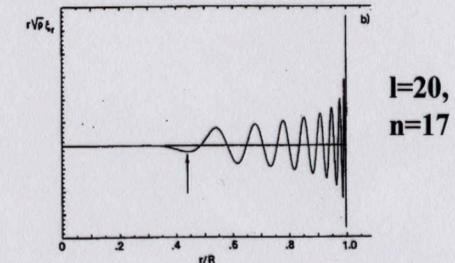
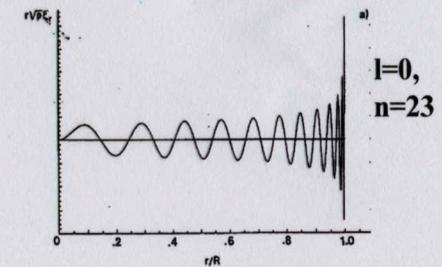




# Introduction to stellar seismology

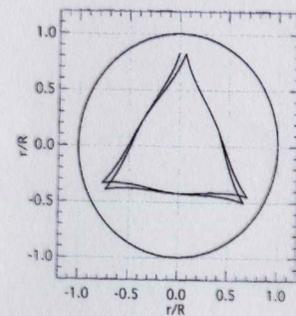
- acoustic modes are influenced by the gas pressure and leads to the determination of the sound speed profile
- identification of the mode: 3 numbers  $l, n, m$

degree  $l$  and order  $n$

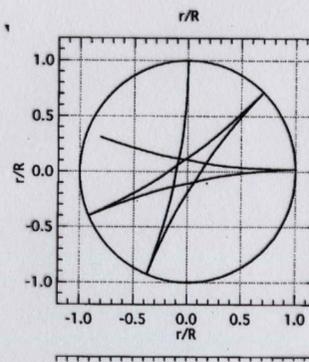


low order modes have gravity mode character

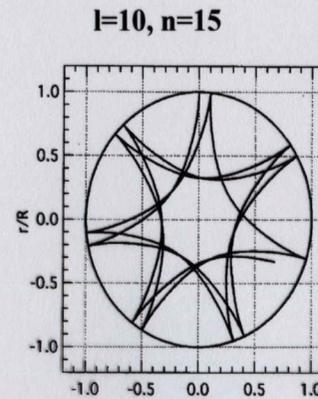
$l > 4$ , only for the Sun, resolved star  $\Rightarrow$



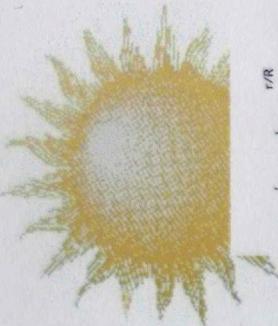
$l=2, n=1$



$l=2, n=15$



S. Turck-Chièze and P. Nghiem



# L'énigme des neutrinos solaires

particules imaginées en 1930

issues de certaines réactions nucléaires :

- proton+ proton (les + nombreux)
- ou béryllium + proton (les + énergétiques).

**Mal connus** : masse = ?

**Discrets** : le Soleil envoie sur terre 75 milliards/cm<sup>2</sup>/s

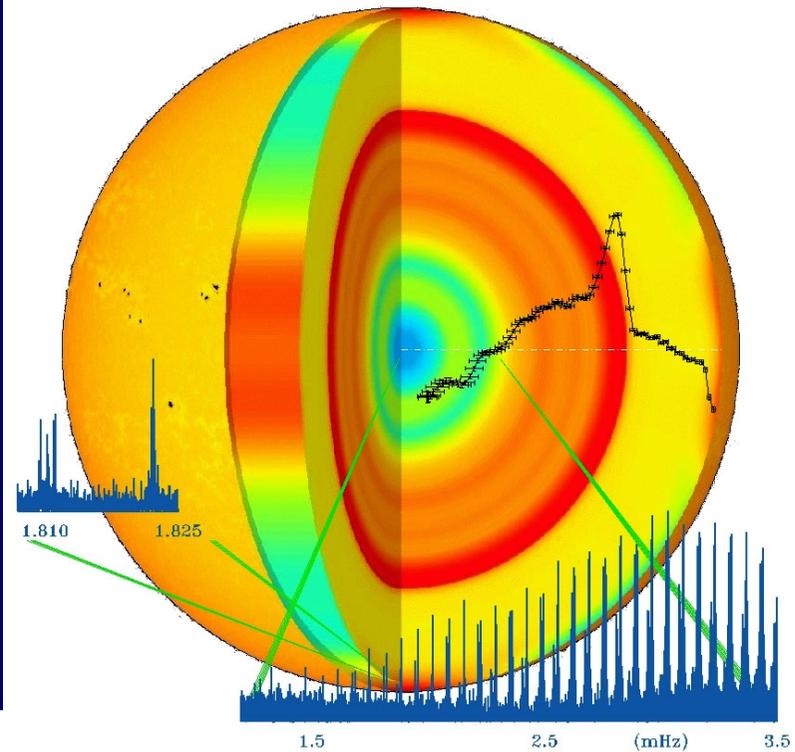
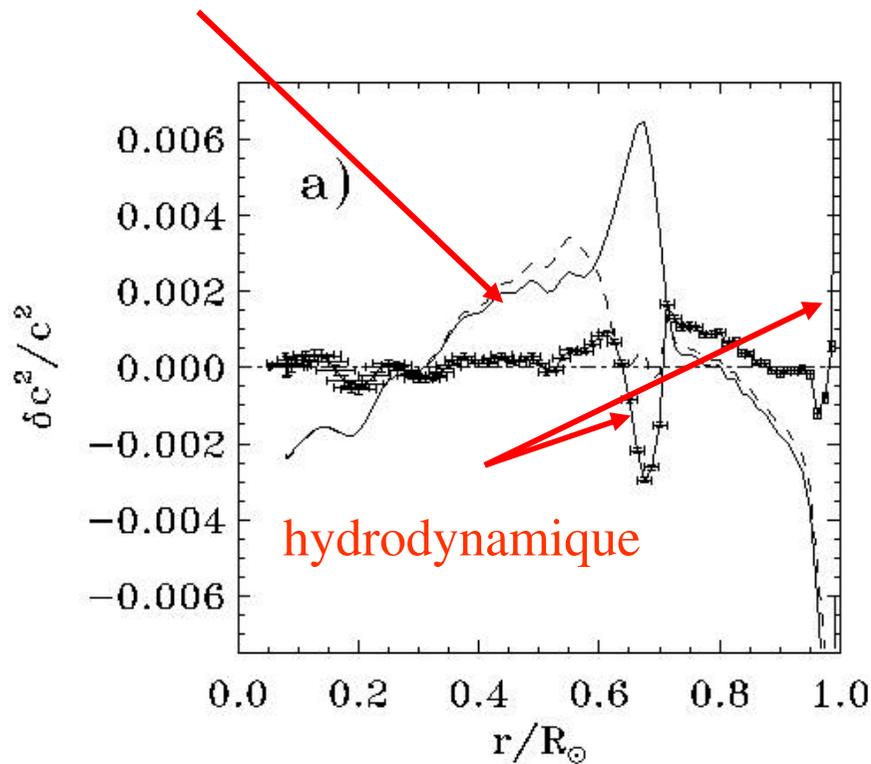
20 par jour seulement sont détectés au mieux: interaction faible

Et limite en énergie

**Le modèle standard en prévoit entre 4.5 et 7 millions/cm<sup>2</sup>/s  
Les détecteurs au sol n'en trouvaient que 2 fois moins  
POURQUOI ?**

# Physique classique ou au delà ?

Modèle standard



Modèle sismique: Turck-Chièze et al. 2001 ApJ lett

Couvidat et al. 2002.

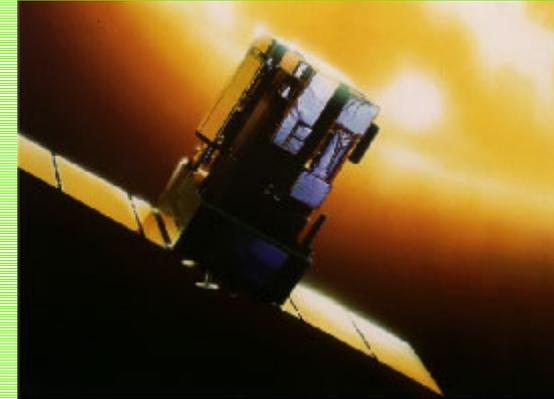
# L'énigme des neutrinos résolue



- La **sismologie** permet de
- 1) vérifier le modèle standard
  - 2) préciser la température centrale



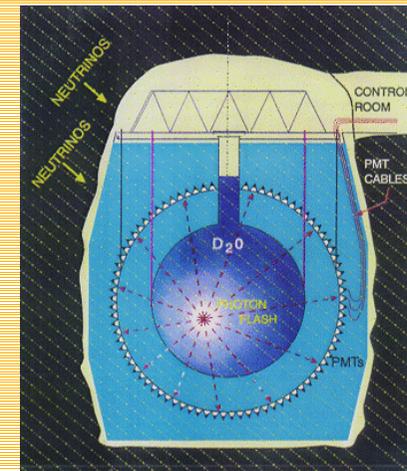
On prédit observationnellement  
un flux de  $4.95 \pm 0.72$  millions/cm<sup>2</sup>/s



Les **détecteurs de neutrinos**, SNO  
et Superkamiokande sont maintenant  
capables de distinguer plusieurs  
saveurs de neutrinos

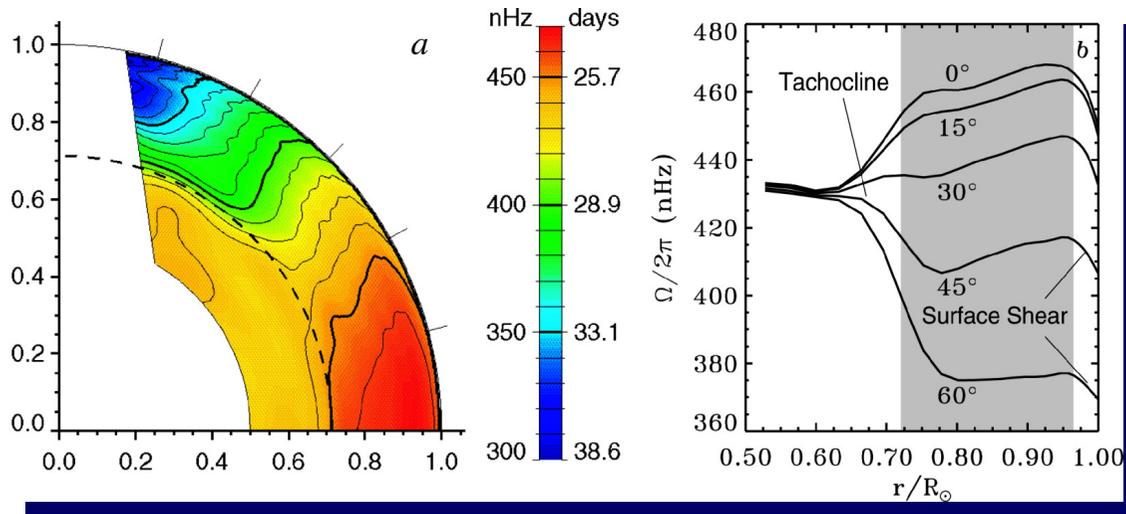


un flux de  $5.44 \pm 0.99$  millions/cm<sup>2</sup>/s



**⇒ l'existence de différents saveurs de neutrinos**  
**⇒ le neutrino solaire « oscille » entre son émission et sa détection**

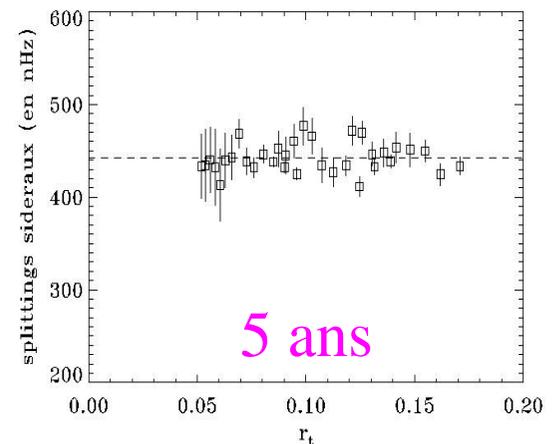
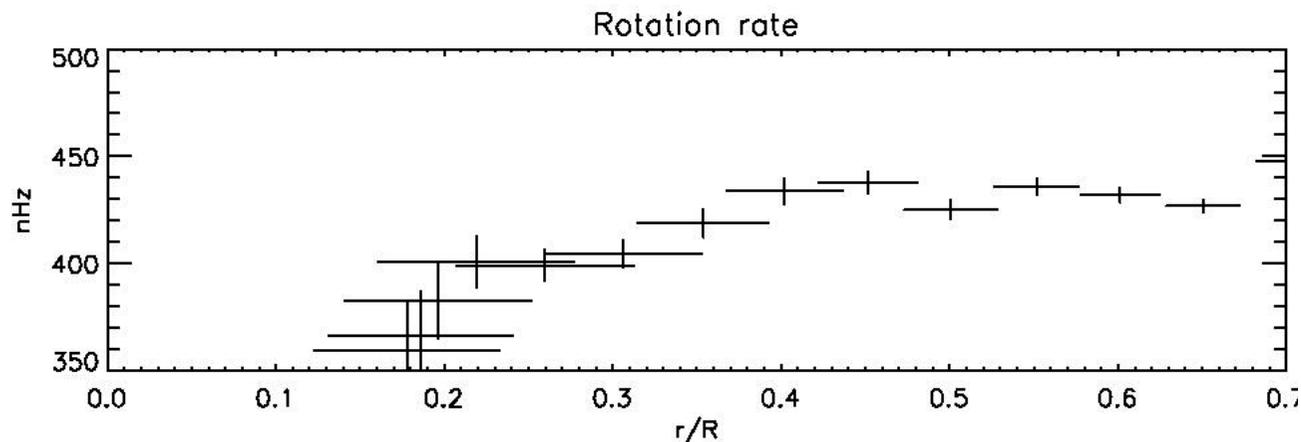
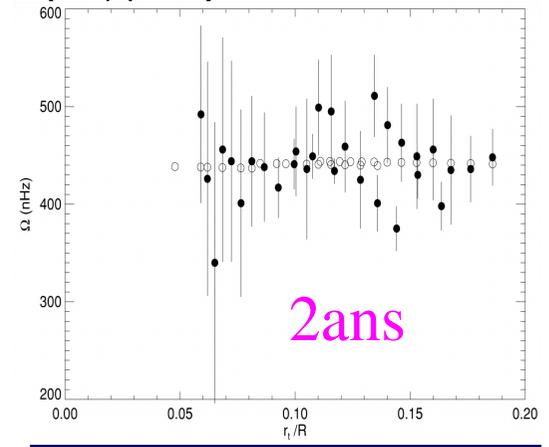
# Résultats récents: le profil de rotation dans la région radiative



Profil obtenu avec données MDI (fig. a) et GONG (fig. b)

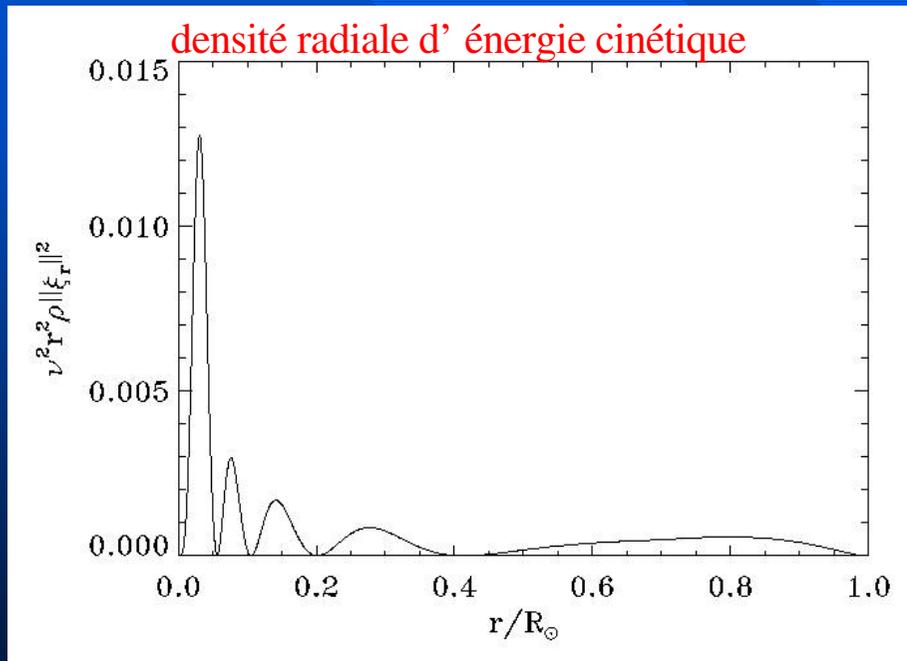
Brun & Toomre 2002, ApJ, 570

Avec GOLF+LOWL 2034 jours :



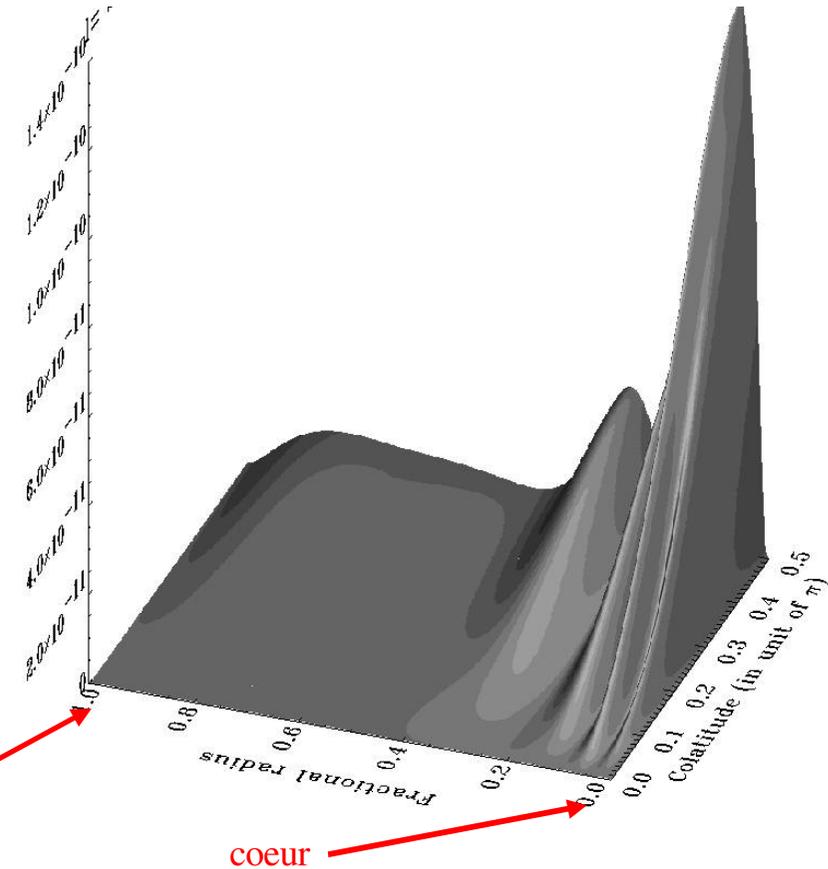
# L'intérêt des modes de gravité

modes de gravité → structure thermodynamique du coeur et phénomènes dynamiques qui y opèrent (*via* le profil de rotation)



sensibilité des modes g à la rotation

$l=2, n=-3, m=2$



# Résultats récents: Modes de gravité avec SoHO !!!

- Limite actuelle pics uniques GOLF:  
**6mm/s** (Gabriel et al. 2002)

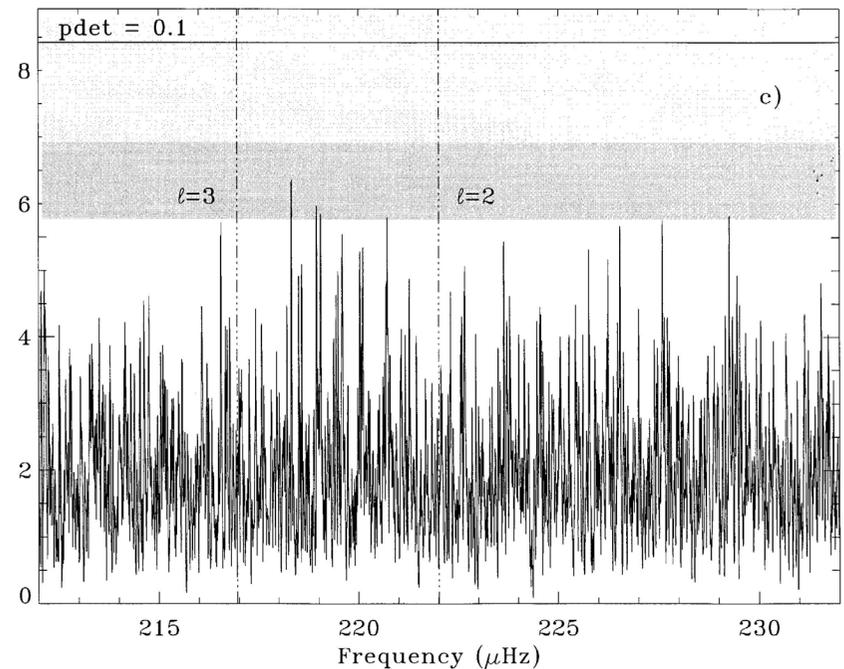
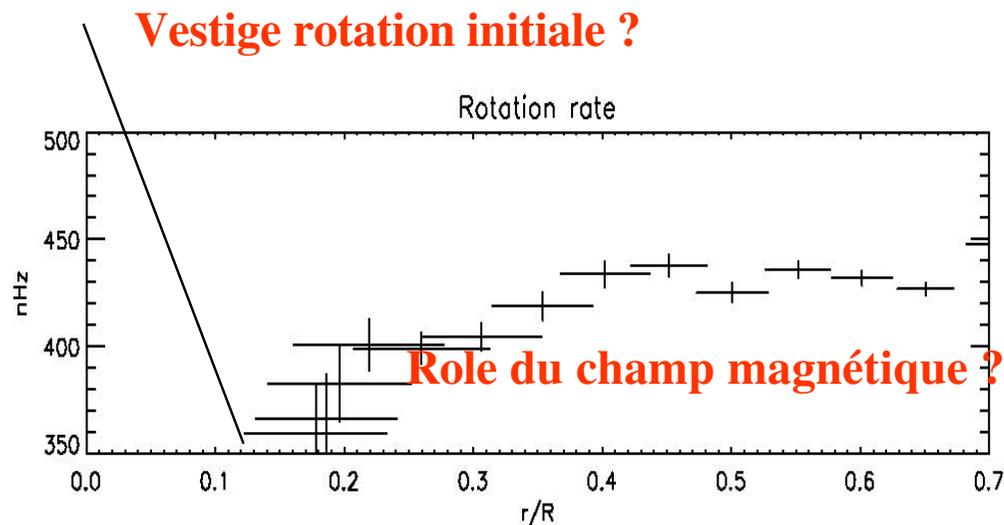
- Stratégie Saclay: recherche multiplets  
**2mm/s±1**

Triplets détectés avec 90% confiance  
 au bout de 1290 jours,

Après 2035 jours, quintuplet: splitting  
**600 nHz**

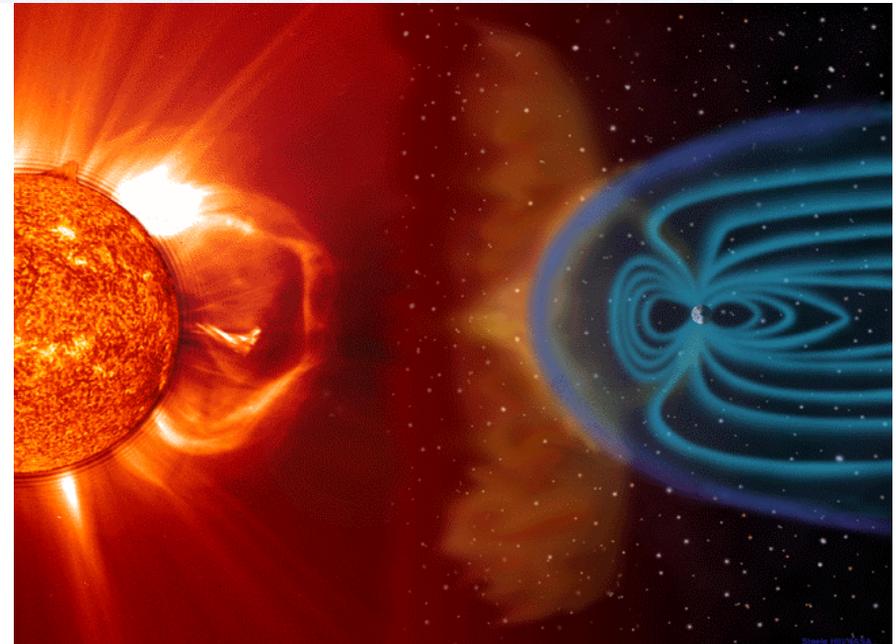
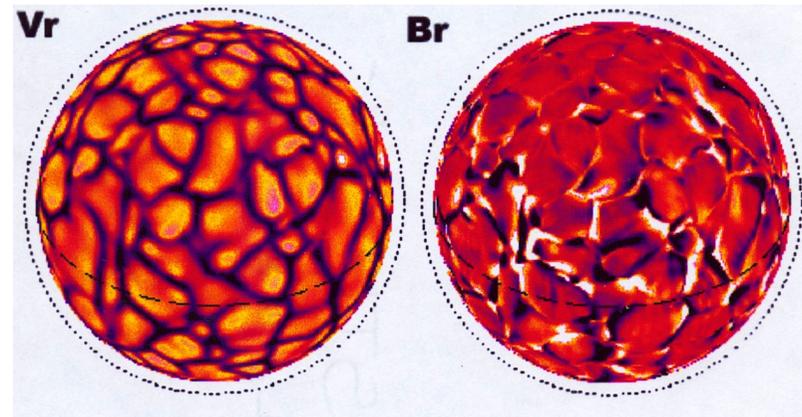
$l=2, n=-3 ?$

**2035 days**



# Perspective scientifique

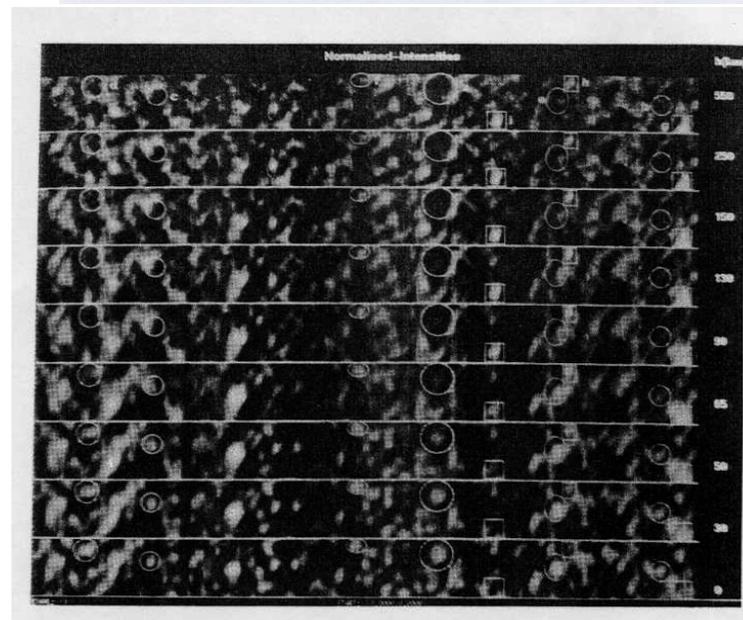
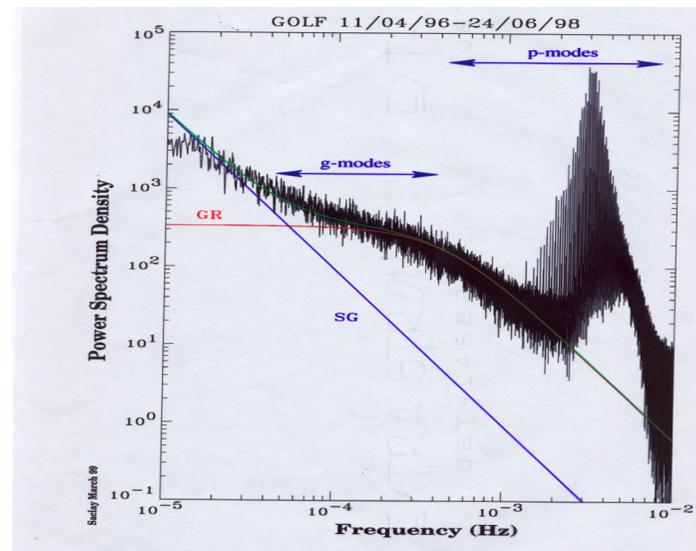
- Introduire rotation et champ magnétique, origine effet dynamo
- Simulation hydrodynamique, MHD
- Faire la connection avec les étoiles jeunes, comprendre les étapes d'évolution à l'échelle de 100 à 1000 ans

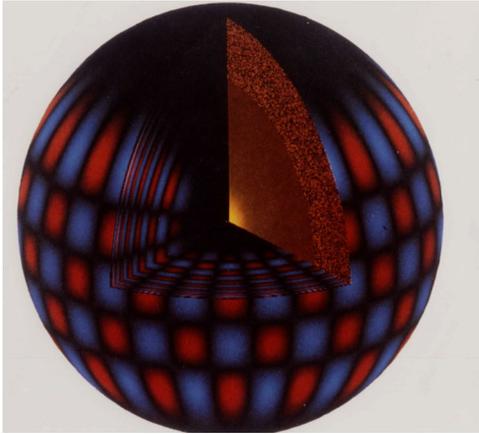


# Le successeur de GOLF: GOLF NG

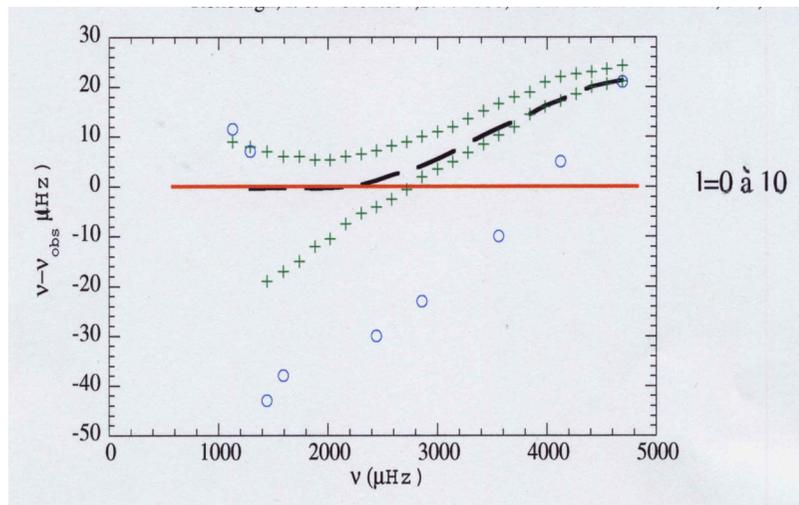
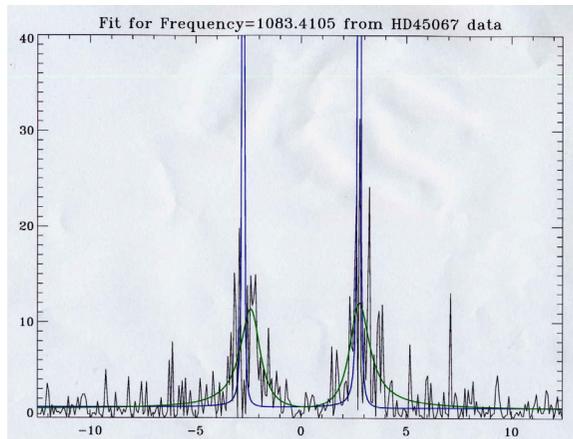
- Compter plus vite
- Sortir la vitesse à différentes hauteurs dans la raie du sodium
- R et T en cours CNES
- Aimant réalisé
- Collaboration avec SEDI et SIS ? P.H. Carton
- ILWS, microsatellite

**D 'Espagnat et al. 1995**





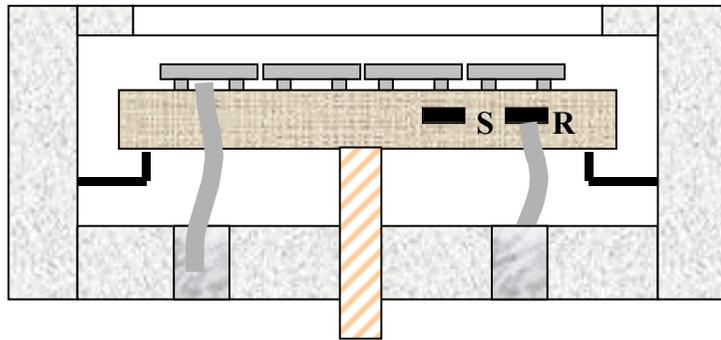
# Perpectives scientifiques: contraindre les autres étoiles



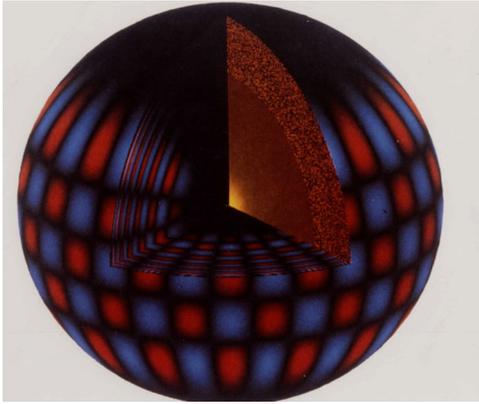
- Repérer les fréquences
- Sortir des algorithmes automatiques: R. Garcia
- Problèmes sismiques de surface: méthode semi analytique: P. Nghiem
- Méthodes:  $\alpha$ Centaurus
- Détermination profondeur convective zone à 4% 3 mois thèse J. Ballot



# Participation proposée



- Allier expertise SAp et SEDI, SIS MEGACAM
- Logiciel d'analyse niveau
- Montage thermique et mécanique du plan focal
- Trouver une participation cohérente à l'instrument pour le connaître au lancement



# CONCLUSION

- **La sismologie est un moyen exceptionnel de faire évoluer notre connaissance des étoiles et de bâtir des ponts avec d'autres disciplines astrophysiques: jeunes étoiles, formation planétaire, milieu circumstellaire**
- **De nombreuses collaborations en vue: turbulence, MHD, atmosphères**
- **Contributions instrumentales importantes aux projets spatiaux de la décade à venir:  
R et T (GOLF NG et APS), COROT et EDDINGTON**