

# Theory of Stellar Oscillations and Planetary Formation

## Lecture Scientific Project

Ilídio Lopes  
([ilidio.lopes@ist.utl.pt](mailto:ilidio.lopes@ist.utl.pt))

Estudo do Espectro Solar Observado pelo GOLF

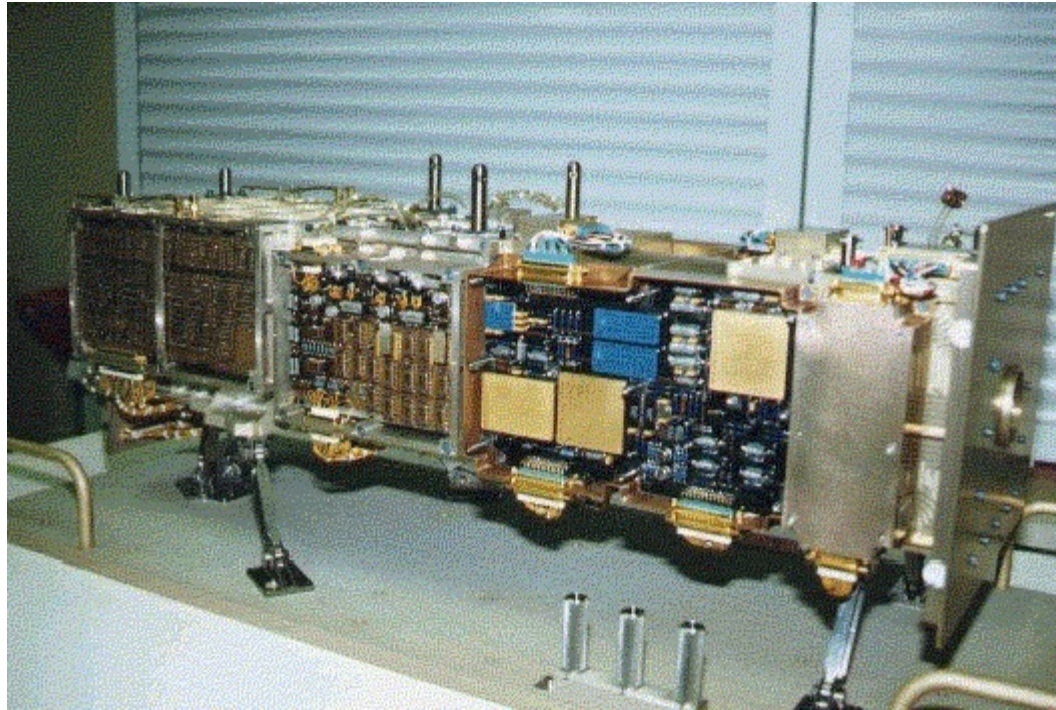
**Projecto de estudo em Sismologia**

## Experiência GOLF - Satélite SoHO



- O objetivo do **Global oscillations at Low Frequencies** é estudar estrutura interna do Sol através da medida do espectro global de oscilações no intervalo de frequências  $10^{-7}$  Hz a  $10^{-2}$  Hz. Os modos de gravidade e os modos acústicos são ambos estudados, o estudo centra-se nos modos de menor ordem radial ou maior período, uma vez que são estas ondas que penetram o centro do Sol.

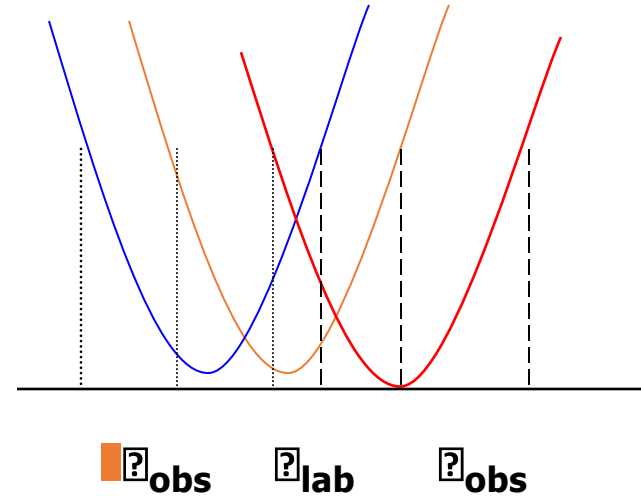
# Instrumento GOLF



- A figura mostra o instrumento “**Global oscillations at Low Frequencies**”.
- O princípio do GOLF é medir o **desvio Doppler** do comprimento de onda de uma linha de absorção de Na (linha D Fraunhofer) através da comparação com o valor absoluto standard, dado pela célula de vapor de Na no interior do instrumento. A linha de absorção é dividida simetricamente em duas componentes devido ao efeito Zeeman através de um campo magnético longitudinal (para melhorar a resolução espectral usa-se as 2 componentes). Seguidamente é registada a evolução temporal de 2 pontos (um em cada bordo da risca) de cada uma das linhas de absorção.
- Actualmente apenas o fotomultiplicador que mede o bordo azul da risca está a funcionar.

# Risca de absorção de Na

• .

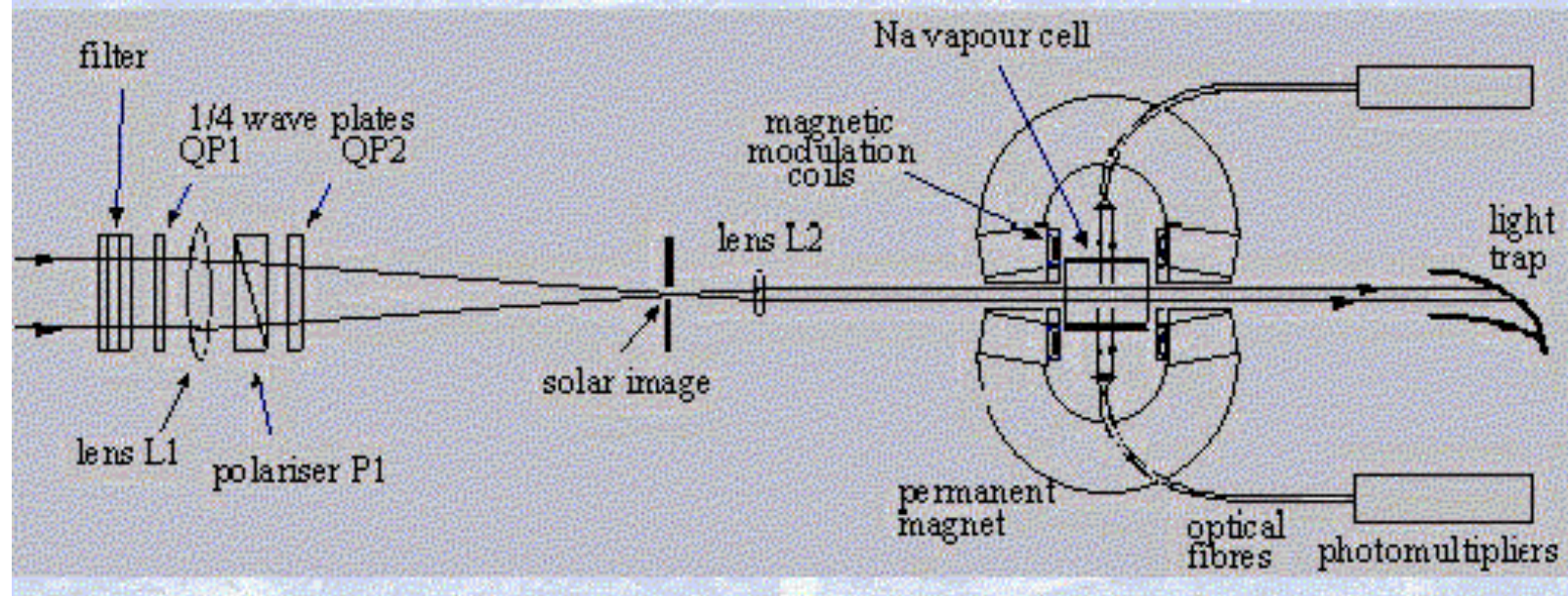


$$V_r = (\lambda_{\text{obs}} - \lambda_{\text{lab}}) / \lambda_{\text{lab}} \cdot C_l$$

Desvio Doppler



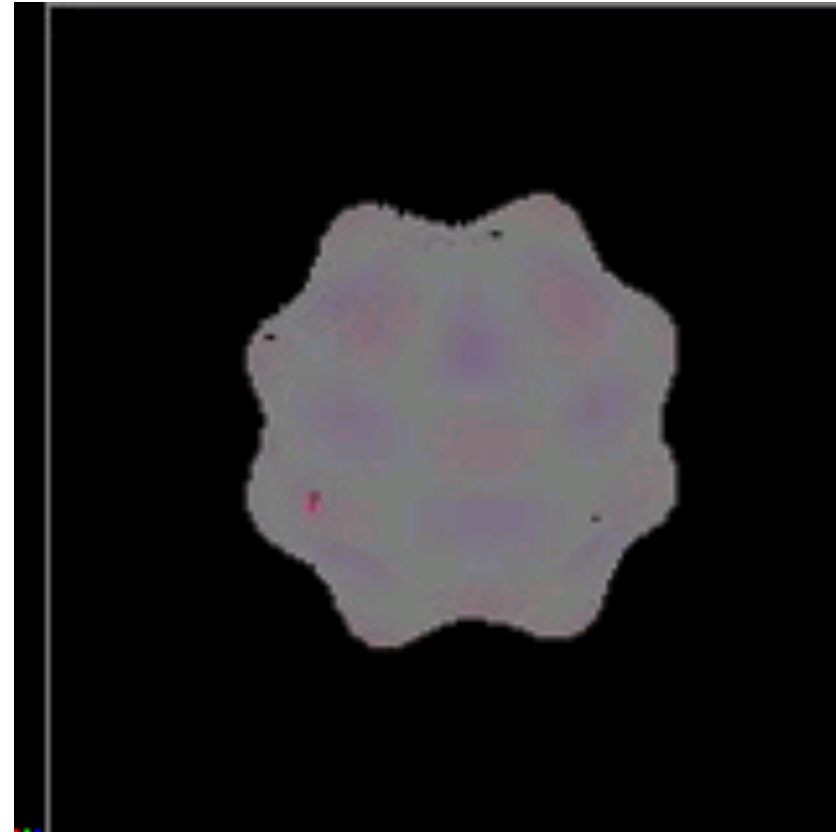
## Configuração esquemática do instrumento GOLF



- Sistema de ressonância óptica: A luz do Sol passa através do filtro que isola uma banda de frequência 17 Å, centradas nas linhas D1 (5896 Å) e D2 (5890 Å) do Na. Ambas as riscas são usadas. Para explicar o processo consideremos uma só risca de Na.
- Os raios de luz são focados através da lente L1 ('solar image'). As lentes L2 serve para produzir um feixe de raios paralelos que atravessam um sistema óptico (usada para minimizar o ruído do SoHO) com uma célula de vapor de Sódio. Depois de atravessar a célula o feixe é absorvido. A luz é dispersada na célula de vapor à temperatura de 90 graus e seguidamente recolhida em dois fotomultiplicadores (numa configuração simétrica), permitindo assim a contagem de fótons.
- A célula encontra-se entre os polos de um campo magnético longitudinal permanente, com uma intensidade de 5000 Gauss, que decompõe o feixe de luz em duas componentes por efeito Zeeman.

# Oscilações Solares

- Os movimentos de convecção na superfície solar são responsáveis pela criação de ondas do tipo acústico.
- Este processo de excitação estocástica é responsável pela criação de 1 milhão de ondas estacionárias (modos de Vibração) que podem ser observados na sua superfície, dos quais mais de 3 mil foram observados.
- Os movimentos de superfície podem ser identificados através do desvio Doppler das riscas espectrais (velocidade), ou variações da luminosidade.
- Heliosismologia: Uso dos modos próprios de vibração do Sol para inferir a estrutura interna solar (Aulas Teóricas).
- Os modos próprios de baixo grau permitem-nos inferir a estrutura do Sol na sua região nuclear ( $r < 0.3 R_{\text{sol}}$ ).
- Figura um modo próprio de Vibração, com o respectivo desvio Doppler da superfície.
- **Modo acústico  $l=8$ ,  $m=4$**



## Oscilações Acústicas - modos P

**10 frames per second**  
**600X (10 min/sec)**

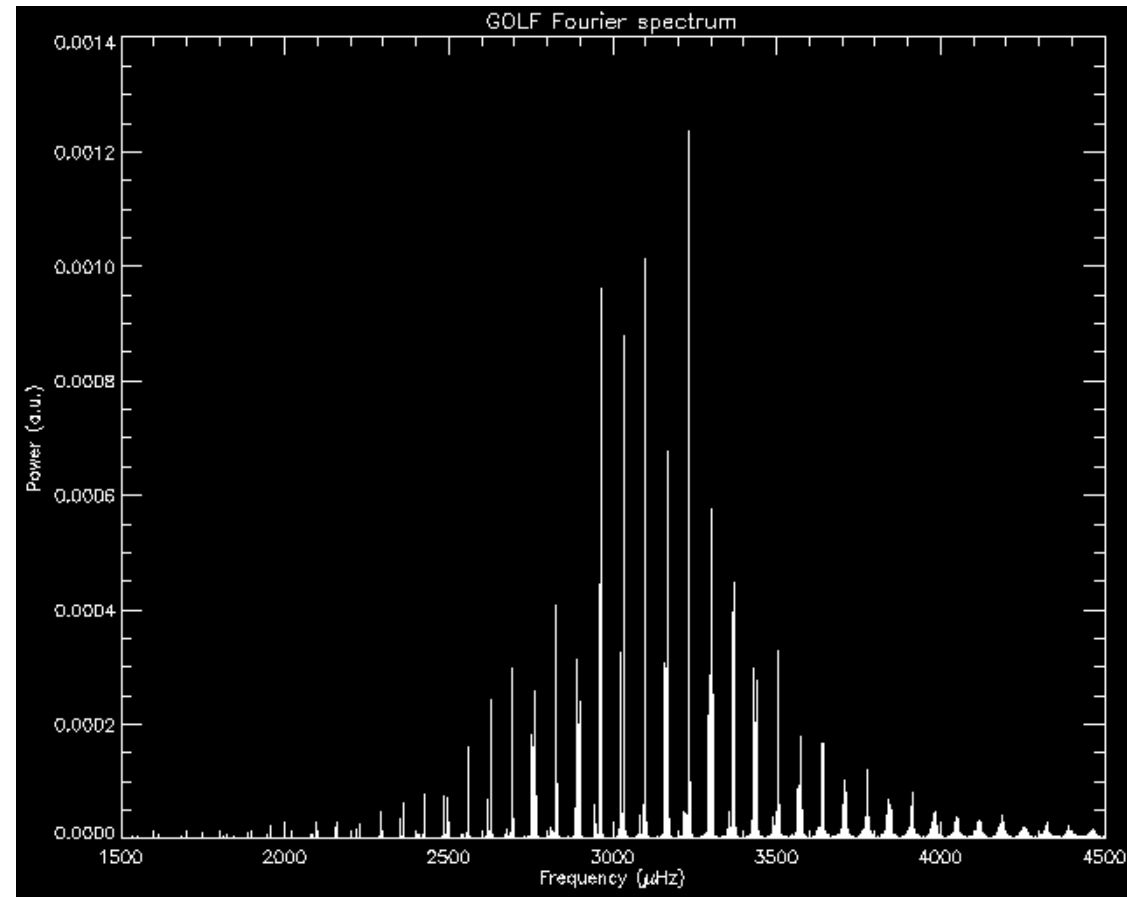


# Toy Model

- Oscilações de uma esfera isotérmica.
- Transformada de Fourier.

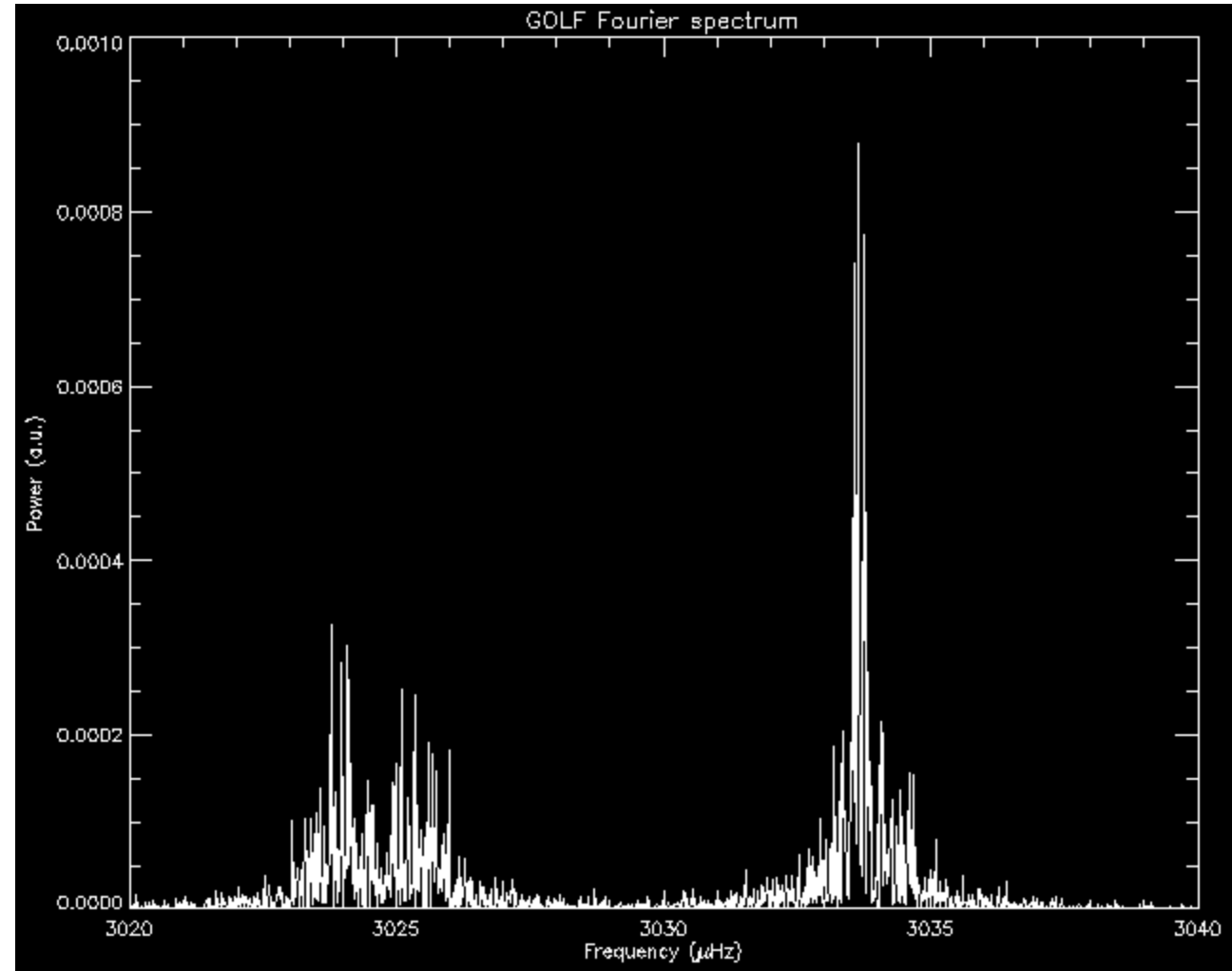
# Modos Acústicos de baixo grau GOLF

- Espectro de Fourier da velocidade calibrada, de uma série temporal de 690 dias.
- O excelente sinal sobre ruído põe em evidência os modos próprios de baixo grau ( $l=0,1,2,3$ ).



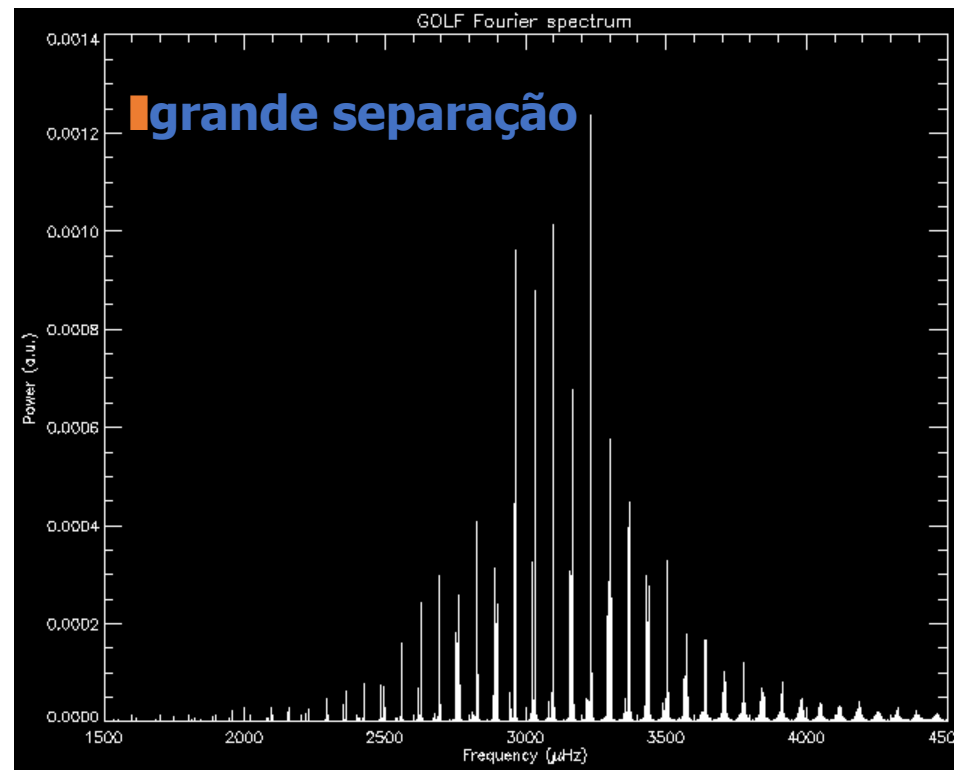
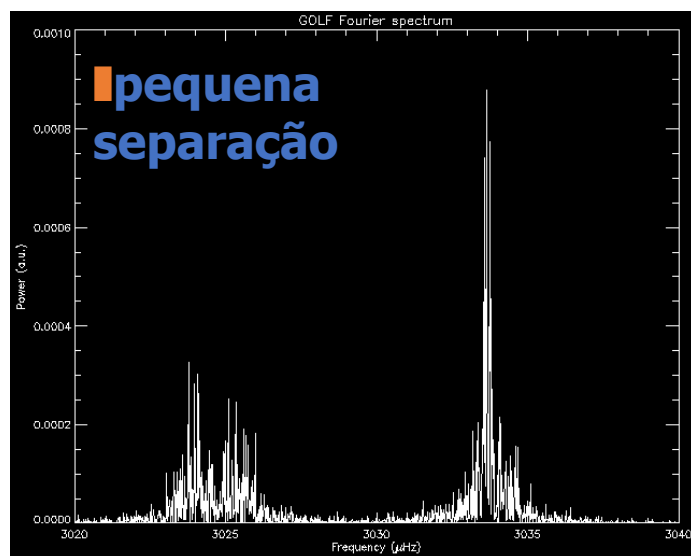
# Estrutura Complexa de uma risca espectral

- Estrutura detalhada de 2 modos com graus  $l=0$  e  $l=2$ .
- A complicada estrutura de cada modo deve-se ao processo de excitação estocástica que são responsáveis pela sua existência.
- A estrutura fina devida à rotação diferencial interna do Sol da ordem de 17 nHz, encontra-se 'misturada' no 'ruído' de excitação estocástica.



# Determinação dos parametros sismicos

- grande separação:
  - $\varphi_{l,n} - \varphi_{l,n-1}$
- pequena separação:
  - $\varphi_{l,n} - \varphi_{l,n-2}$
- segunda diferença:
  - $\varphi_{l,n} - 2\varphi_{l,n-1} + \varphi_{l,n-2}$

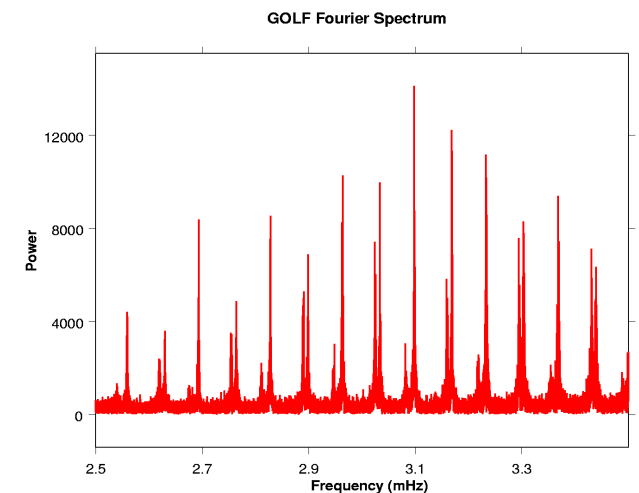
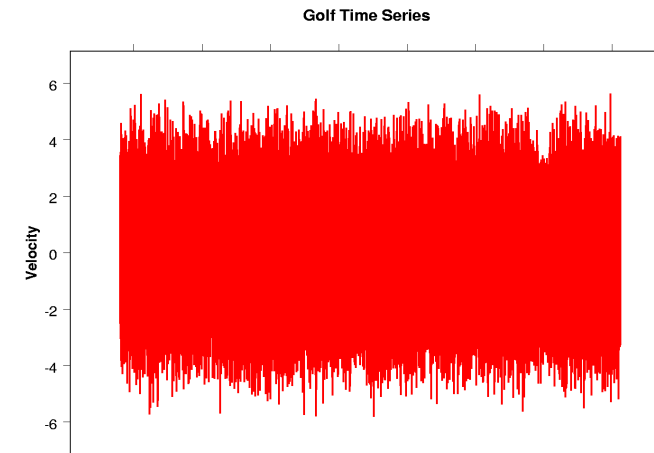
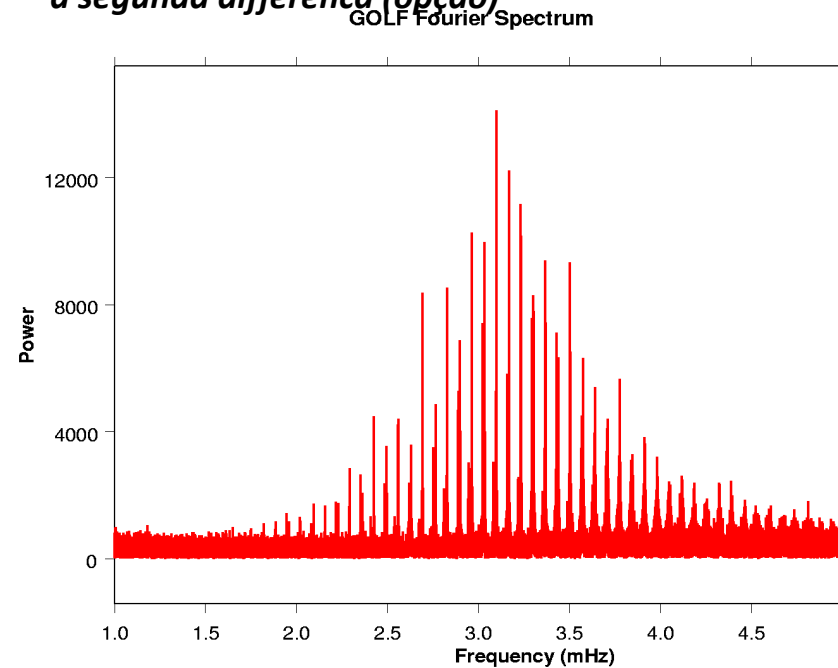


Objectivo do Projecto de Investigação:

Determinação das frequências dos modos de baixo grau

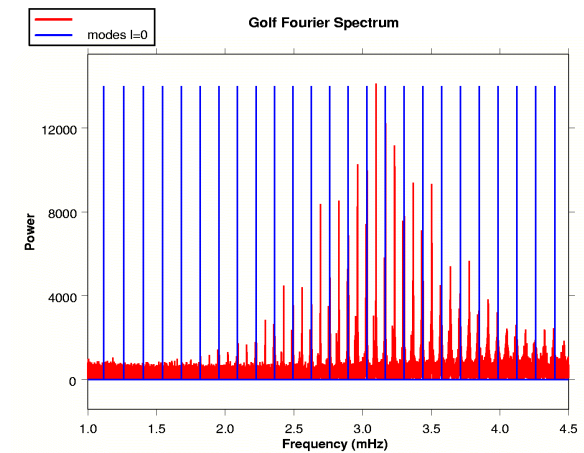
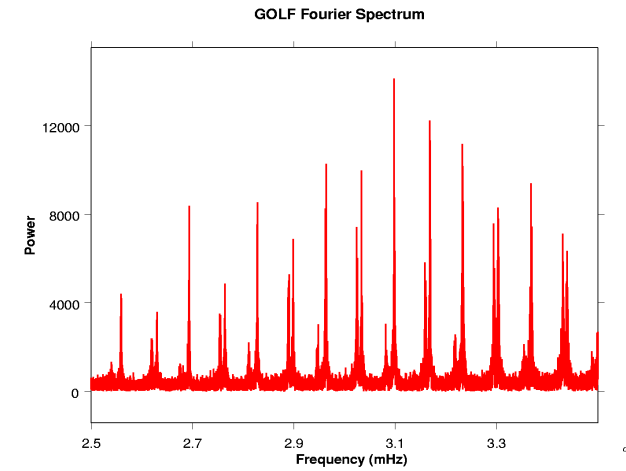
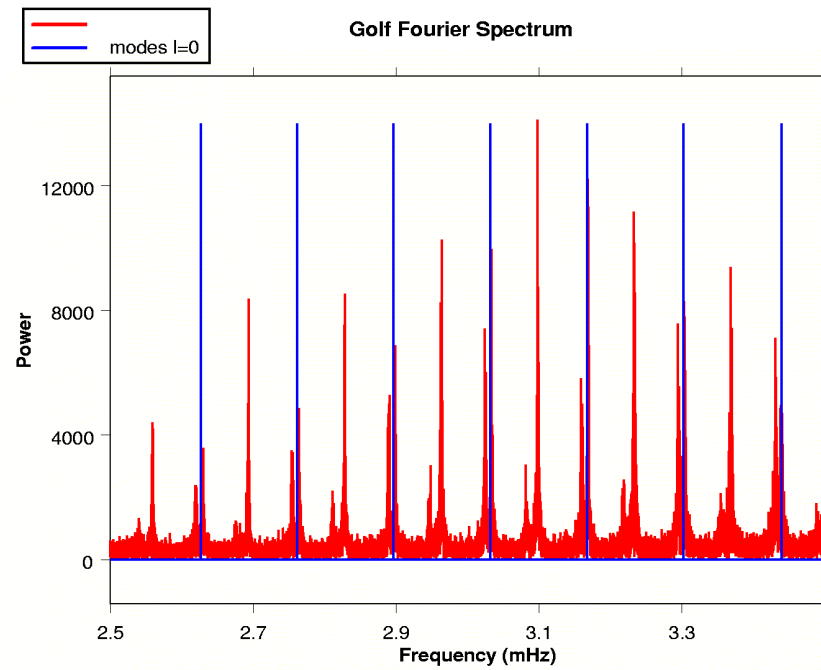
***Usando uma série temporal do GOLF determinar:***

- as frequências próprias dos modos radiais
- a grande separação para os modos radiais
- *a pequena separação (opção)*
- *a segunda diferença (opção)*



## Comparação do 'Espectro' Teórico com Espectro Observado

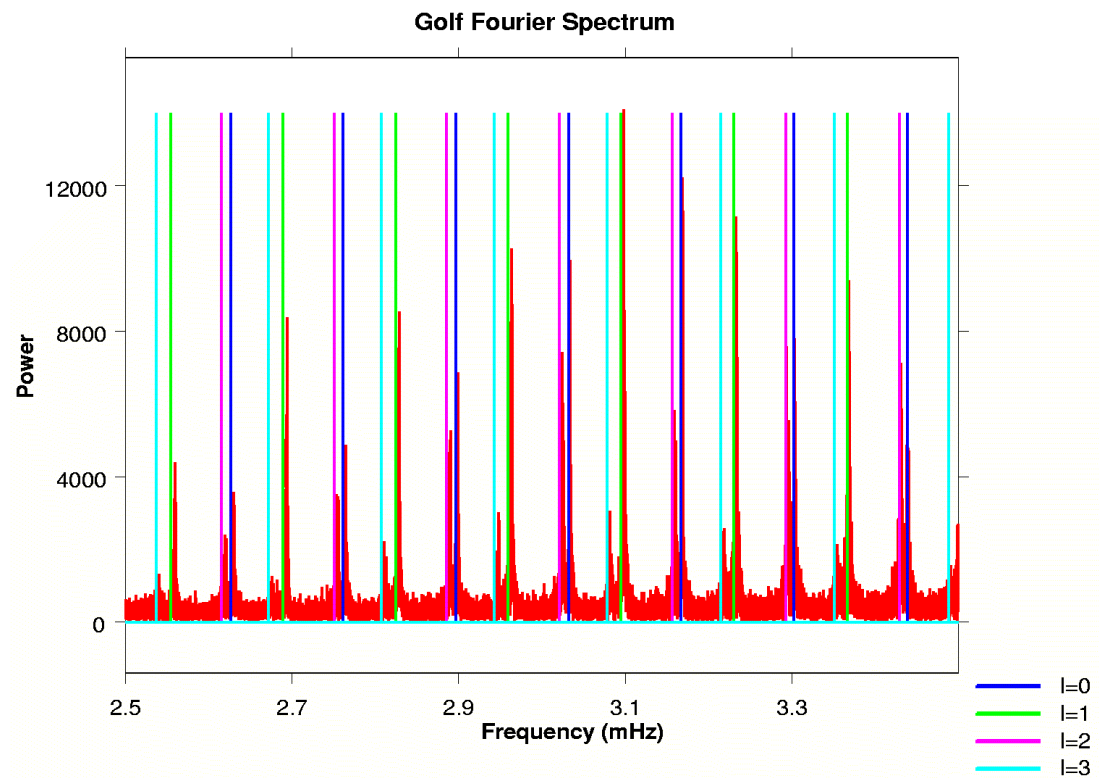
- Modos Acústicos de grau  $l=0$





# Determinação dos parametros sismicos

- Modos Acústicos de grau  $l=0,1,2,3$



# Pequena Separação

- Esta variável é sensível à estrutura externa da estrela

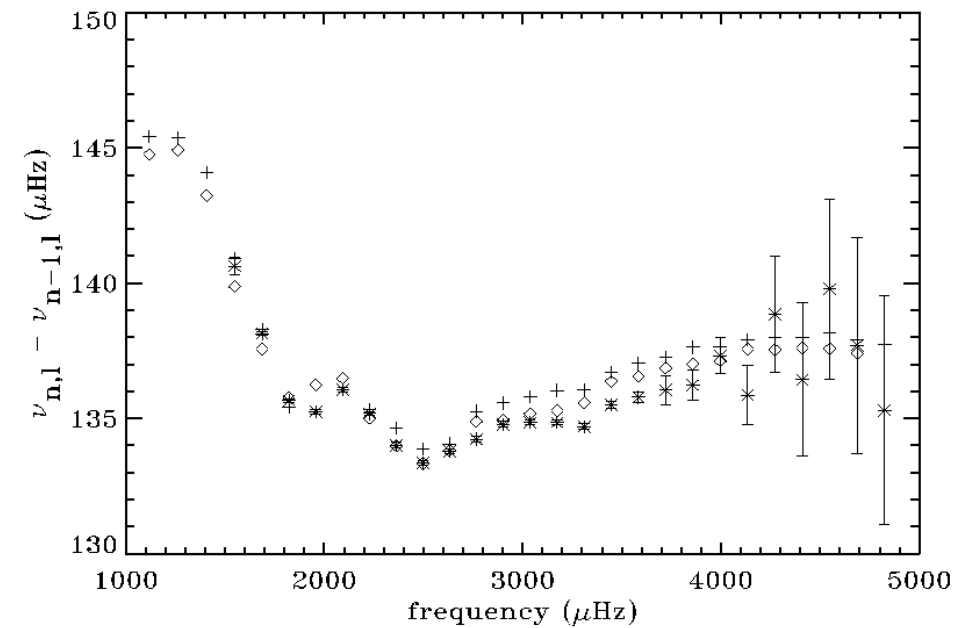


Fig. 2. Large separation for  $l = 0$ . GOLF observations corresponding to stars with error bars and solar models to crosses for Christensen-Dalsgaard *et al.* (1996), diamonds for Turck-Chièze and Lopes (1993).

# Projecto de Investigação (individual)

- **Package:** *Dossier com 2 séries temporais ‘Calibradas’ do GOLF de 6 meses:*
  - As duas séries temporais foram calibradas por dois grupos diferentes (*Dossier TP ler 00readme.txt*).
  - O trabalho deve ser feito usando a *Package IDL*.
- **Objectivo do trabalho** consiste em determinar as *frequências dos modos acústicos radiais* ( $l=0$ ). Calcular a *grande separação para os modos radiais*.
- **Relatório Final**
  - indicar o objectivo do trabalho
  - indicar as técnicas usadas
  - discussão e conclusão
- **Apresentação oral do trabalho** (10 min)
- O projecto permitirá que **focalizem a investigação** em algum aspecto particular que vocês achem mais relevante (as referências serão dadas em função da vossas preferências):
  - 2 séries temporais de 2 grupos diferentes !
  - estudar os aspectos teóricos/observacionais dos parametros sismicos: grande separação, pequena separação,...
  - Usar técnicas de processamento de sinal para melhor determinar as frequências.
  - Etc...

# Exemplo no computador

- Demonstração do como organizar o projecto

Lecture  
END