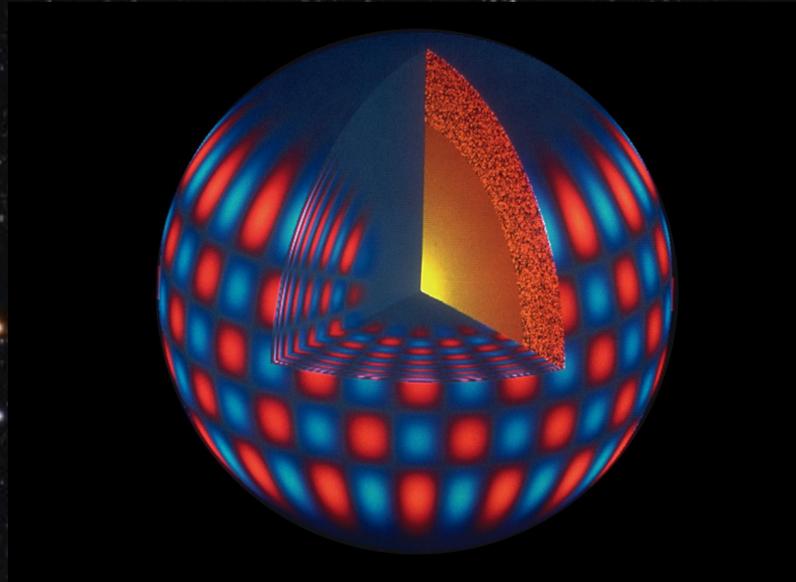


# Astrosismología de estrellas enanas blancas: una actualización



Alejandro H. Córscico

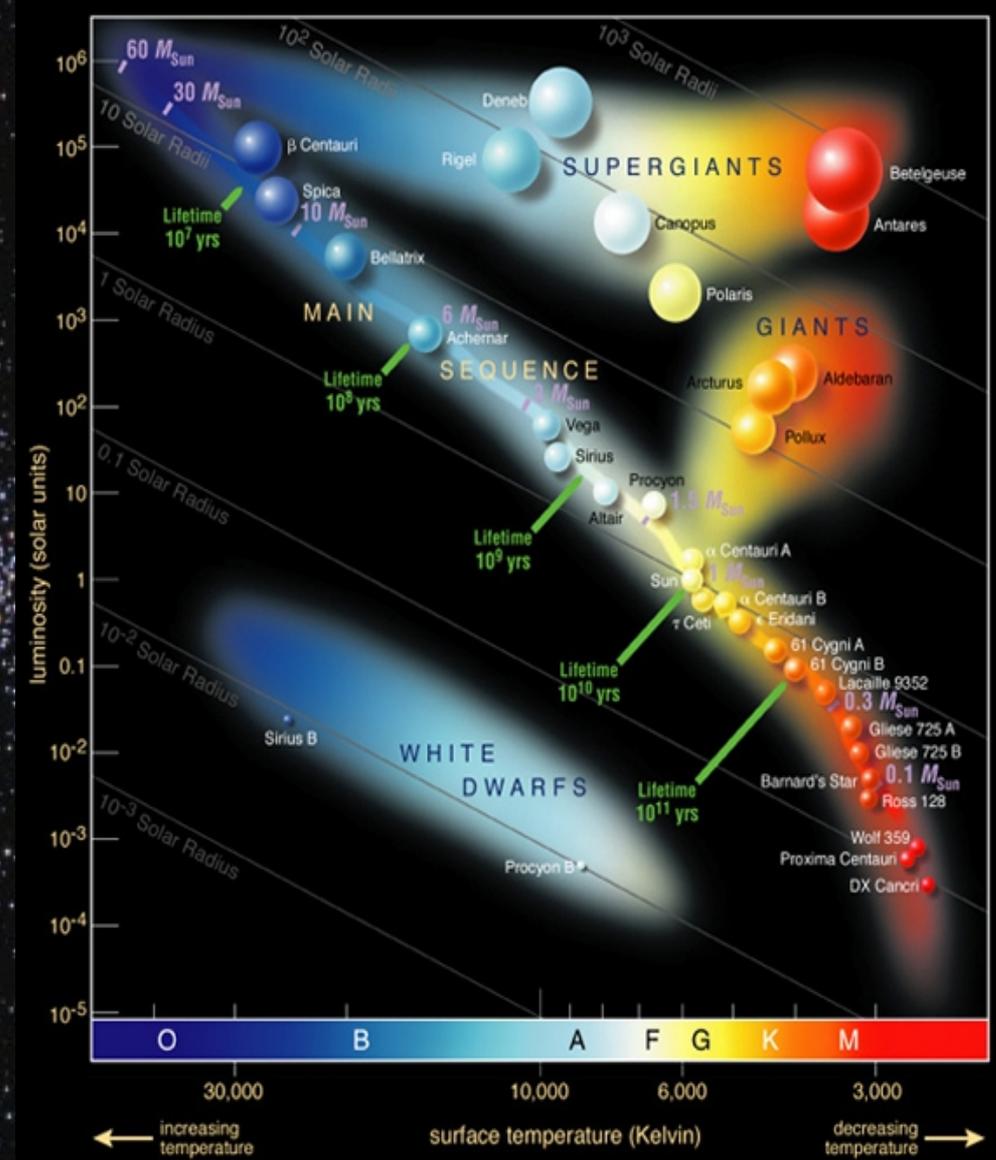
**Grupo de Evolución Estelar y Pulsaciones**  
Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas (FCAG)  
Universidad Nacional de La Plata (UNLP)  
ARGENTINA

# Enanas blancas: características básicas

## Destino final más común de la evolución estelar

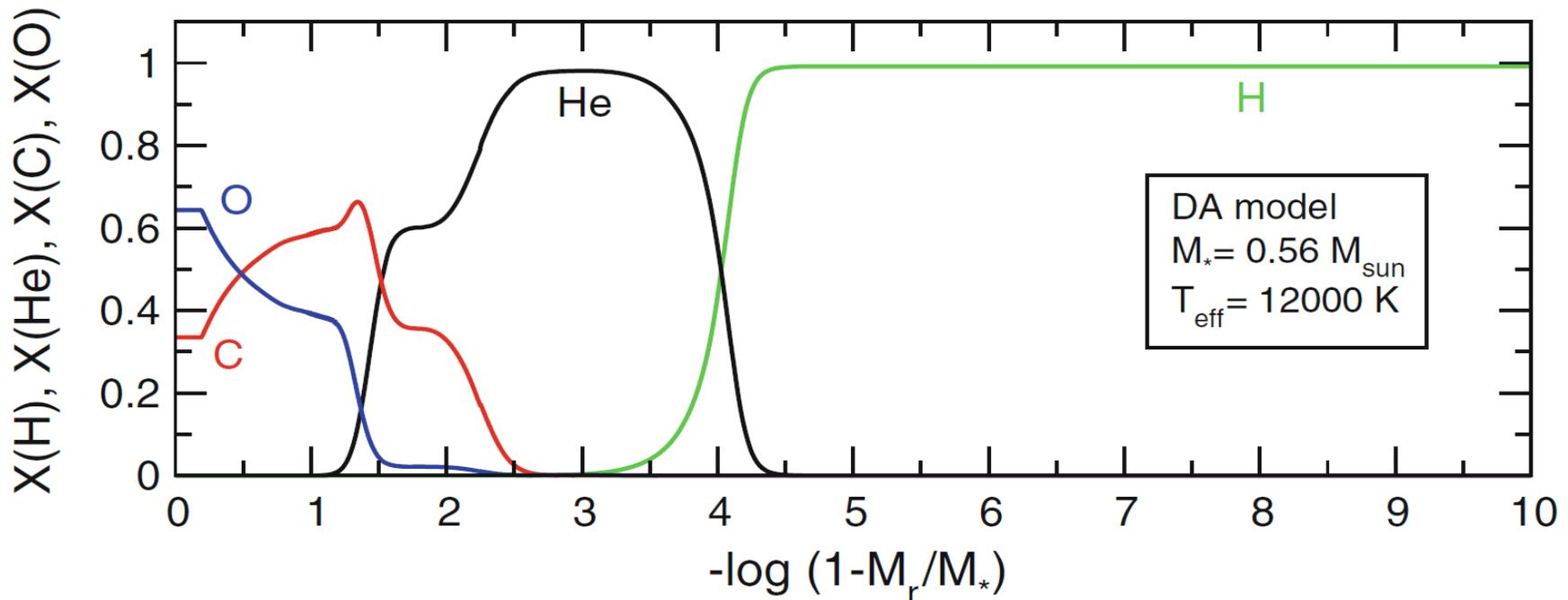
$$(M_{\text{ZAMS}} \leq 8 M_{\text{sun}})$$

- $T_{\text{eff}} \sim 4,000 - 200,000 \text{ K}$
- $\log g \sim 8$  ( $\log g_{\text{sun}} = 4.4$ )
- $L_*/L_{\text{sun}} \sim 0.0001 - 1000$
- $\langle V \rangle \sim 15.5$
- $M_* \sim 0.6 M_{\text{sun}}$  ( $0.15 - 1.2 M_{\text{sun}}$ )
- $R_* \sim 0.01 R_{\text{sun}}$
- $\rho \sim 10^6 \text{ gr/cm}^3$  ( $\rho_{\text{sun}} \sim 1.4 \text{ gr/cm}^3$ )
- Edades:  $\sim 10^9 - 10^{10}$  años



# Enanas blancas: características básicas

- Estructura química estratificada debido al **asentamiento gravitacional**:
  - Núcleo de C/O (99% de la masa total)
  - Envoltura de He ( $M_{\text{He}} < 0.01 M_*$ )
  - Envoltura de H ( $M_{\text{H}} < 0.0001 M_*$ ) según teoría estándar de evolución estelar
- Tipo espectral DA (atmósferas ricas en H) ~ 80 % del total
- Tipo espectral DB (atmósferas ricas en He) ~ 15 % del total



# ¿Por qué son importantes las enanas blancas?

- Objetos muy antiguos, contienen información de la historia de nuestra Galaxia
- Aplicación a varios campos de la astrofísica moderna:
  - **Cosmocronología:** estimación de la edad de poblaciones estelares (cúmulos abiertos y globulares, disco y halo galáctico (función luminosidad)).
  - **Progenitores de SNIa, variables cataclísmicas (novas):** eventos energéticos ( $10^{44}$ -  $10^{51}$  erg) de transferencia de masa sobre una enana blanca desde su compañera
  - **Densidades y presiones extremadamente altas:** laboratorios cósmicos (cristalización, física de partículas, variación de constantes fundamentales)

# Técnicas para estudiar las enanas blancas

- **Espectroscopía** ( $T_{\text{eff}}$ ,  $\log g$ , comp. química superficial, campos magnéticos)
- **Astrometría** (paralajes, gravedad en enanas blancas sin líneas)
- etc
- **Astrosismología:** *“estudiar como vibra un sistema en sus modos propios para inferir sus propiedades mecánicas”*
  - Pulsaciones estelares permiten “ver” el interior estelar (inaccesible con otras técnicas)
  - Compara los períodos de pulsación de modelos teóricos con períodos observados.
  - Permite inferir estratificación química, masa, rotación, etc

# Pulsaciones estelares

- Pulsaciones estelares son modos propios de las estrellas: **autofrecuencias y autofunciones**. Ondas estacionarias en 3-D.
- Cada estrella posee espectro infinito de autofrecuencias (discretas) **UNICO**, que está fijado por su estructura interna (“frecuencias naturales”)
- En **enanas blancas** el espectro de frecuencias de pulsación muy sensible a la estratificación química.
- **PULSACIONES RADIALES:** conservan la forma esférica: Cefeidas, RR Lira, Miras. Son un caso particular de las no-radiales
- **PULSACIONES NO-RADIALES:** clase muy general de movimientos oscilatorios. No mantienen la forma esférica: Sol, tipo-solar, gigantes rojas,  $\delta$  Scuti,  $\gamma$  Doradus,  $\beta$  Cefei, SPB, WR, subenanas B, **enanas blancas y pre-enanas blancas variables**

# Pulsaciones estelares no-radiales

Deformaciones de la estrella dadas por el vector desplazamiento (teoría lineal, pequeñas amplitudes):

$$\vec{\xi}_{nlm} = \{\vec{\xi}_r, \vec{\xi}_\theta, \vec{\xi}_\phi\}_{nlm}$$

cuyas componentes son:

$$\vec{\xi}_r = \xi_r(r) Y_\ell^m(\theta, \phi) e^{i\sigma t} \vec{e}_r$$

$$\vec{\xi}_\theta = \xi_h(r) \frac{\partial Y_\ell^m}{\partial \theta} e^{i\sigma t} \vec{e}_\theta$$

$$\vec{\xi}_\phi = \xi_h(r) \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial Y_\ell^m}{\partial \phi} e^{i\sigma t} \vec{e}_\phi$$

- Dependencia temporal sinusoidal

- Dependencia angular: armónicos esféricos

- Dependencia radial: autofunciones, solución numérica

# Pulsaciones estelares no-radiales

## ■ Modos caracterizados por “números cuánticos”:

- Grado armónico:  $\ell = 0, 1, 2, 3, \dots$

( $\ell - m$ ) líneas nodales (paralelos) sobre la superficie estelar

- Orden acimutal:  $m = -\ell, \dots, -2, -1, 0, +1, +2, \dots, +\ell$

líneas nodales (meridianos) sobre la superficie estelar

- Orden radial:  $k = 0, 1, 2, 3, \dots$

superficies esféricas nodales sobre las cuales hay desplazamiento nulo.

## ■ Tres familias de modos:

**Modos p:** grandes variaciones de presión, movimientos mayormente radiales. Fuerza de restitución dominante: compresibilidad. Alta frecuencia (períodos cortos).

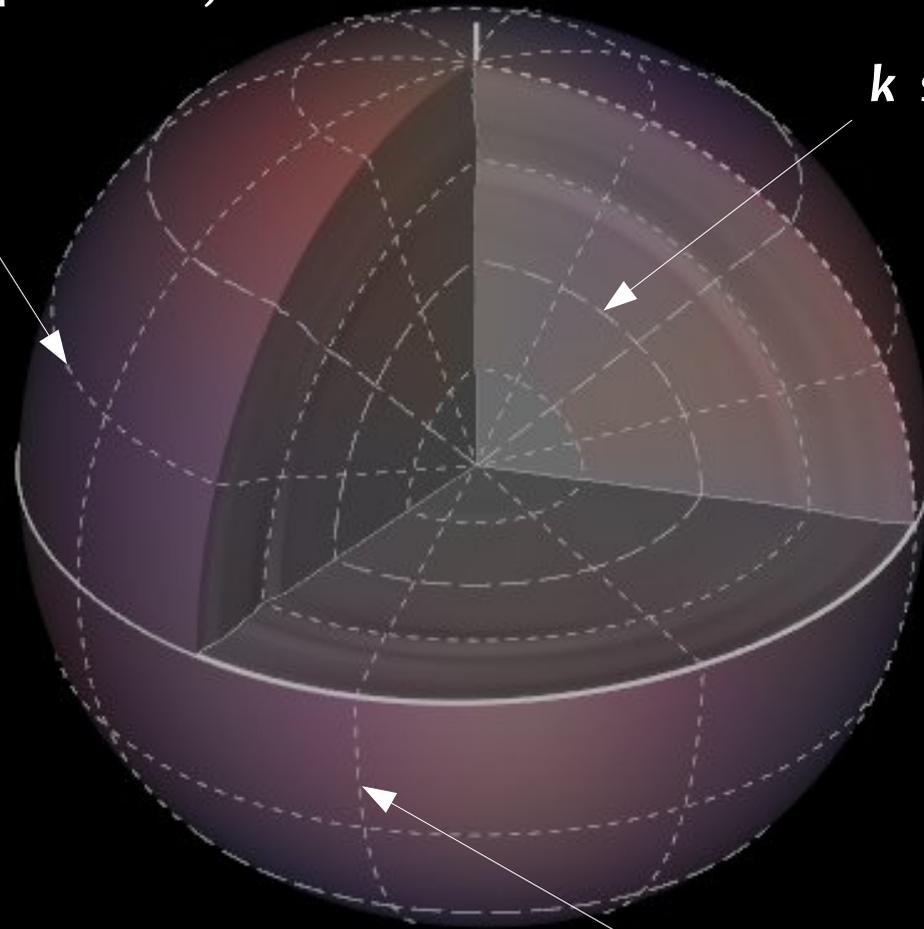
**Modos g:** pequeñas variaciones de presión, desplazamientos mayormente tangenciales. Fuerza de restitución dominante: flotación (buoyancy). Bajas frecuencias (períodos largos).

**Modos f:** características intermedias entre modos p y g ( $\ell > 1$ ). En general no posee nodos en la dirección radial ( $k = 0$ )

# Pulsaciones estelares no-radiales: aspecto

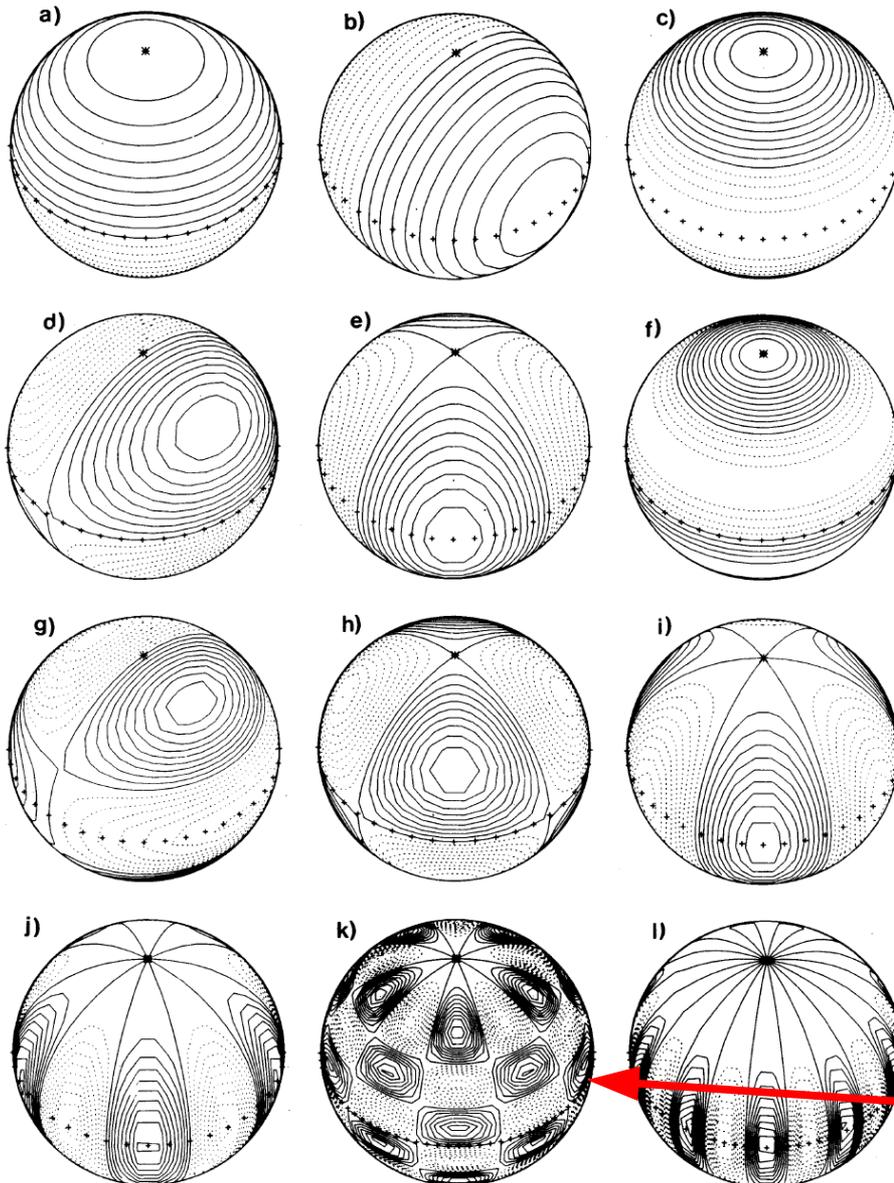
$(\ell - m)$  líneas nodales (paralelos)

$k$  superficies nodales

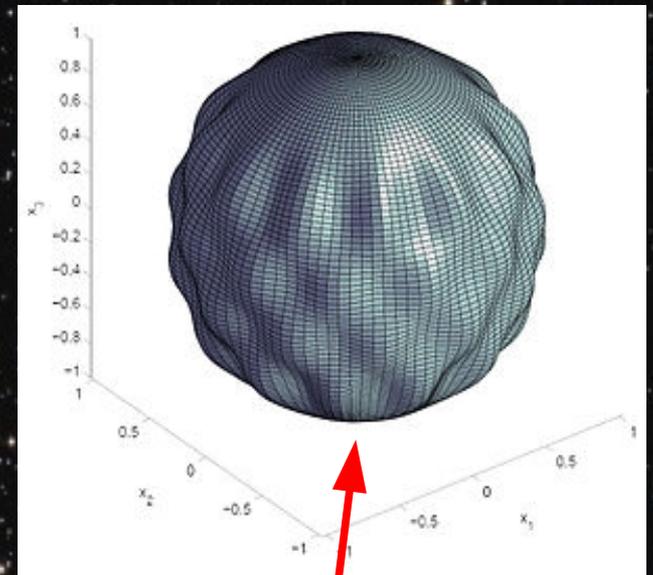


$m$  líneas nodales (meridianos)

# Pulsaciones estelares no-radiales: aspecto

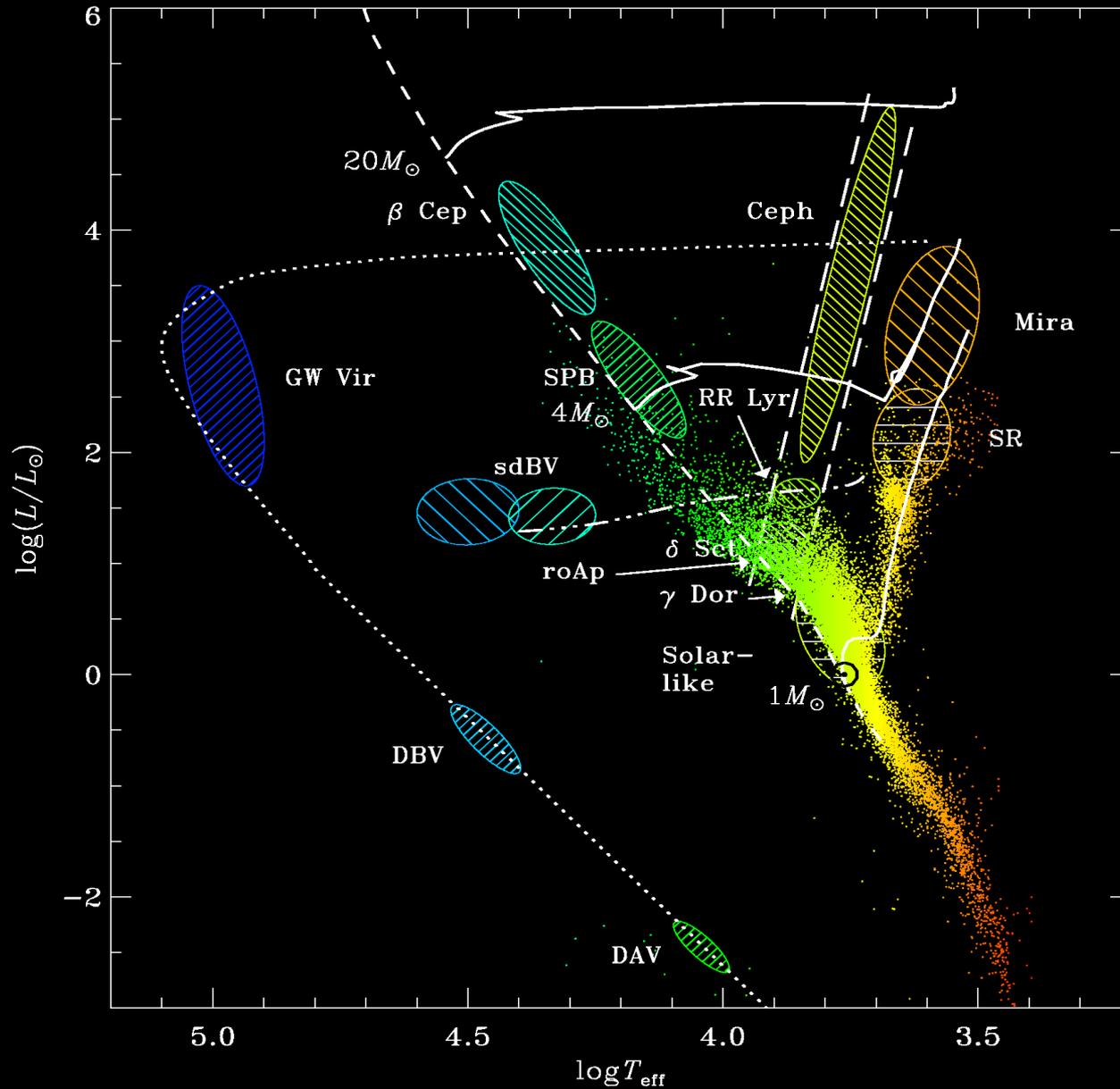


$\ell = m$  modos sectoriales  
 $m = 0$  modos zonales  
 $0 < |m| < \ell$  modos tesserales



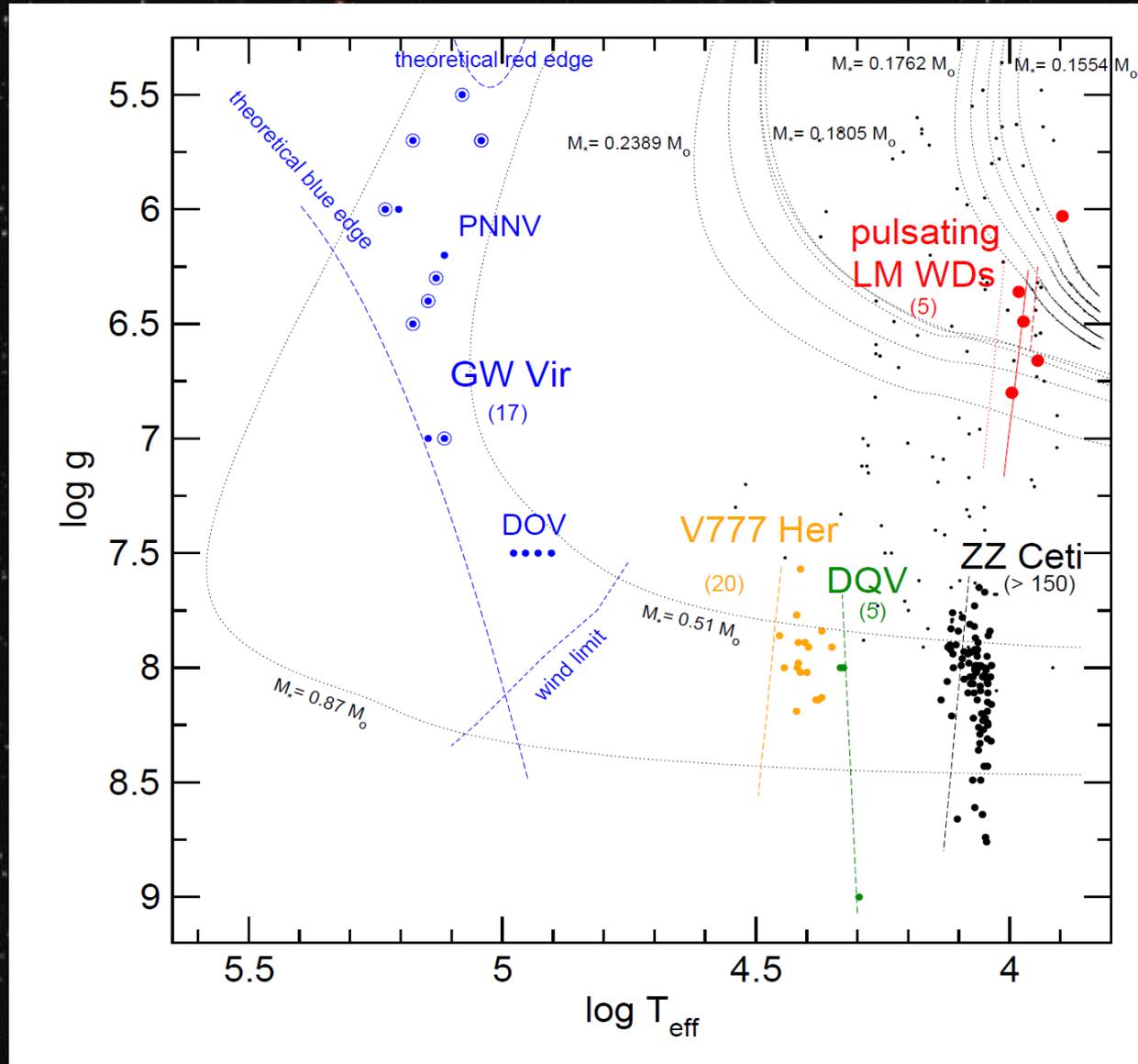
$\ell = 10, m = 5$

# Diagrama HR de estrellas pulsantes



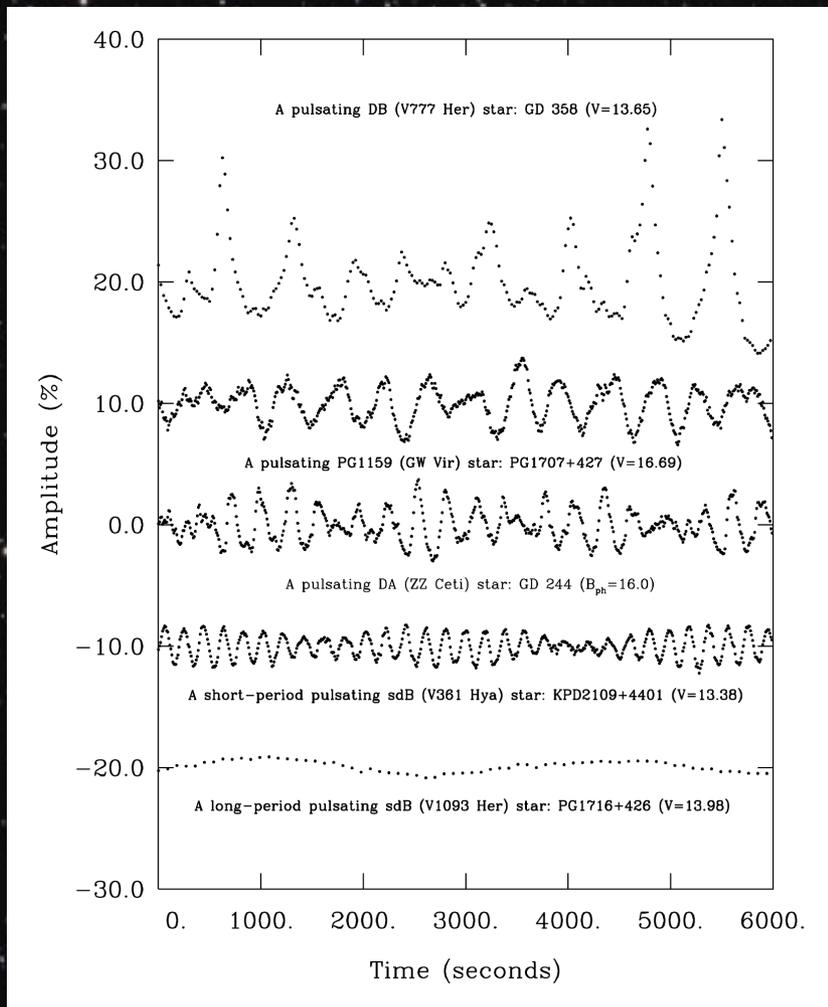
# Enanas blancas pulsantes

Landolt (1968): 1er objeto descubierto



# Observaciones

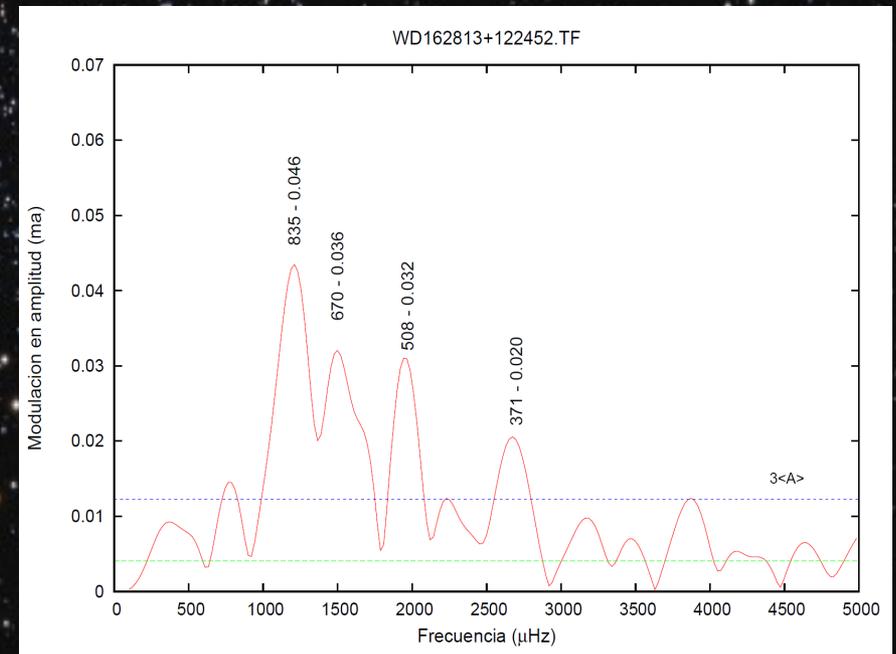
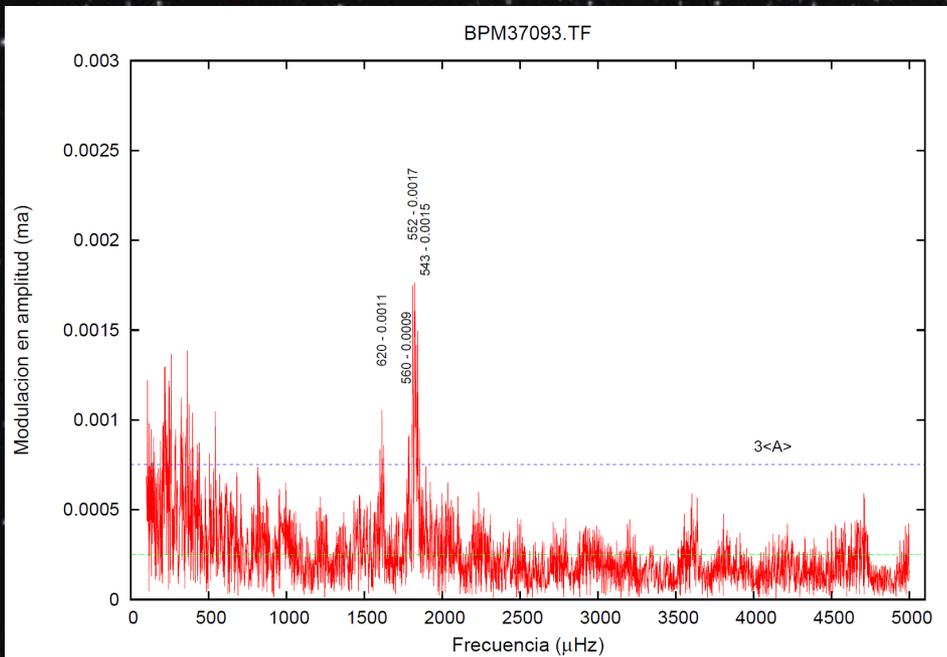
- ◆ **Fotometría:** curvas de luz, variaciones en el óptico y FUV debido a cambios en la T superficial (variaciones en radio muy pequeñas,  $\sim 10^{-5} R_*$ )
- ◆ **Survey SDSS, misión Kepler, desde Tierra**



- Amplitudes de las variaciones entre 0.005 y 0.4 mag.
- Gran variedad de curvas de luz, algunas sinusoidales y de pequeña amplitud (borde caliente), otras no lineales y de gran amplitud (borde frío).
- Variaciones debidas a **modos g** con grado armónico  $\ell = 1, 2$  (quizá 3, efectos de cancelación geométrica)
- Multimodales (más de un período)
- Presencia de combinaciones lineales de frecuencias, no modos genuinos

# Observaciones Argentina (CASLEO) - Brasil

- ◆ **Primera campaña conjunta entre Argentina (Mariela Corti, CASLEO) y Brasil (S. O. Kepler+, Universidad Federal de Rio Grande do Sul):** Observaciones fotométricas de enanas blancas pulsantes con el Telescopio 2.15 m "Jorge Sahade".
- ◆ **Primeros resultados** sobre las pulsantes DAVs WD162813+122452 y BPM37093



Por más detalles, ver póster de Mariela Corti en esta reunión

# Clases de enanas blancas pulsantes

Clase	#	Magnitud visual	Teff (kK)	log g (cgs)	A (mag)	P (s)	dP/dt (s/s)	Comp. química
GW Vir (PNNV)	10	11.8	110	5.5	0.01	420	$10^{-10}$	He,C,O
		16.6	170	7	0.15	6000	$10^{-11}$	
GW Vir (DOV)	9	14.8	70	6	0.02	300	$10^{-10}$	He,C,O
		16.7	160	7.5	0.1	2580	$10^{-12}$	
V777 Her (DBV)	21	13.6	22.4	7.5	0.05	120	$10^{-13}$	He (H)
		16.7	29	8.3	0.3	1080	$10^{-14}$	
DQV (?)	6	17.7	19	8	0.005	240	$10^{-14}$	He,C
		19.6 (g)	22	9	0.015	1100		
ZZ Ceti (DAV)	160	12.2	10.4	7.5	0.01	100	$10^{-15}$	H
		16.6	12.4	8.75	0.3	1400		
ELMV	7	16.2	7.8	6	0.002	1200	$10^{-15}$	H
		18.8 (g)	10	6.8	0.044	6200	$10^{-16}$	

(g)= magnitud g del sistema *ugryz* del relevamiento SDSS

# Astrosismología de enanas blancas

- **Método directo:** básicamente, comparación cuantitativa del patrón de períodos observados con períodos calculados sobre un set de modelos teóricos apropiados.
  - Modelo de mejor ajuste (“modelo sismológico”): el que minimiza una función de calidad que “mide” la diferencia entre períodos teóricos y observados. Parámetros globales (masa, radio), estructura y composición interna (composición química del núcleo, estratificación química de la envoltura)

$$\chi^2(M_*, T_{\text{eff}}) = \sum_{i=1}^N \min \left[ (\Pi_i^{\text{O}} - \Pi_k^{\text{T}})^2 \right]$$

- Es el método usualmente empleado en enanas blancas.
  - Es suficiente con períodos **adiabáticos** (supone que no hay intercambio de calor), ya que la no-adiabaticidad es muy pequeña (parte imaginaria de las autofrecuencias muy pequeña).
- **Métodos de inversión:** requieren de muchos períodos, no sirven para enanas blancas, si en heliosismología (Sol)

# Modelos de enanas blancas

## (1) Modelos estáticos (“fast WD asteroseismology”)

- Física constitutiva simplificada
- Perfiles químicos (cruciales) parametrizados de forma arbitraria
- Posibilidad de explorar exhaustivamente el espacio de parámetros

## (2) Modelos evolutivos detallados (método adoptado por nuestro grupo)

- Modelos evolutivos calculados desde la ZAMS hasta la fase de enana blanca, física constitutiva detallada (EoS, opacidades, neutrinos, cristalización, etc)
- Perfiles químicos consistentes con la evolución previa, difusión
- Pocos parámetros libres (los menos posibles)

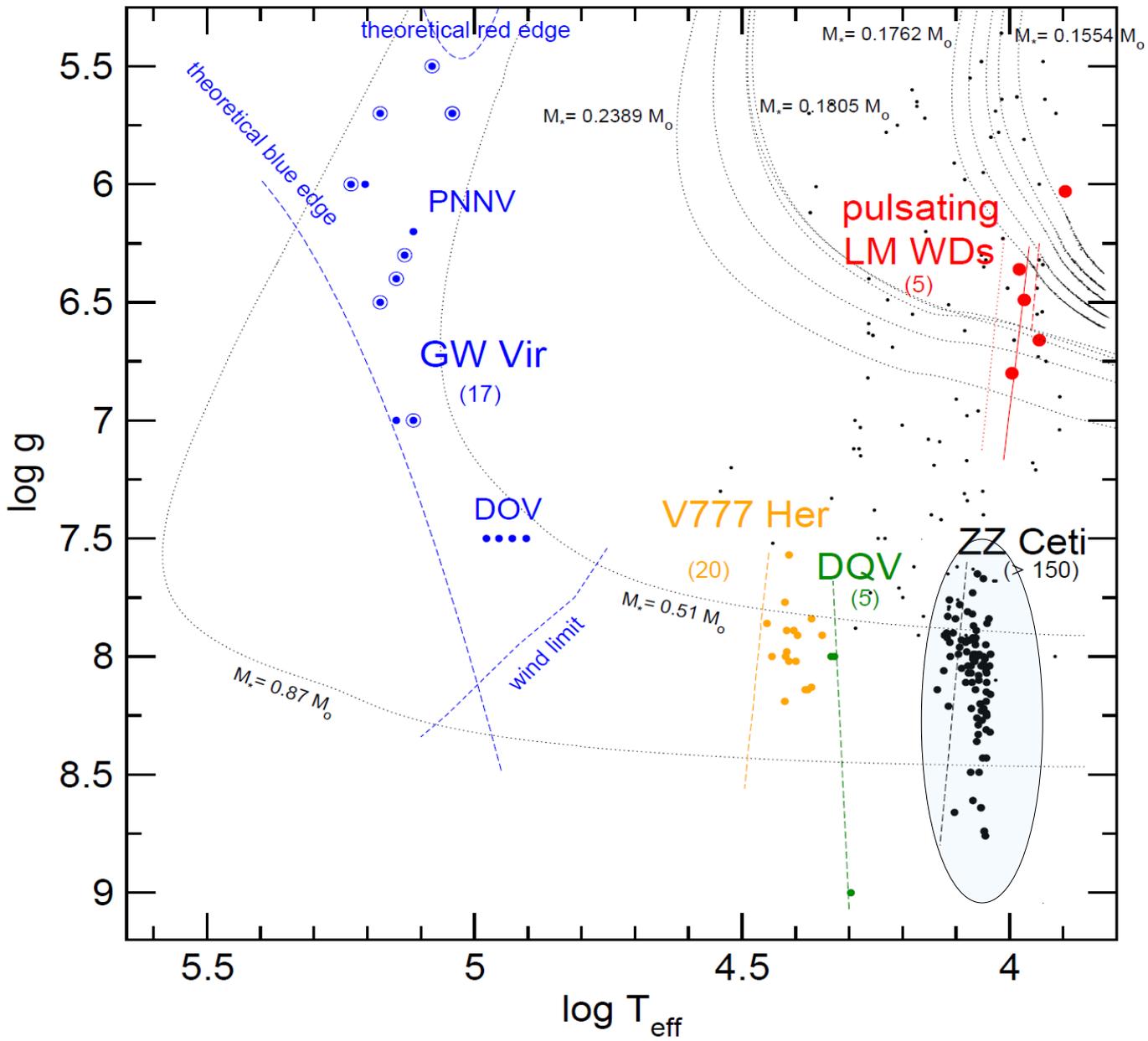
# Dos clases de enanas blancas pulsantes estudiadas recientemente en el Grupo de La Plata

▶ Estrellas ZZ Ceti (DAVs)

▶ Estrellas enanas blancas de masa extremadamente baja variables (ELMVs)



Estrellas ZZ Ceti (DAVs)



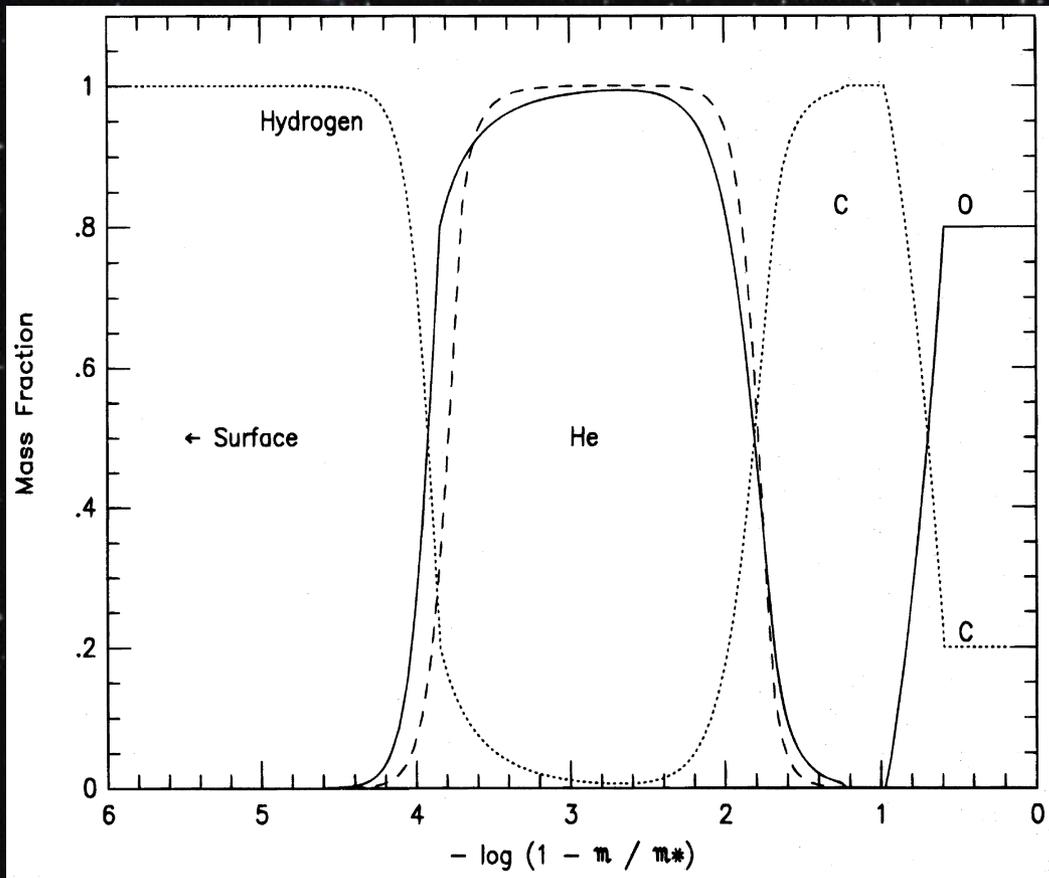
# Estrellas ZZ Ceti

- ★ **La clase mas numerosa:** mas de 160 objetos (Períodos: 100-1200 s)
- ★ **Pureza de la banda de inestabilidad?** (i) Sensibilidad de las observaciones, y (ii) Determinación de  $T_{\text{eff}}$  y  $g$ . *Aparentemente: banda pura*
- ★ Presencia de **mode trapping:** estratificación química (C-O/He/H)
- ★ **Mecanismo de filtro** (desconocido): muy pocos modos observados en general
- ★ **Mecanismo de excitación:** mecanismo  $\kappa$  y “convective driving” originado por la ionización parcial del H

# Astrosismología de estrellas ZZ Ceti

Hasta 2010, la mayoría de los estudios realizados basados en modelos simplificados de enanas blancas DA, en particular en lo concerniente a la estratificación química:

- Perfiles químicos del núcleo (C, O) en forma de rampa (Bradley 1996, 1998, 2000, Bischoff-Kim et al. 2008), o perfiles uniformes con 50% y 50% de C y O (Castanheira & Kepler 2008, 2009)
- Transición química He/H con suposición de equilibrio difusivo

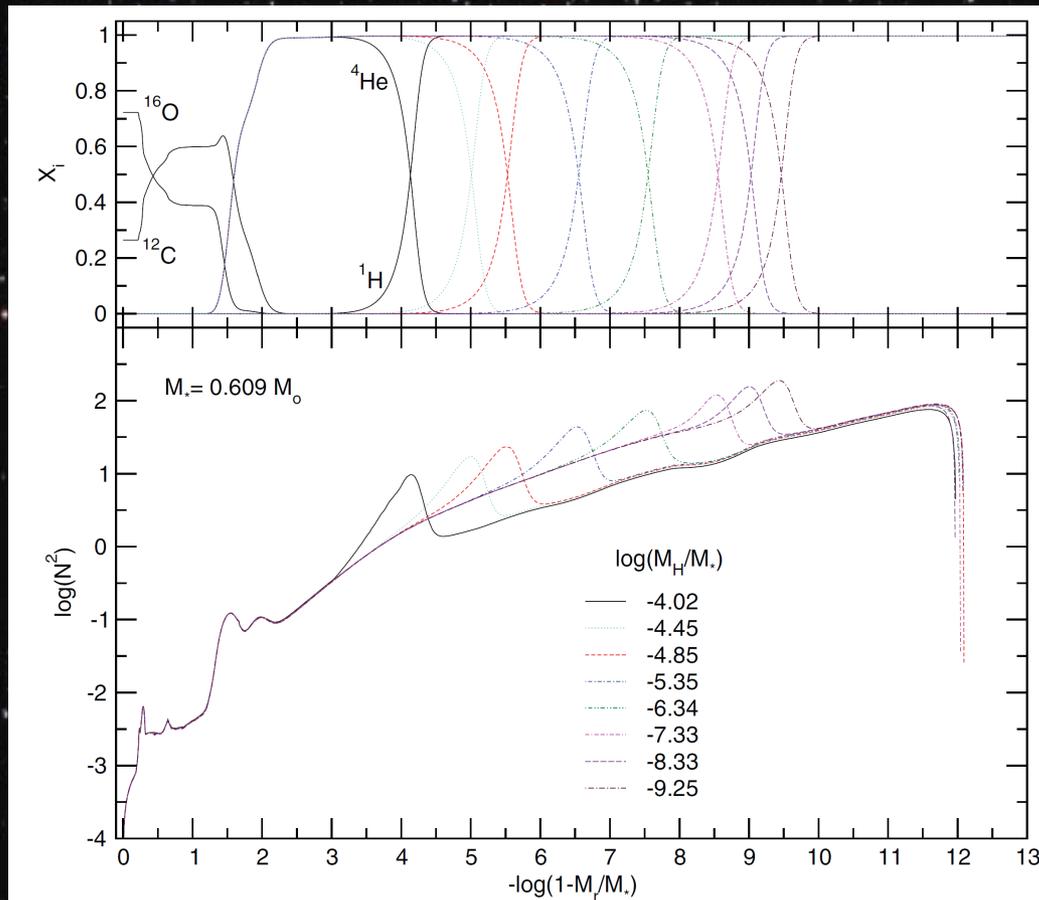


Parámetros libres:  $M_*$ ,  
 $M_{\text{He}}$ ,  $M_{\text{H}}$ ,  $T_{\text{eff}}$ , espesor  
de las transiciones  
químicas, abundancia  
de C/O en el centro, etc,  
etc

# Astrosismología de estrellas ZZ Ceti

Astrosismología de un “ensamble” de estrellas ZZ Ceti con modelos completamente evolutivos (Alejandra Romero 2012, Tesis Doctoral, FCAG-UNLP)

- Secuencias de modelos detallados computados desde la ZAMS
- Único parámetro “libre”: espesor de la envoltura de H ( $M_H$ ), se justifica porque es muy incierto
- Análisis sismológico de 44 estrellas

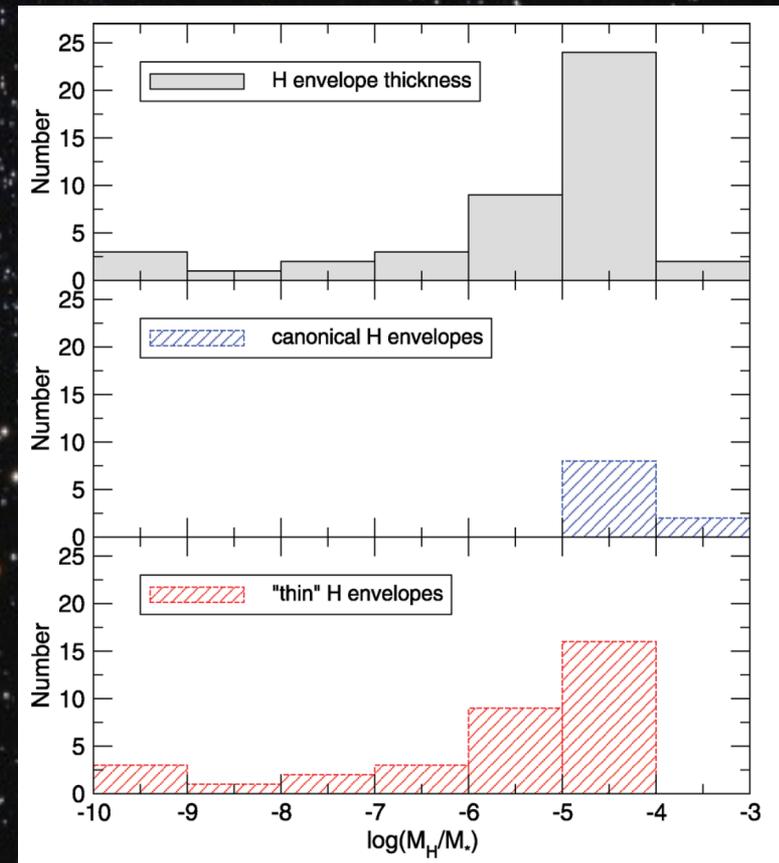
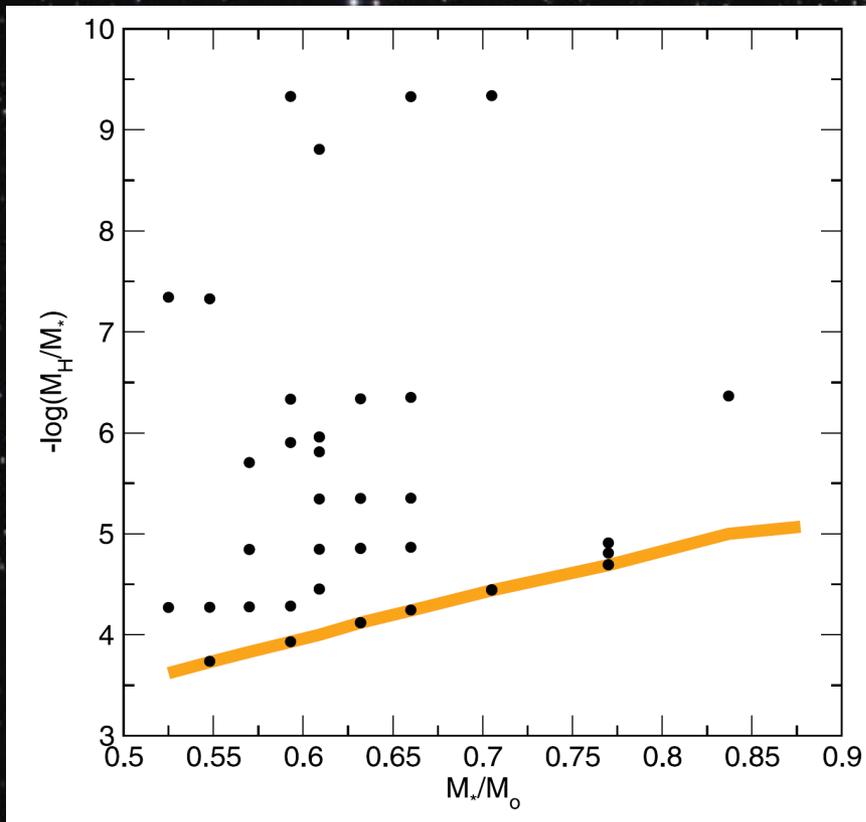


Perfiles químicos consistentes, resultantes de la evolución previa. Impacto en la frecuencia de Brunt-Väisälä, impacto en el espectro de períodos

Romero, Córscico, Althaus et al. 2012, MNRAS, 420, 1462

# Resultados

- La masa astrosismológica media ( $0.636 \pm 0.019 M_{\odot}$ ) en excelente acuerdo con la masa espectroscópica media ( $0.630 \pm 0.028 M_{\odot}$ ), y también con determinaciones de la masa media de enanas blancas DA (Tremblay et al. 2011).
- Rango de espesores de la envoltura de H con un pico en  $\log(M_H/M_*) \sim -4.5$  y otro menos notorio en  $\log(M_H/M_*) \sim -9.5$
- La mayoría de las estrellas analizadas tendrían envolturas de H mas delgadas que las envolturas canónicas predichas por la teoría estándar de evolución de enanas blancas (línea naranja).



# Conclusiones/Consecuencias

- Análisis astrosismológico predice un rango de envolturas en general más delgadas que las envolturas canónicas, constituye un **desafío para los escenarios evolutivos estándar de formación de enanas blancas**. En particular, cinco ZZ Ceti analizadas tienen envolturas MUY delgadas  $10^{-10} \leq M_{\text{H}}/M_{*} \leq 10^{-8}$  (esto es el 11 % de la muestra de DAVs estudiadas). Independientemente, teoría de evolución espectral predice envolturas delgadas (Grupo de Montreal)
- Althaus et al. (2005) exploraron nuevo escenario, estrella de 2.7 Mo en la ZAMS experimenta un LTP (Late Thermal Pulse) poco después de la AGB, que consume la mayor parte del H, y alcanza la etapa de enana blanca ( $M_{\text{WD}} = 0.5885 M_{\odot}$ ) con  $M_{\text{H}} = 1.7 \times 10^{-6} M_{*}$ . Explica **en parte** los resultados astrosismológicos.

# Incertezas/defectos del método

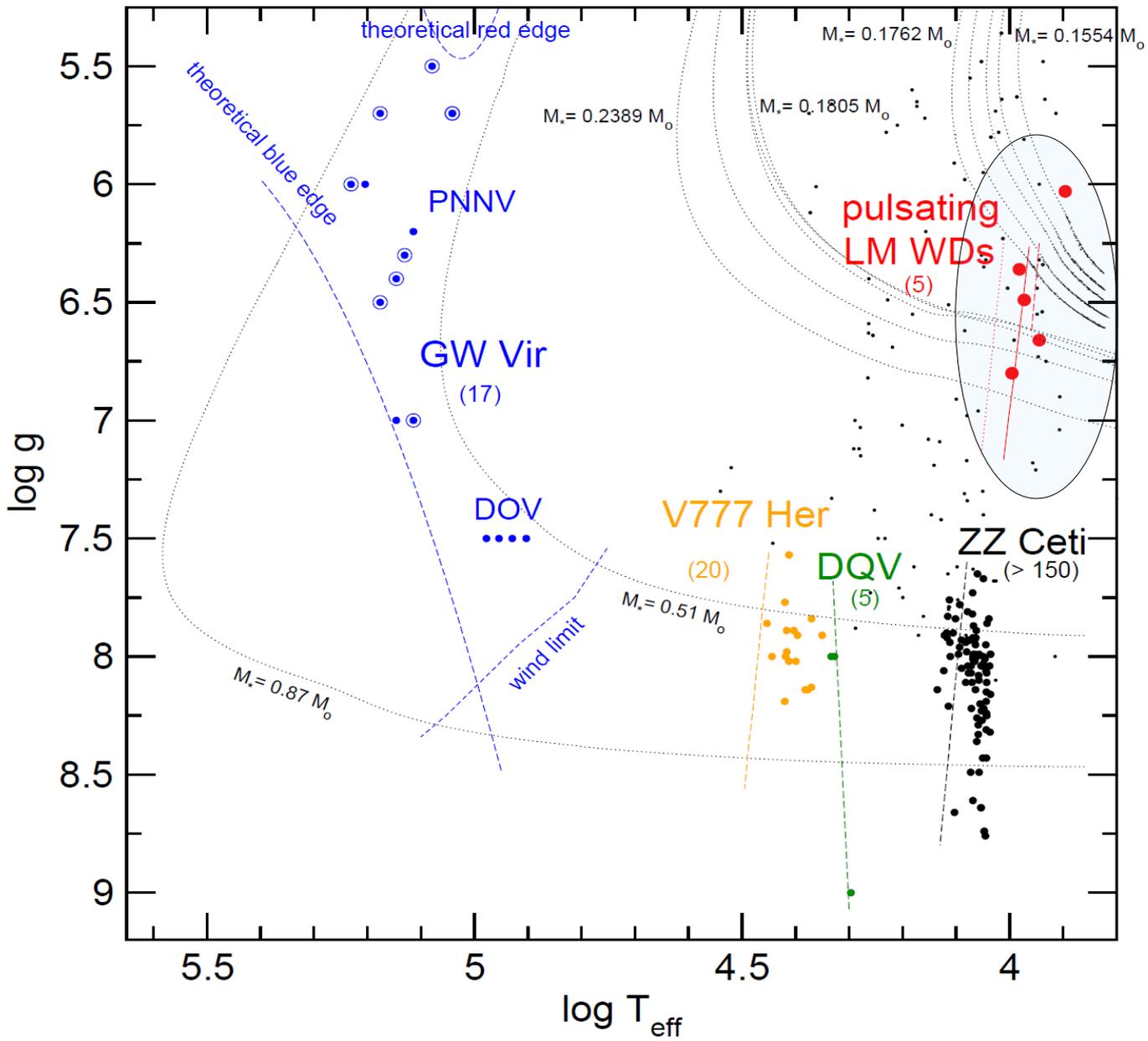
- ★ Grilla demasiado “gruesa” de modelos en  $M_*$  y  $M_H$ , peligro de saltar soluciones sismológicas significativas.
- ★ Tasa de la reacción  $^{12}\text{C}(\alpha,\gamma)^{16}\text{O}$  (incierto)
- ★ Mezcla extra (overshooting, etc) (no se conoce exactamente)
- ★ Eficiencia de la difusión de elementos (podría ser muy diferente a lo asumido)

Francisco De Geronimo (Tesis Doctoral, FCAG-UNLP, en ejecución)

(1) emplear una grilla mucho más fina de modelos, interpolando consistentemente entre las secuencias evolutivas, y

(2) evaluar las incertezas enumeradas adoptando valores extremos, y estimar su impacto sobre los ajustes sismológicos de Romero et al. (2012)

Enanas blancas de baja masa (LM) y  
extremadamente baja masa (ELM)  
variables

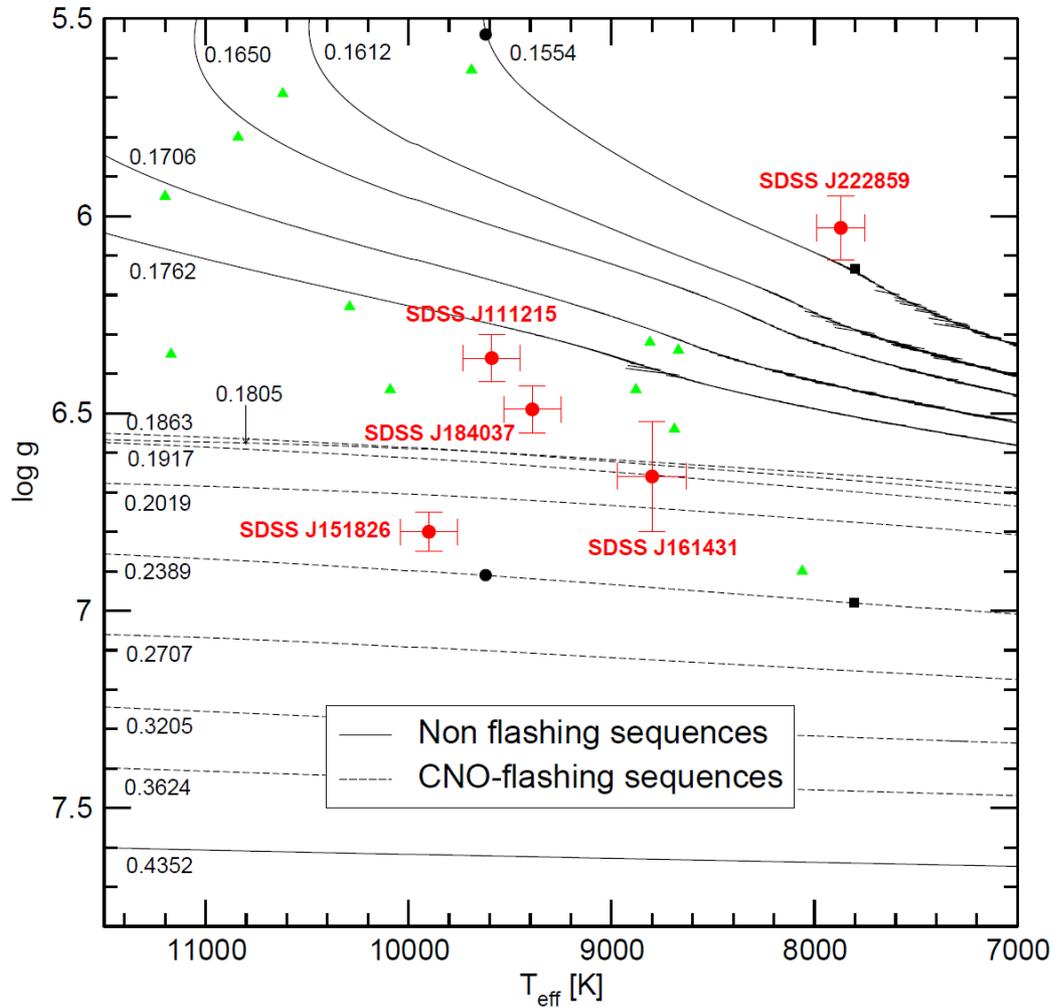


# Enanas blancas de baja masa variables (LMs y ELMs)

- ◆ **LM (Low Mass):**  $M_* \leq 0.45 M_{\text{sun}}$      **ELM (Extremely Low Mass):**  $M_* \leq 0.18-0.20 M_{\text{sun}}$
- ◆ **Origen:** evolución binaria, estrella de baja masa con fuertes pérdidas de masa en la fase de RGB, se evita el flash de He. Núcleos de He (a diferencia de las de masa promedio, C/O)
- ◆ **Dicotomía de espesores** de la envoltura de H: muy gruesas para las ELMs (progenitores no sufren flashes de H), mas delgadas para las LMs con  $M_* \geq 0.18-0.20 M_{\text{sun}}$  (sufren flashes de H)
- ◆ **Quema nuclear** (pp) muy importante en las ELMs lleva a dicotomía de edades: las ELMs evolucionan mucho mas lentamente que las LMs con  $M_* \geq 0.18-0.20 M_{\text{sun}}$  ( $\approx 10^9$  vs  $\approx 10^7$  años)
- ◆ Detectadas a través de varios surveys: **ELM survey, SPY, WASP surveys**
- ◆ **7 objetos pulsantes** (sept. 2014) en modos g: oportunidad de sondear sus interiores
- ◆ **Excitación de modos:** mecanismo  $\kappa$ - $\gamma$  (ionización parcial del H) y mecanismo  $\epsilon$  (quema nuclear del H)

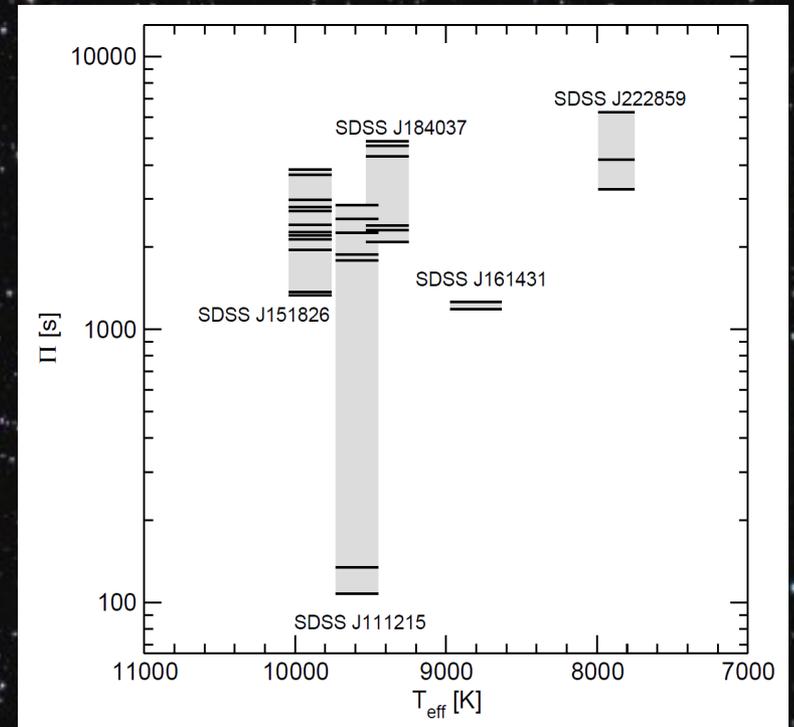
# Enanas blancas de baja masa variables (LMs y ELMs)

Tracks finales



Althaus et al. 2013, A&A, 557, A19

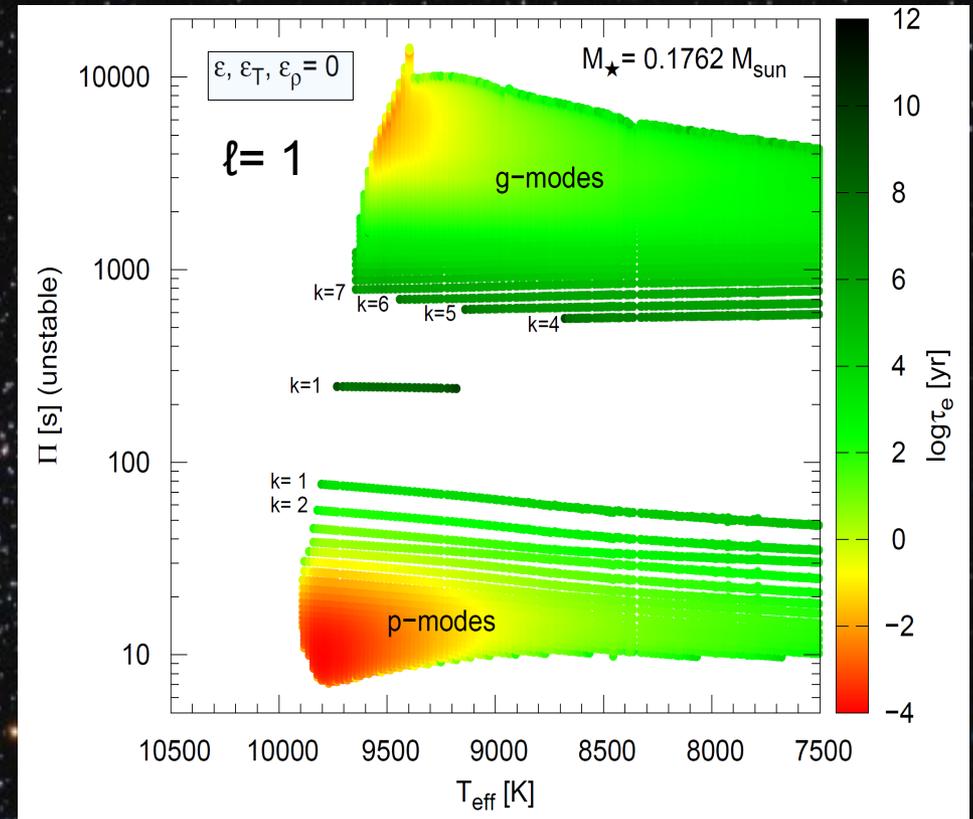
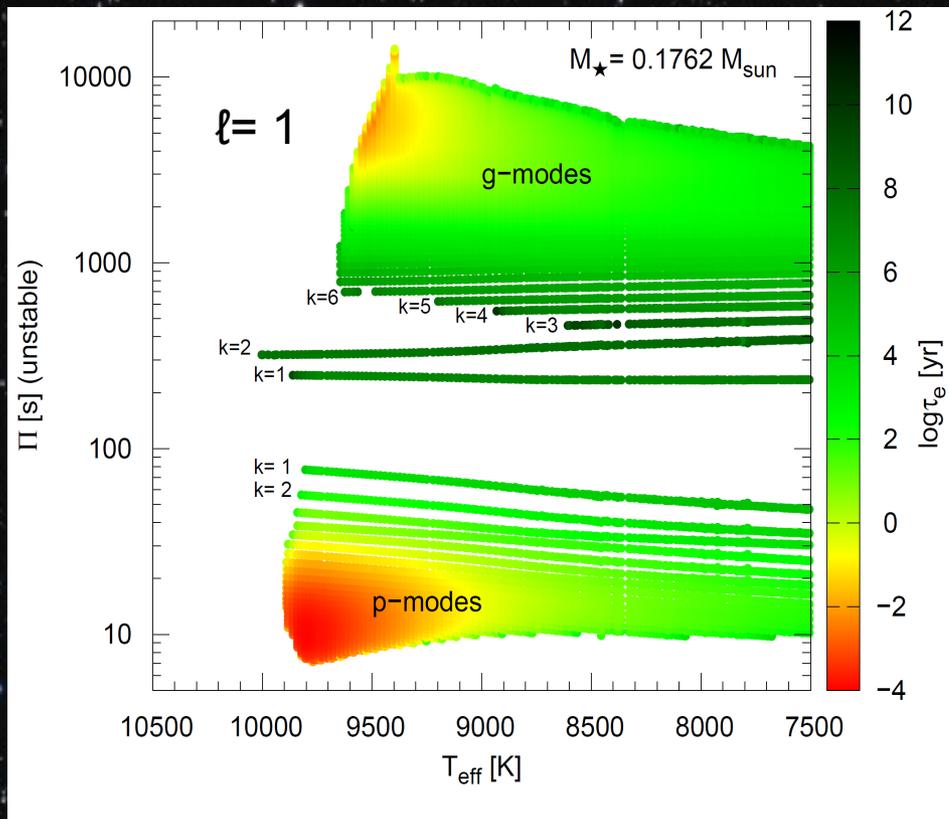
Rangos de períodos observados



Hermes et al. 2013, ApJ, 765, 102

# Enanas blancas de baja masa variables (LMs y ELMs)

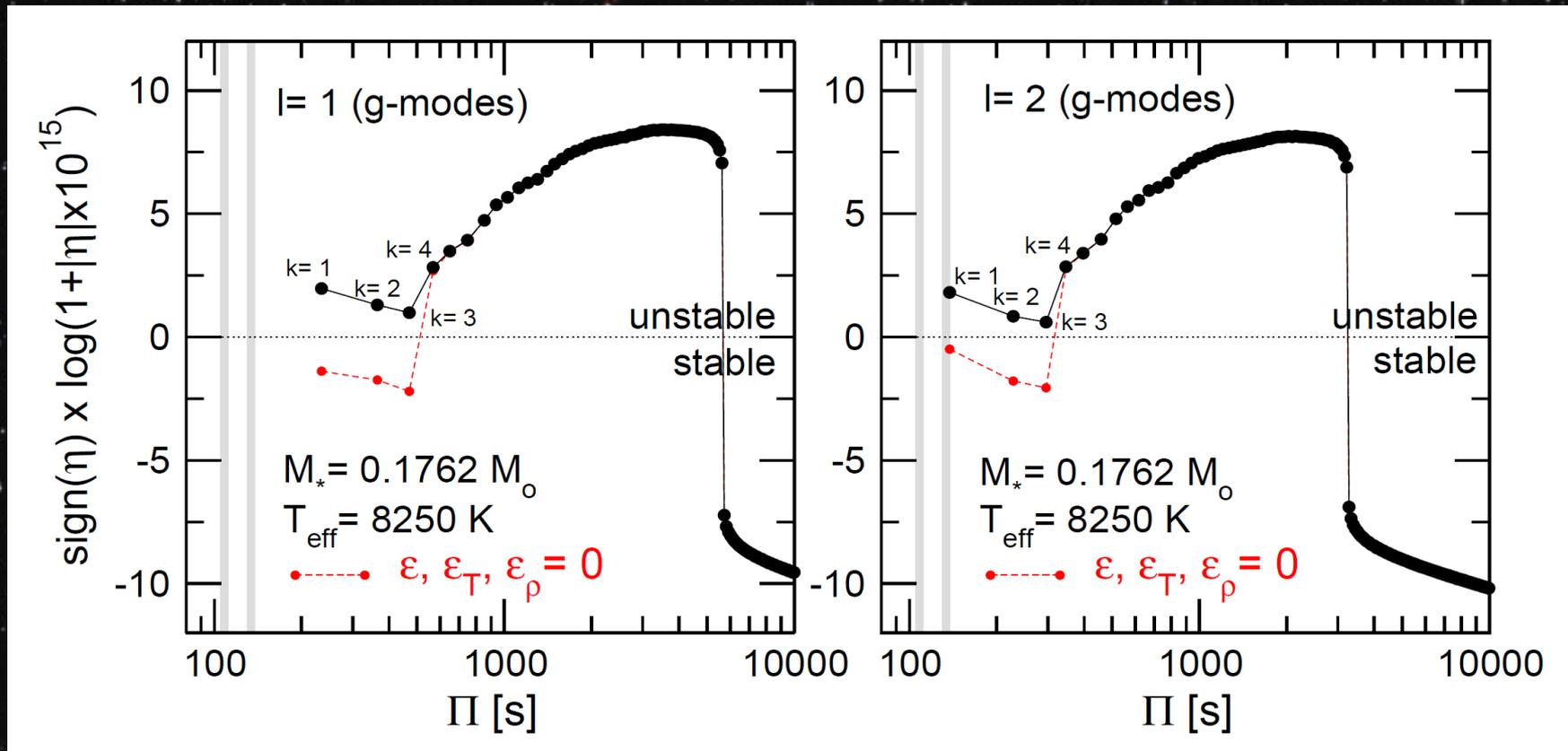
## Excitación de modos y la quema nuclear (“mecanismo epsilon”)



- **Modos g y p** ( $\ell = 1, 2$ ) excitados por el mecanismo  $\kappa$ - $\gamma$  actuando en la región de ionización parcial del H. En todos los casos la escala de tiempo de crecimiento de la amplitud de los modos (*e-folding times*) es entre 10 y 100 veces más corta que la evolutiva
- La mayor excitación (bajos *e-folding times*) se da para temperaturas altas y órdenes radiales altos.
- Cuando se suprime el mecanismo  $\epsilon$  (**derecha**) los **modos g** con  $k = 1, 2, 3$  y  $4$  ya no son inestables (en ciertos rangos de  $T_{\text{eff}}$ ) y no aparecen en el plot. Estos son **modos desestabilizados por el mecanismo  $\epsilon$**  debido a la quema estable del H.

# Enanas blancas de baja masa variables (LMs y ELMs)

Excitación de modos y la quema nuclear (mecanismo epsilon)



- ELM SDSS J111215.82+111745 exhibe dos períodos muy cortos: 108 s y 134 s (líneas grises).
- Para  $l=2$  el modo g con  $k=1$  reproduce el período observado de 134 s. **Modo excitado por el mecanismo  $\epsilon$**
- **¿Primera demostración de la existencia de quema nuclear en una enana blanca fría?**  
Es necesario confirmar la realidad de ese período (re-observar la estrella, J. J. Hermes, comunicación privada)

# Grupo de Evolución Estelar y Pulsaciones (FCAG-UNLP)

- **Leandro G. Althaus** (Investigador de CONICET)
- **Alejandro H. Córscico** (Investigador de CONICET)
- **Marcelo M. Miller Bertolami** (Investigador de CONICET, Becario Von Humboldt, Alemania)
- **Felipe C. Wachlin** (Investigador de CONICET)
- **Alejandra D. Romero** (Postdoc, Brasil)
- **Francisco De Gerónimo** (Becario Doctoral de CONICET)
- **Brenda Meléndez** (Becaria Doctoral de CONICET)
- **Julieta P. Sánchez Arias** (Becaria Doctoral de CONICET)
- **María Camisassa** (Becaria Doctoral de CONICET)
- **Leila Calcaferro** (Estudiante de grado FCAG, Becaria CIN)
- **Tiara Battich** (Estudiante de grado FCAG)
- **Mariela Corti** (Investigadora de CONICET)



*A la memoria  
de Josefa Pérez*



# Excitación de las pulsaciones

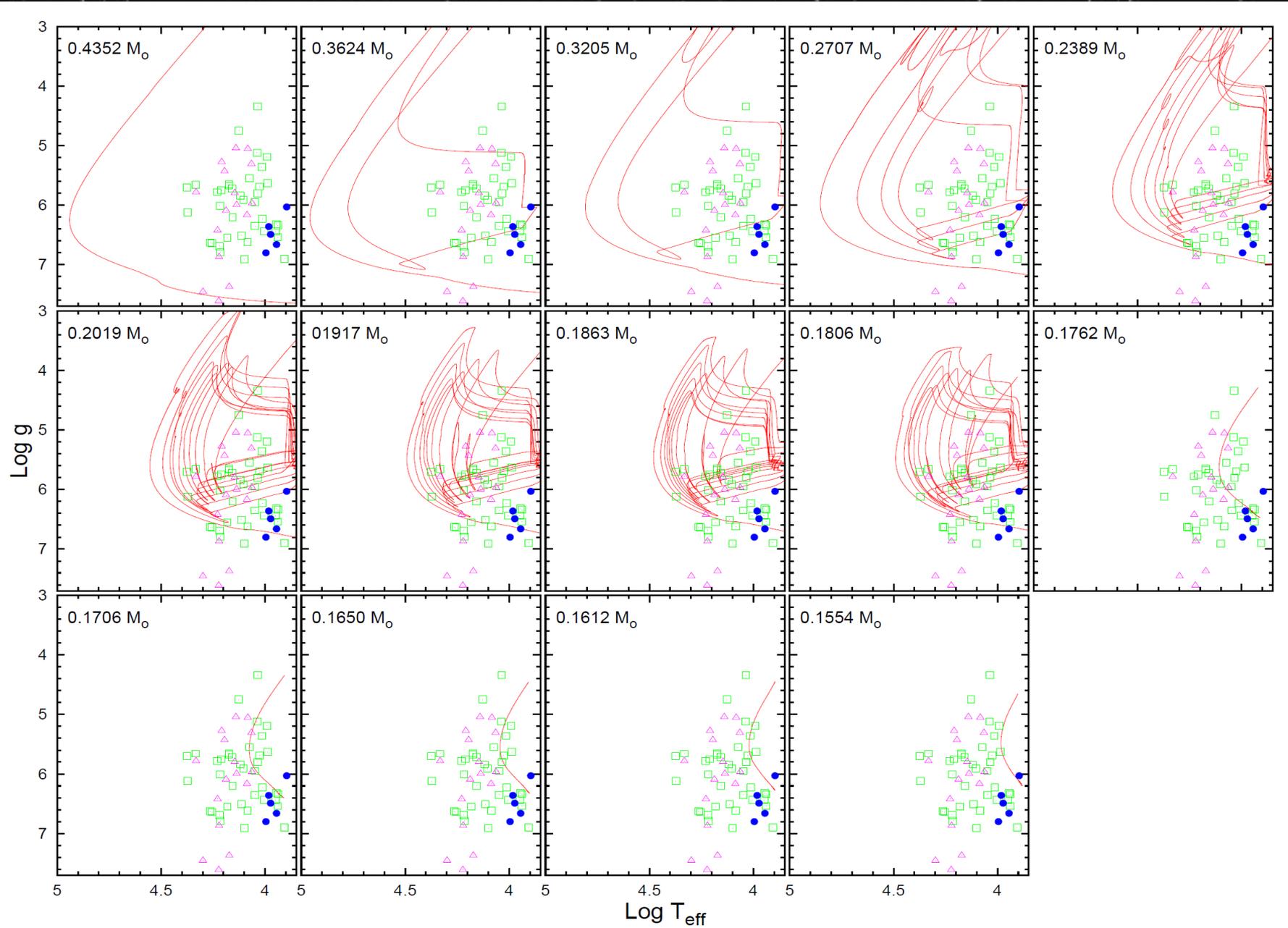
## Procesos térmicos → pulsaciones *autoexcitadas*

- **Mecanismo  $\kappa$ - $\gamma$ :** actúa en regiones de ionización parcial de la especie química mayoritaria: DAVs y ELMs (HI/HII), DBVs (HeI/HeII) en el borde azul de la banda de inestabilidad; GW Vir (C/O)
- **Mecanismo convectivo:** DAVs, DBVs, ELMVs cuando la zona convectiva externa se ha profundizado
- **Mecanismo  $\varepsilon$ :** períodos cortos de ELMs por quema nuclear de H (?)

## Procesos dinámicos → pulsaciones *forzadas*

- Excitación estocástica por convección turbulenta: modos intrínsecamente estables, pero excitados por movimientos convectivos: Sol, variables tipo solar, gigantes rojas variables
- Fuerzas de marea en sistemas binarios

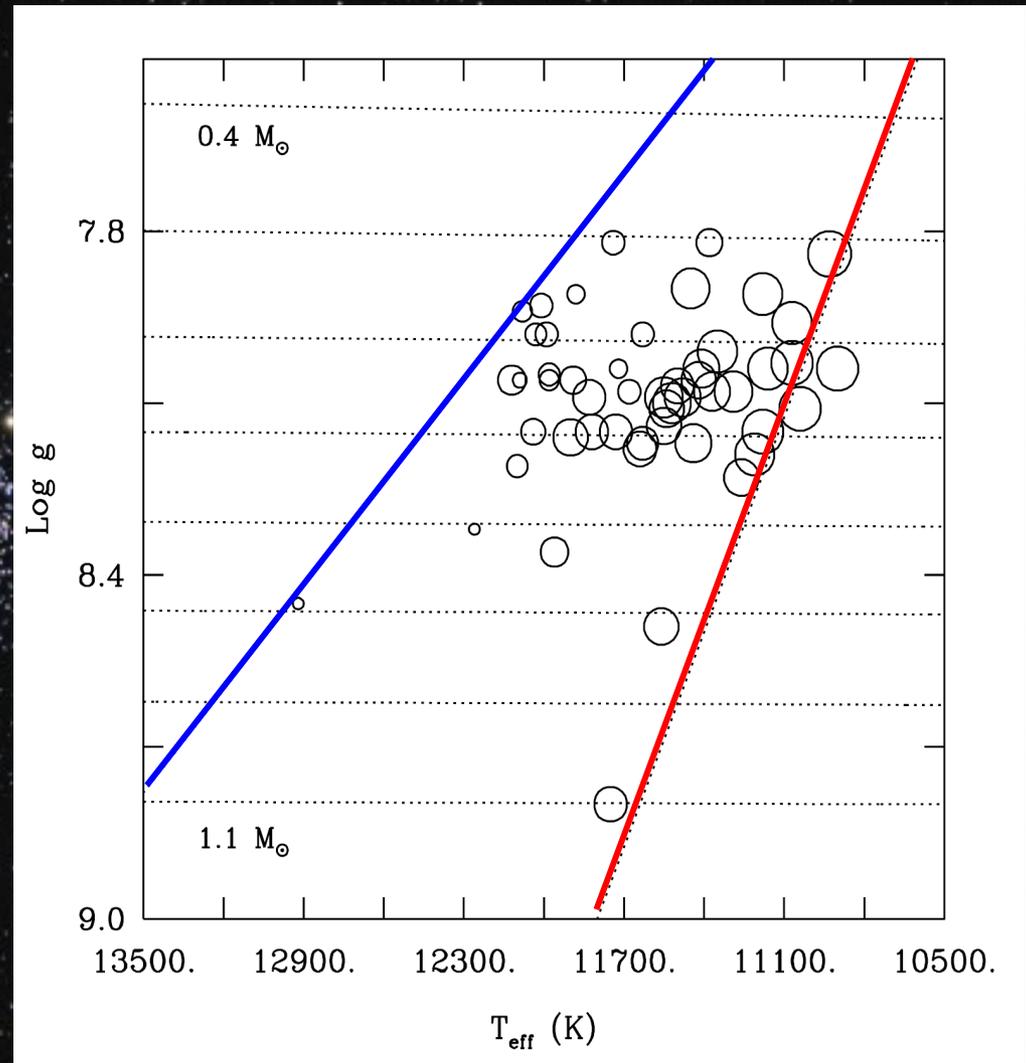
# Enanas blancas de baja masa variables (LMs y ELMs)



# Estrellas ZZ Ceti

## Caracterización de la banda de inestabilidad

- **Las mas calientes:** pocos períodos, **cortos**, baja amplitud, curvas de luz sinusoidales y estables
- **Las mas frías:** muchos períodos, **largos**, gran amplitud, curvas de luz no sinusoidales, inestables, presencia de combinaciones lineales y armónicos de modos propios
- **Correlación clara entre períodos y temperatura efectiva**
- **Correlación (mas débil) entre períodos y gravedad**



# Cotas a propiedades de partículas elementales, variación de constantes fundamentales

- Enanas blancas tienen **evolución muy lenta** ( $10^9$ - $10^{10}$  años)
- Cualquier efecto de enfriamiento extra llegaría a ser medible (acumulación)
- Escala de tiempo de enfriamiento es proporcional a la inversa de la tasa de cambio de períodos de pulsación ( $\sim 10^{-15}$  s/s en ZZ Cetus,  $\sim 10^{-13}$  s/s en V777 Her)
- Utilizar modelos sismológicos de estrellas que tienen tasas de cambio de períodos medidos (G117-B15A, R548, PG 1351+489)
- Períodos insensibles al enfriamiento extra, pero tasa de cambio de períodos ***extremadamente sensibles***

Posibles fuentes no estandar de enfriamiento extra:

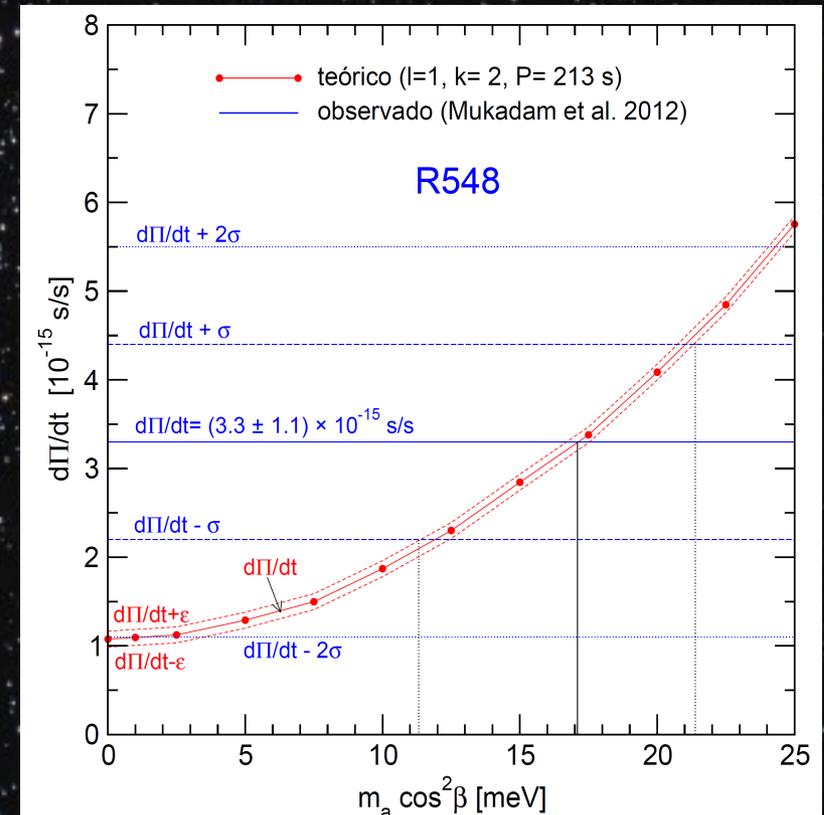
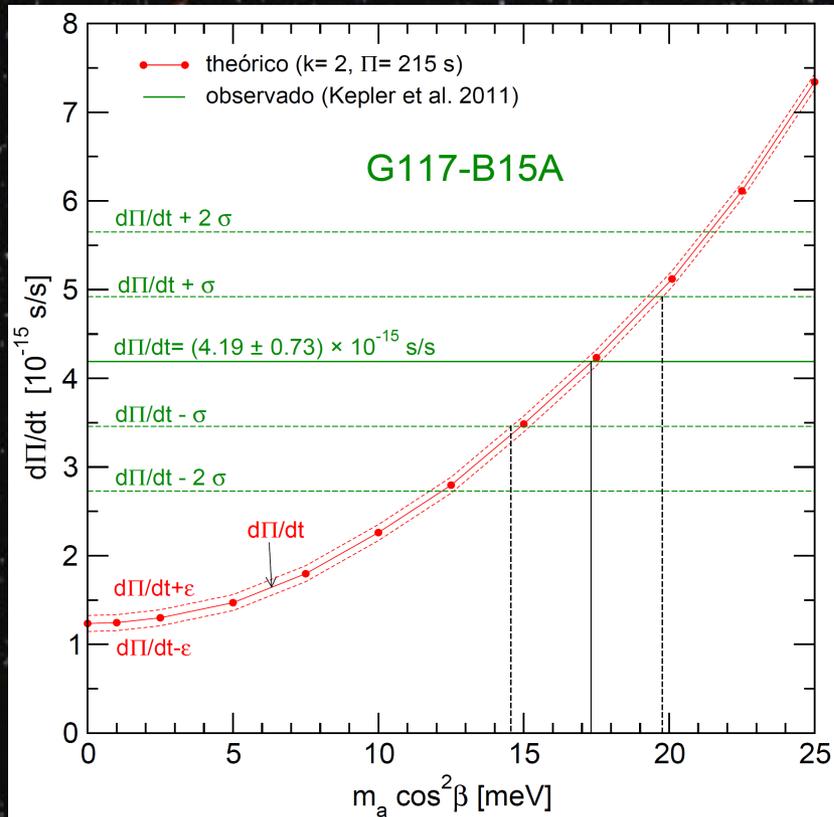
- Emisión de ***axiones*** ( $m_a$ )
- Variación de la cte gravitatoria,  $dG/dt$
- Emisión anómala de neutrinos, momento dipolar magnético  $\mu_\nu$

# Axiones

- **Axiones:** partículas elementales (*aún hipotéticas!*) predichas hace mas de 35 años para resolver el “strong CP problem”: ausencia de una violación de la simetría carga-paridad en interacciones fuertes (Peccei & Quinn 1977, Weinberg 1978; Wilczek 1978).
- Si existen, la masa de los axiones (que *no es predicha* por la teoría) debe ser muy baja.
- Podrían ser parte de la **materia oscura** del Universo (Raffelt 2007)
- Diferentes modelos de axiones. En el **modelo DFSZ** (Dine et al. 1981; Zhimitskii 1980), los axiones, se acoplan con electrones.
- Se supone que en el núcleo de las enanas blancas hay emisión de axiones a través del efecto Compton, aniquilación de pares y **procesos bremsstrahlung**. Estos últimos los mas relevantes.
- **La emisión de axiones acelera el enfriamiento, dando lugar a mayores tasas de cambio de períodos de oscilación**

# Cotas a la masa del axion

- DAVs G117-B15A:  $dP/dt = (4.2 \pm 0.5) \times 10^{-15} \text{ s/s}$  (Kepler 2009, 35 años de obs.)
- R 548:  $dP/dt = (3.3 \pm 1.1) \times 10^{-15} \text{ s/s}$  (Mukadam et al. 2013, 40 años de obs.)
- $m_a \sim 17 \text{ meV}$ , límite superior  $\sim 22 \text{ meV}$  (1 meV =  $10^{-3} \text{ eV}$ )
- Estrellas muy similares en cuanto a estructura y pulsaciones



# Cotas a la masa del axion

## PROBLEMAS:

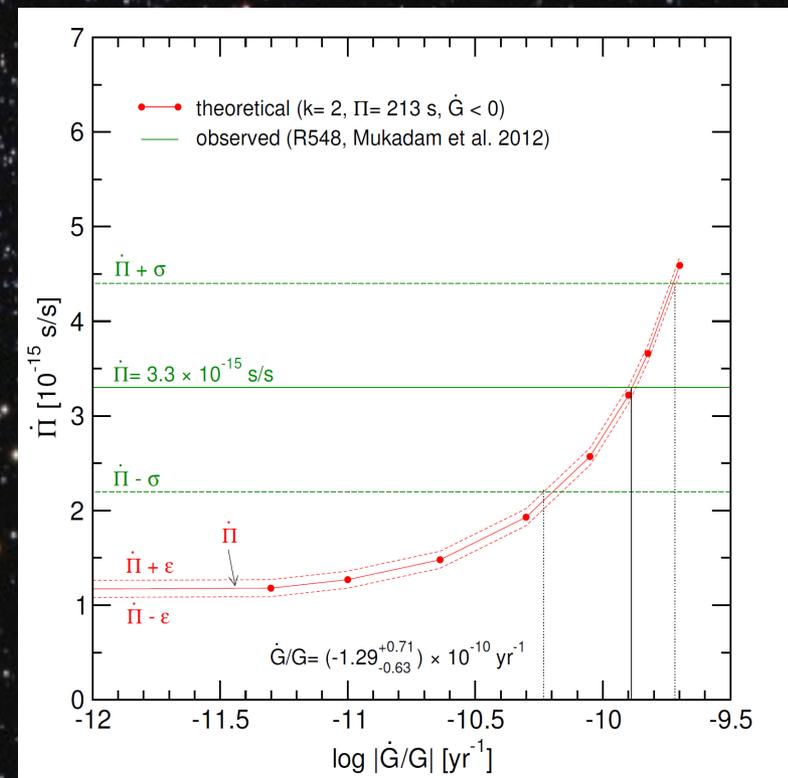
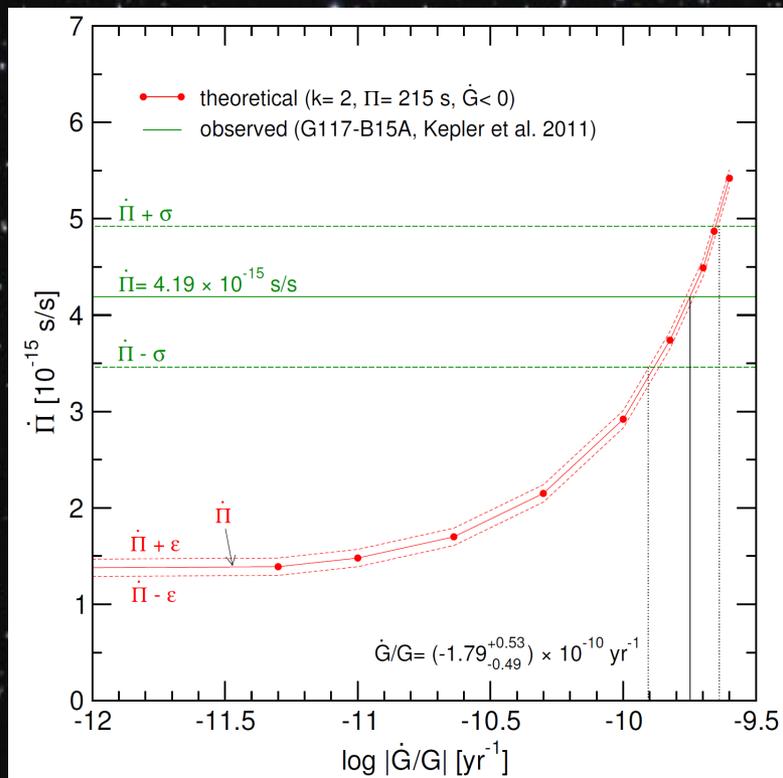
- La masa del axion derivada con astrosismología es mas de 4 veces mayor que la que se deriva a través del método de la WDLF!
- La derivación astrosismológica se basa en el hecho de que el modo principal de pulsación para ambas estrellas es un modo “atrapado” en la envoltura de H (al menos en los modelos!)
- La cota se basa en solo 2 objetos, que además son muy similares en cuanto a estructura y pulsaciones

## Salidas posibles:

- Estudiar otras estrellas ZZ Ceti, con diferente masas y temperaturas efectivas, por ejemplo L19-2 (mas masiva y caliente) para poner sobre base mas firme las cotas inferidas
- Estudiar otra clase de enanas blancas pulsantes. Por ejemplo la DBV PG1351+489 (Tiara Battich, Tesis de Lic. FCAG-UNLP)
- Algo en los modelos puede estar mal. Explorar eficiencia de la difusión y chequear el modo atrapado, incorporar difusión del Ne, etc

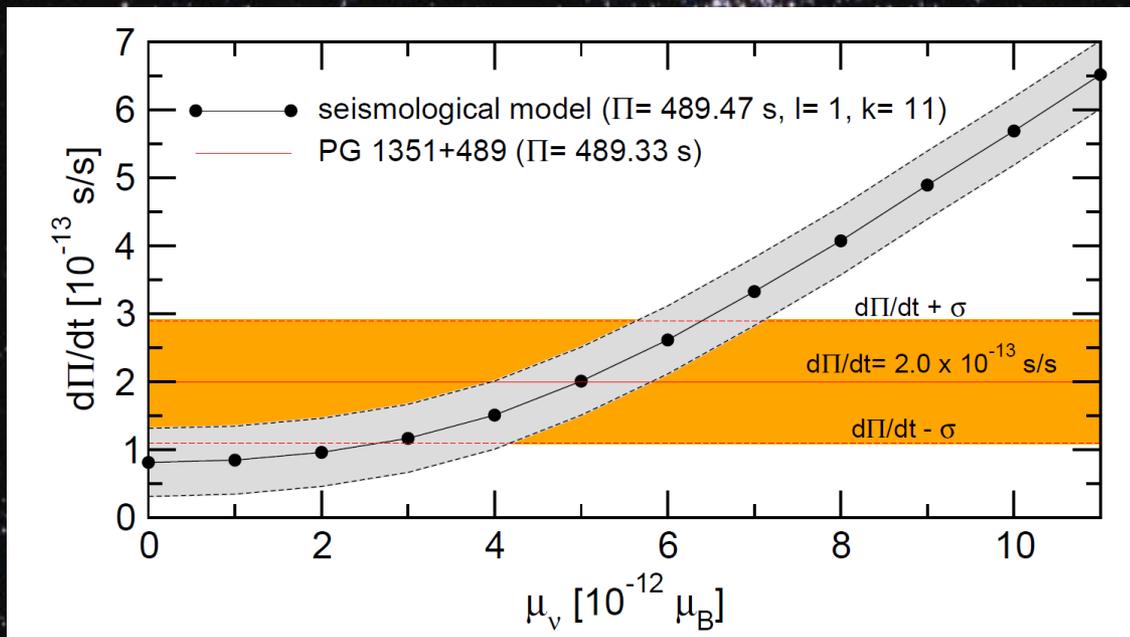
# Variación de G

- La Relatividad General asume que la constante gravitacional G es universal y genuinamente CONSTANTE. Sin embargo, algunas teorías modernas de Gran Unificación predicen que G es una función levemente variable con el tiempo (Loren-Aguilar et al. 2003, Uzan et al. 2003).
- Enanas blancas, dada su lenta evolución, son objetos ideales para testear la no constancia de G a través de la tasa de cambios de períodos.



# Momento dipolar magnético del neutrino

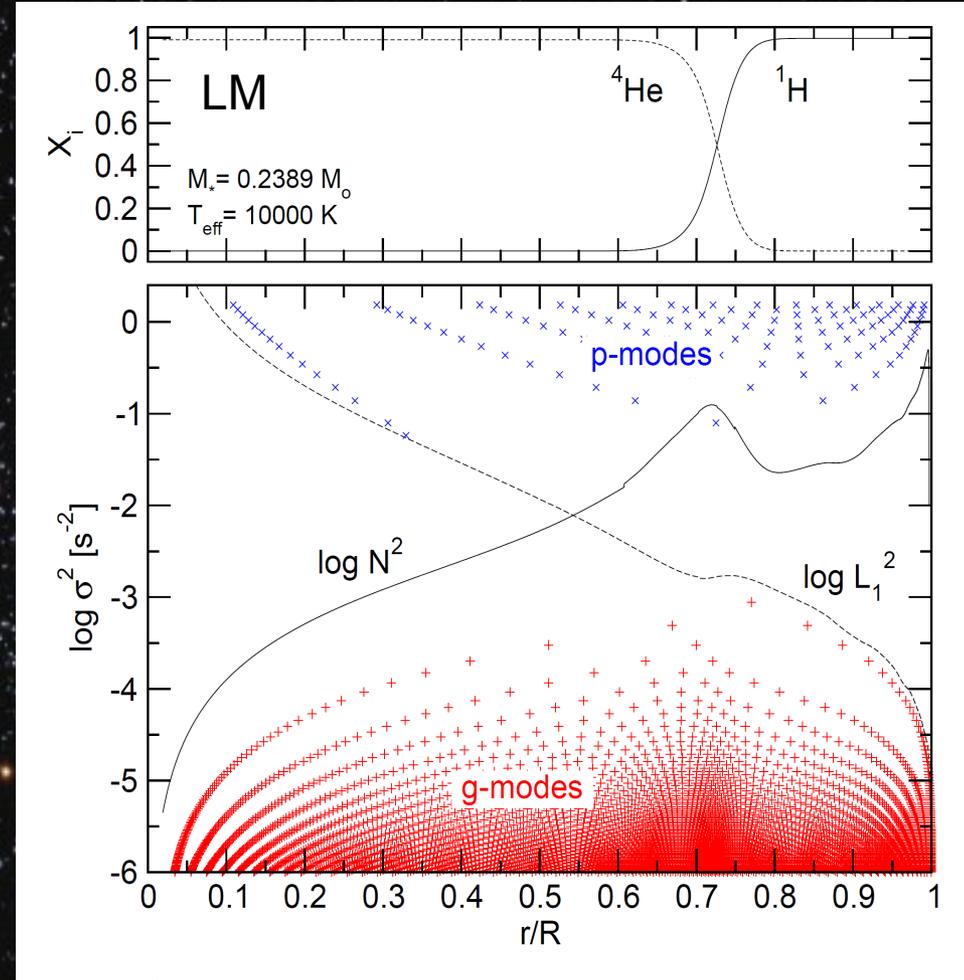
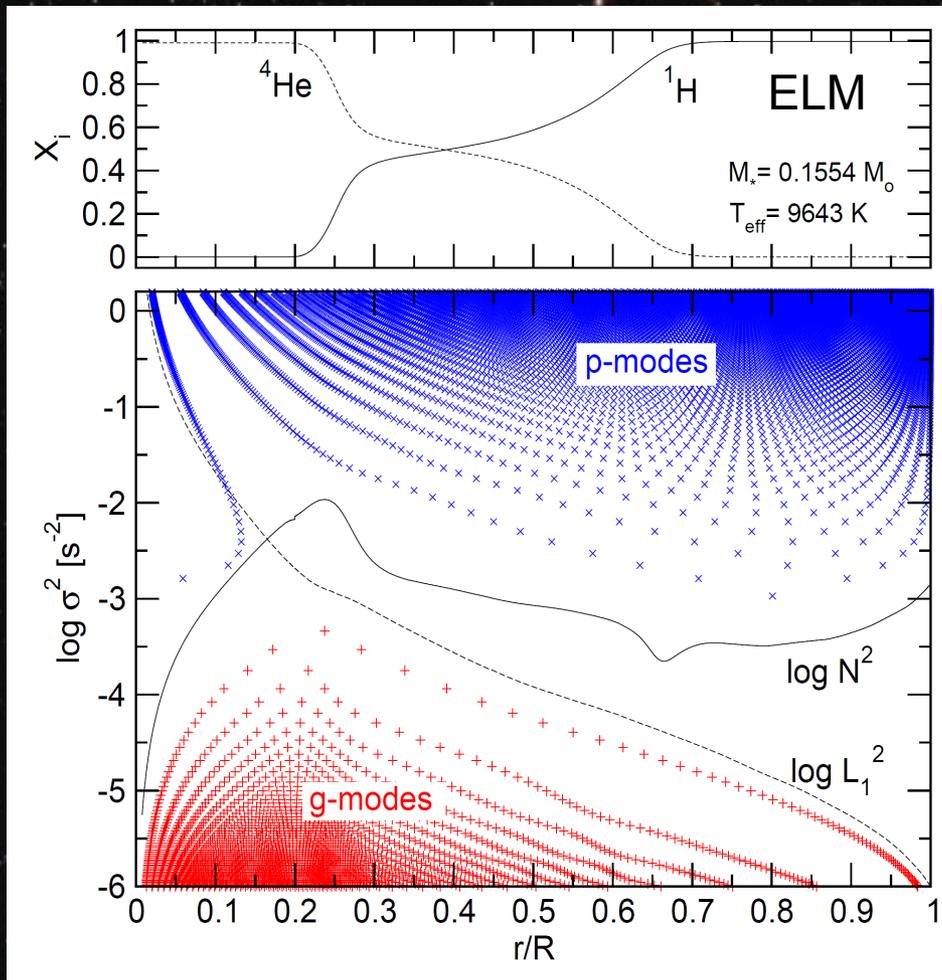
- En el Modelo Estandar de la física de partículas los neutrinos no tienen masa, carga eléctrica, ni momento dipolar magnético.
- En el marco de teorías que van mas allá del Modelo Estandar, los neutrinos pueden tener momento magnético, con lo cual pueden acoplarse al campo electromagnético, y como resultado la emisión de neutrinos se intensifica.
- En pre-enanas blancas y enanas blancas calientes hay emisión de neutrinos plasma (procesos de scattering). Si hay un momento magnético no nulo, la emisión es mayor (*emisión anómala*) y eso debe acelerar el enfriamiento, con lo cual aumenta la tasa de cambio de períodos.



$$\mu_\nu \leq 7 \times 10^{-12} \mu_B$$

# Enanas blancas de baja masa variables (LMs y ELMs)

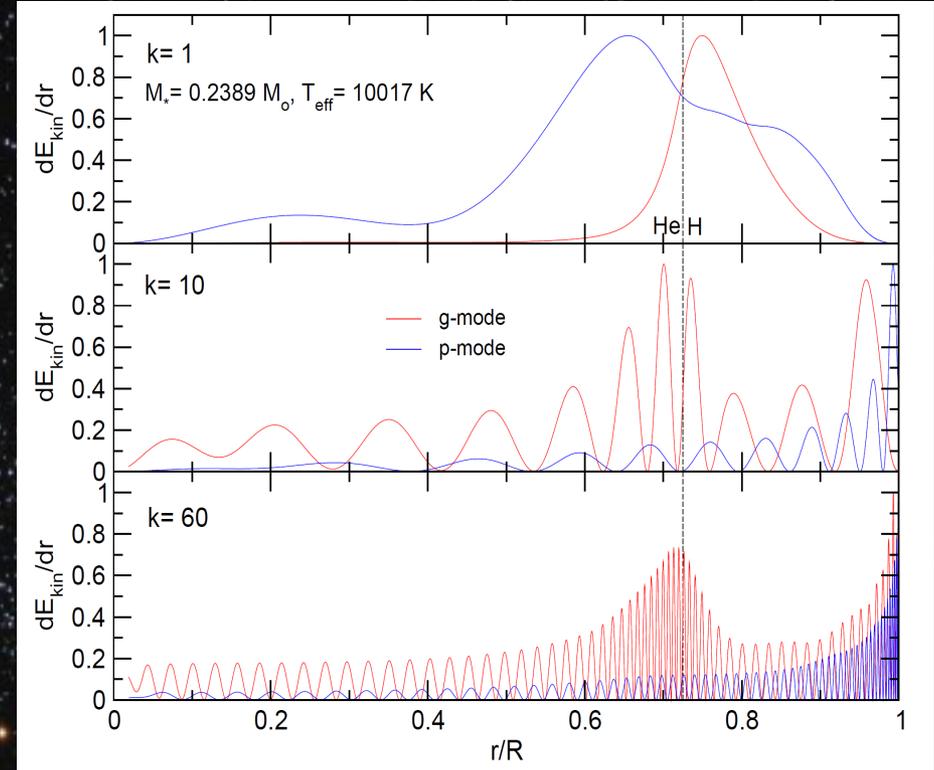
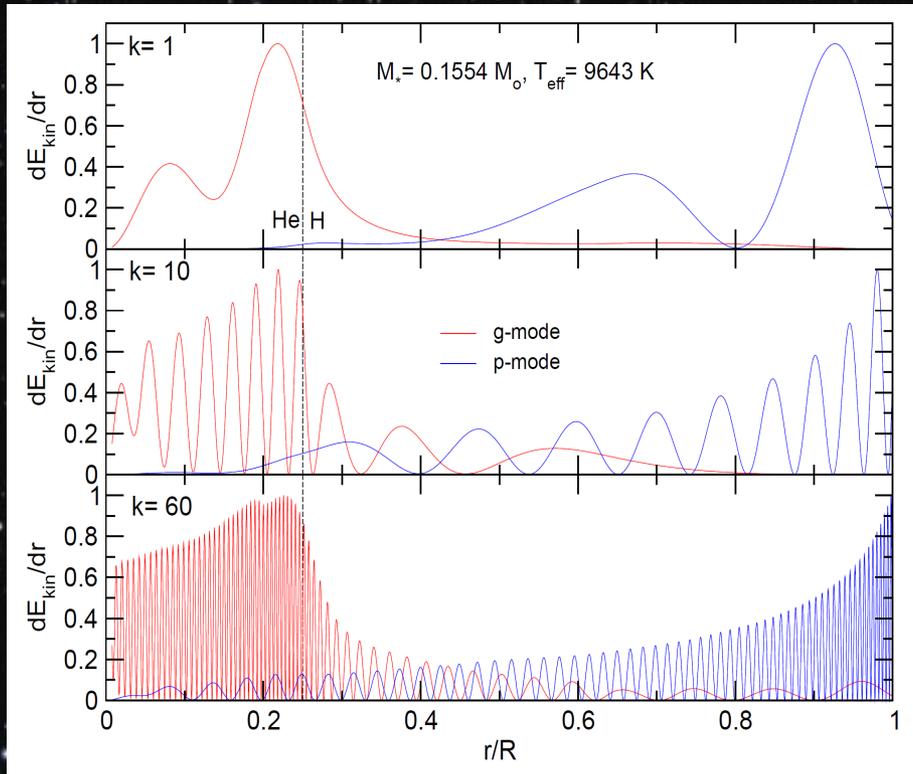
Perfiles químicos y diagramas de propagación de modelos representativos



- Modelos ELM y LM tienen estructuras químicas muy diferentes. Modelo ELM tiene envoltura de H mas gruesa
  - Frecuencia de BV del modelo ELM es mayor en el núcleo (por baja degeneración) que en la envoltura.
- Modos g sondan la region del núcleo, al revés que en las LMs (y las ZZ Ceti).**

# Enanas blancas de baja masa variables (LMs y ELMs)

## Densidad de energía cinética de los modos



- Las oscilaciones espaciales de los **modos g** están restringidas a las regiones del núcleo, debajo de la interface He/H, aún para modos de alto orden radial
- Los **modos p** oscilan preferentemente en las zonas externas

- Los **modos g** oscilan en toda la estructura estelar, aunque hay una marcada concentración de energía cinética en la interface He/H. Modos g son muy sensibles a este gradiente de composición. **Potencial diagnóstico del espesor de la envoltura de H.**
- Los **modos p** son insensibles a la interface He/H.

# Enanas blancas: características básicas

## Electrones degenerados (gas de Fermiones):

- Transporte de energía por conducción (núcleo isotérmico)
- Contracción gravitacional despreciable

## Iones no-degenerados (gas ideal):

- Almacenan energía térmica (reliquia del pasado nuclear de la estrella)

Energía nuclear  
(en general) irrelevante

## EVOLUCION

- (a 1er orden)  $\approx$  problema de

## ENFRIAMIENTO

(Mestel 1965)

Edades de enfriamiento típicas en las enanas blancas mas débiles

( $L \sim 10^{-4.5} L_{\odot}$ )  $\tau \sim 10^{10}$  años

# Teoría lineal (cont.)

- **Separación de variables:**  $f'(r, \theta, \phi, t) = f'(r)Y_\ell^m(\theta, \phi)e^{i\sigma t}$
- **Desplazamiento Lagrangiano** (modos esferoidales) del fluido:

$$\vec{\xi}(r, \theta, \phi, t) = \delta\vec{r} = \left[ \xi_r(r)\check{e}_r + \xi_\theta(r)\frac{\partial}{\partial\theta}\check{e}_\theta + \xi_\phi(r)\frac{1}{\sin\theta}\frac{\partial}{\partial\phi}\check{e}_\phi \right] Y_\ell^m(\theta, \phi)e^{i\sigma t}$$

- **Ecuaciones diferenciales** resultantes, caso **ADIABATICO** ( $\delta S = 0$ )

✓ Junto con condiciones de borde para el centro y la superficie: **problema diferencial de autovalores de cuarto orden**

✓ Ecuaciones **lineales** en las **autofunciones**, pero **alineales** en el **autovalor**

✓ **Solución analítica** únicamente esfera homogénea compresible.

$$\frac{1}{r^2} \frac{d(r^2 \xi_r)}{dr} - \frac{g}{c_s^2} \xi_r + \left(1 - \frac{L_\ell^2}{\sigma^2}\right) \frac{p'}{\rho c_s^2} = \frac{\ell(\ell+1)}{\sigma^2 r^2} \Phi',$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{dp'}{dr} + \frac{g}{\rho c_s^2} p' + (N^2 - \sigma^2) \xi_r = -\frac{d\Phi'}{dr},$$

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left( r^2 \frac{d\Phi'}{dr} \right) - \frac{\ell(\ell+1)}{r^2} \Phi' = 4\pi G \rho \left( \frac{p'}{\rho c_s^2} + \frac{N^2}{g} \xi_r \right)$$

✓ Ecuaciones diferenciales **homogéneas**: solución por una constante también es solución. No proporcionan la amplitud **absoluta** de las pulsaciones!

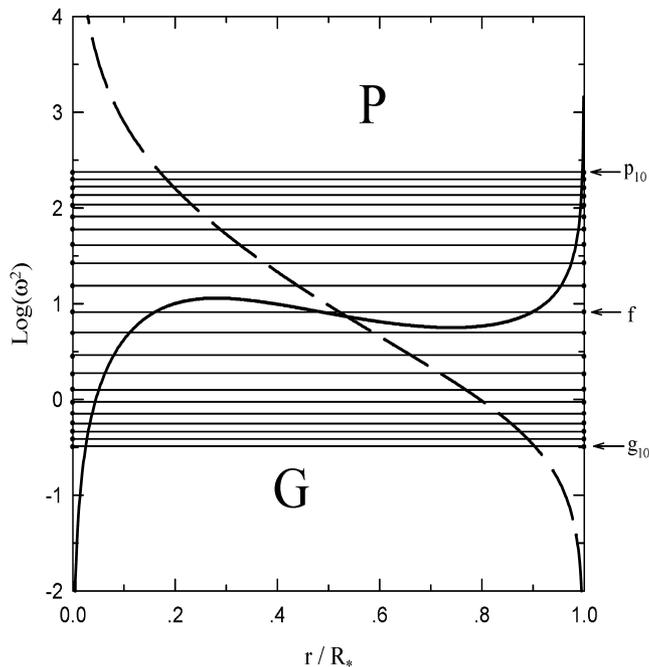
# Relación de dispersión: frecuencias críticas

- Aproximación de Cowling:  $\Phi'(r) = 0$
- Análisis local: coeficientes de las ecuaciones diferenciales lentamente variables en comparación con las autofunciones  $(k \gg 1)$
- Soluciones de la forma  $\exp(ik_r t)$
- **Relación de dispersión local.**

$$k_r^2 = \frac{1}{\sigma^2 c_s^2} (\sigma^2 - L_\ell^2) (\sigma^2 - N^2)$$

$$N^2 = g \left( \frac{1}{\Gamma_1} \frac{d \ln p}{dr} - \frac{d \ln \rho}{dr} \right)$$

$$L_\ell^2 = \frac{\ell(\ell + 1)}{r^2} c_s^2$$



$\sigma^2 > L_\ell^2, N^2$  ó  $\sigma^2 < L_\ell^2, N^2 \rightarrow k_r^2 > 0 \rightarrow k_r$  es real  
 Ondas que se propagan y reflejan. Regiones de propagación P y G.

$L_\ell^2 < \sigma^2 < N^2$  ó  $L_\ell^2 > \sigma^2 > N^2 \rightarrow k_r^2 < 0 \rightarrow k_r$  es imaginario puro  
 Ondas evanescentes. Regiones evanescentes (amplitud decreciente espacialmente)

# Comportamiento asintótico para

$$k \gg 1$$

Caracteriza a las familias de modos en los límites de alta frecuencia (modos p) y baja frecuencia (modos g)

- **Modos p:** espaciamiento asintótico de **frecuencias** independiente de  $k$   
 $\ell$  Sólo función del perfil de velocidad del sonido:

$$\Delta\sigma = \sigma_{k+1,\ell} - \sigma_{k,\ell} = \pi \left[ \int_0^{R_*} \frac{1}{c_s(r)} dr \right]^{-1} = \text{CONSTANTE}$$

- **Modos g:** espaciamiento asintótico de **períodos** independiente de  $k$   
pero dependiente de  $\ell$ . Sólo función del perfil de la frecuencia de Brunt-Väisälä:

$$\Delta P_\ell = P_{k+1,\ell} - P_{k,\ell} = \frac{2\pi^2}{\sqrt{\ell(\ell+1)}} \left[ \int_0^{R_*} \frac{N(r)}{r} dr \right]^{-1} = \text{CONSTANTE}$$

# ASPECTOS OBSERVACIONALES

## (2) Identificación del grado armónico de los modos

### METODO 1

- **Espaciamiento de períodos consecutivos** (depende del grado armónico, comparación con modelos)
- **Splitting rotacional** (separación depende del grado armónico)

PG1159-035 (Winget et al. 1991), PG2131+066 (Kawaler et al. 1995), y GD 358 (Winget et al. 1994). **Efectivo sólo cuando hay muchos modos del mismo grado armónico detectados, modelo-dependiente.**

### METODO 2 (Robinson et al. 1995) (*modelo-independiente*)

Amplitud de las pulsaciones en el UV depende del grado armónico. Porqué? el oscurecimiento al limbo reduce la cancelación geométrica para modos con grados mayores. En el óptico el efecto de la cancelación geométrica es mucho menor. **Metodo efectivo aún cuando hay muy pocos modos detectados**

Hasta ahora, solo se han detectado modos con  $l = 1$  o  $2$

# Mecanismos de excitación de modos

## (1) Mecanismo $\kappa$ - $\gamma$ (desprecia convección o “frozen convection”):

Pequeña perturbación del material estelar:

$$\Pi \ll \tau_{\text{conv}}$$

- En condiciones normales (**material completamente ionizado o neutro**), durante la compresión aumenta la temperatura, la opacidad disminuye, y la radiación escapa sin obstáculos. Perturbación se amortigua. **Estabilidad.**
- **Ionización parcial:** durante la compresión aumenta el número de iones (temperatura no aumenta considerablemente), radiación se almacena como energía de ionización (**mecanismo  $\gamma$** ). También, ionización parcial produce gradiente en la opacidad (**mecanismo  $\kappa$** ) y bloquea flujo de radiación. En la expansión: la recombinación + liberación de energía bloqueada. Perturbación crece. **Inestabilidad.**

$$\frac{d}{dr} \left( \kappa_T + \frac{\kappa_\rho}{\Gamma_3 - 1} \right) > 0$$

- **Condición:** El flujo de energía debe estar modulado con un período similar al período del modo propio. O sea, la escala de tiempo térmica en la región de excitación debe ser del orden del período de oscilación. (ver clemens)

$$\frac{C_v T (\Delta m)_{\text{tr}}}{L} \approx \Pi$$

# Mecanismos de excitación de modos

## (2) Mecanismo de “convective driving” (Goldreich & Wu 1999)

Asume la situación opuesta:  $\Pi \gg \tau_{\text{conv}}$

La convección superficial modula el flujo de energía. Físicamente mas correcto que la “frozen convection”. Predice borde rojo aunque en desacuerdo con las observaciones. Explica largos periodos para las mas frías (igual que el mecanismo  $\kappa$ ), pero además explica forma de los pulsos en las curvas de luz de enanas blancas pulsantes de gran amplitud.

## (3) Mecanismo $\varepsilon$

Inestabilidad vibracional inducida por reacciones nucleares. Favorecida por la fuerte dependencia de la combustión nuclear con la temperatura. Durante compresión, temperatura crece, y la generación de energía nuclear aumenta fuertemente en comparación con el caso de equilibrio. Donde hay reacciones nucleares se gana energía durante la compresion. **Inestabilidad** (períodos cortos). Probable responsable de las pulsaciones en la PNNV VV47 (Córscico et al. 2009)

## (4) Mecanismo de excitación estocástica

Debido a los movimientos turbulentos de la zona convectiva. Los modos son intrinsecamente estables, pero son excitados dinámicamente por los movimientos convectivos, y luego decaen. Ejemplo: oscilaciones solares. Muy baja amplitud:  $\Delta I/I \sim 10^{-6}$ ,

Variaciones de velocidad de 15 cm/s. Pero se observan miles de modos (l hasta  $\sim 300$  o mas!) dada la cercanía de esta estrella.

- SDSS (DR7: 20000 WDs)

- Gaia (diciembre de 2013)

- CoRoT

- Kepler

- Plato