

Pulzáló változócsillagok és megfigyelésük I.

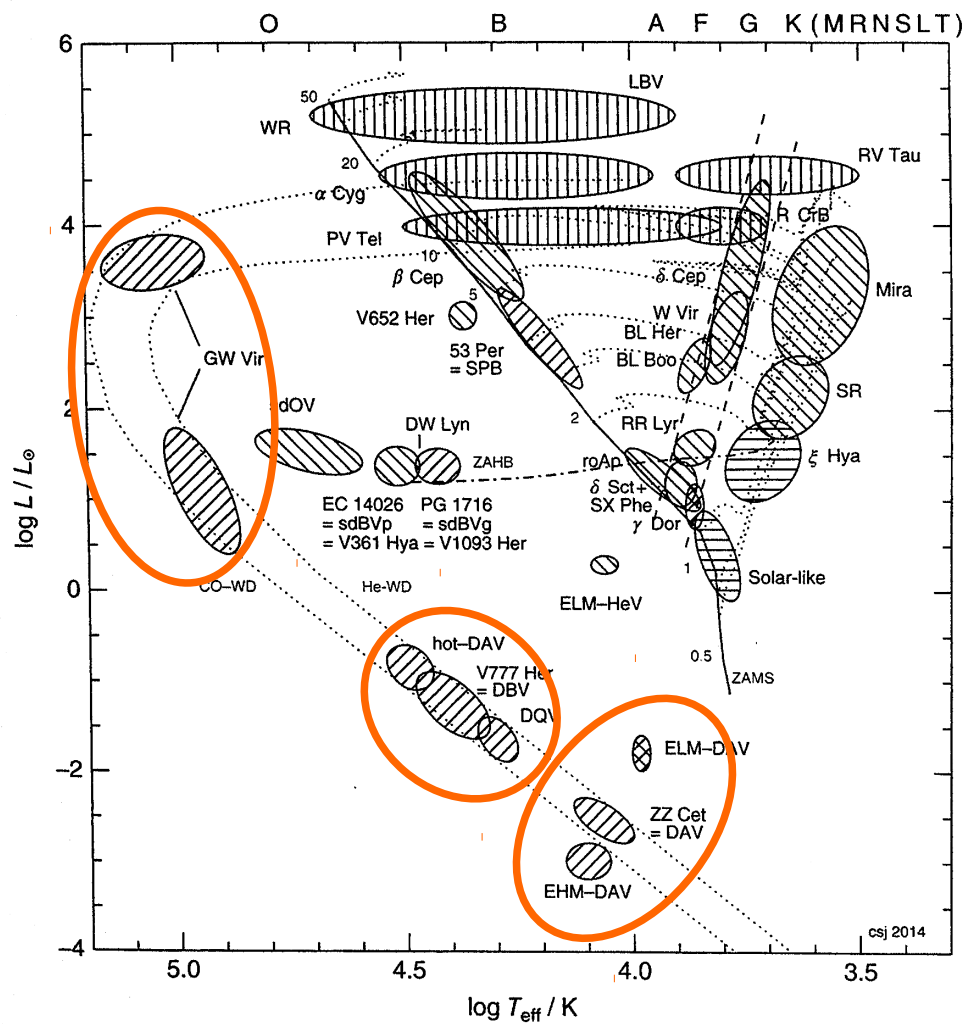
8. Pulzáló fehér törpecsillagok

Bognár Zsófia
Sódor Ádám

ELTE – MTA CSFK CSI
2017.12.05.

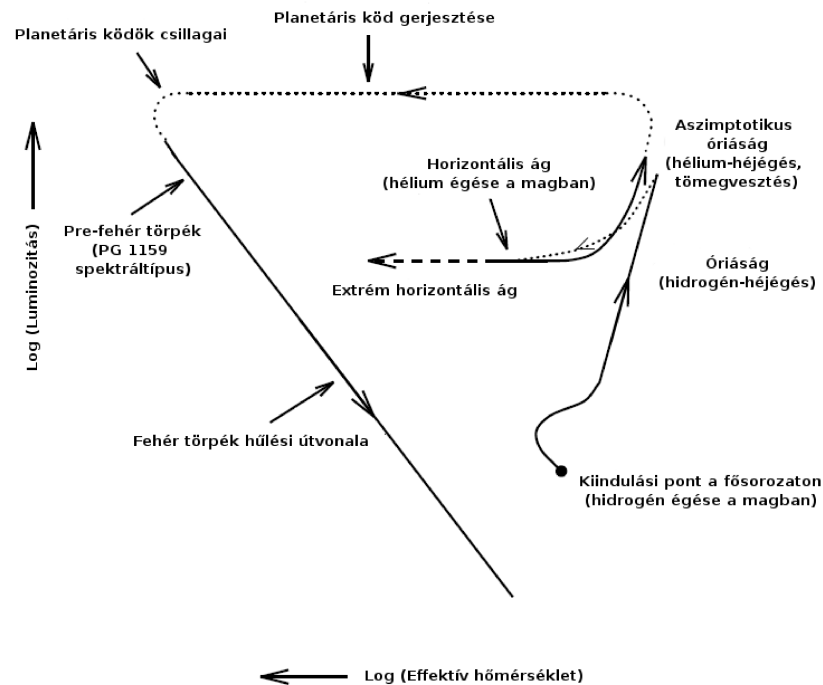


Általános jellemzők

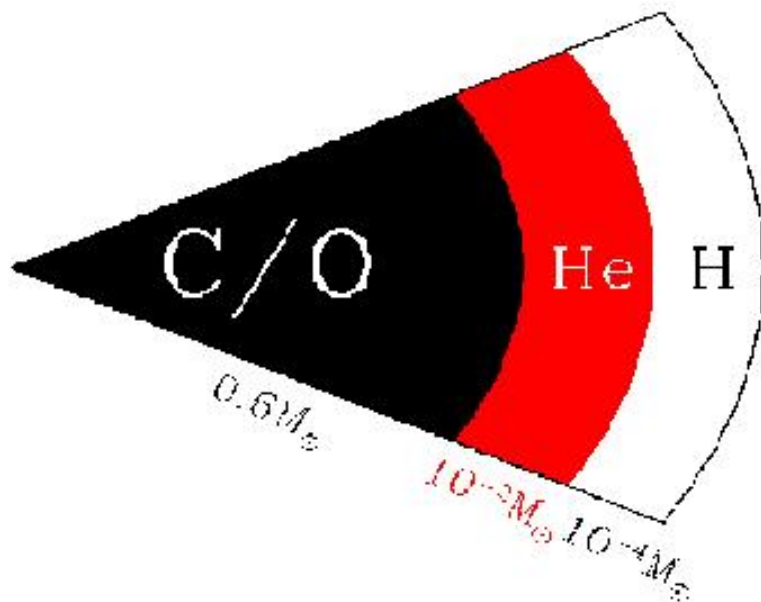


Fehér törpék – fejlődés

- fejlődés a főszorozattól a fehér törpe állapotig: ... AGB (héliumhéj-villámok, tömegvesztés, pulzáció – lsd. korábban mira változók) → közel konstans L mellett fejlődik, további tömegvesztés, H-héjégés → H égetése befejeződik, L csökken (viszonylag gyorsan), hűlés, összehúzódás → a csillag magja degenerálttá válik, fehér törpe hűlési útvonala (lassú hűlés)



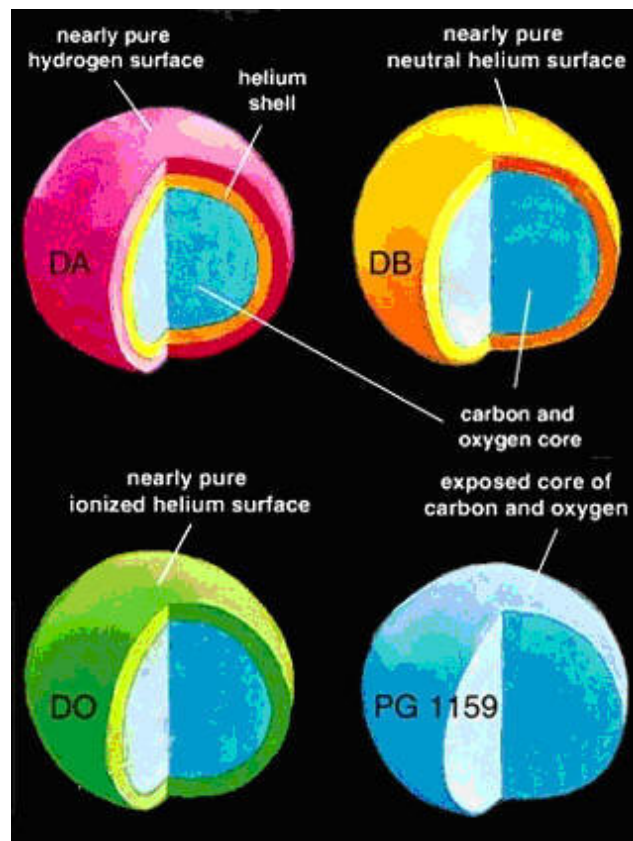
Fehér törpék – szerkezet



- a tömeg mintegy 99%-a a magban koncentrálódik (elfajult állapotban lévő elektrongáz + nem elfajult ionkomponens), Chandrasekhar-határ!
60-100 km vastag, nem elfajult gázból álló burok
- tömegek: átlagosan 0.6-0.7 naptömeg (O-Ne mag: 1-1.3 M_{nap})
- a vékony gázburok szabályozza a hűlést

Fehér törpék – szerkezet

- Csoportosítás: spektrális jellegzetességek alapján:
 - DA (>85%) H jelenléte
 - DO (> 45 000 K), DB (30 000 – 12 000 K): He
 - “hibrid típusok” (pl. DBA)
 - nehezebb elemek jelenléte: DQ, DZ típusok (<12 000 K)általánosságban: azt, hogy milyen légköri összetevőket azonosítunk, a konvekció, a diffúzió és az akkréciós folyamatok alakítják ki



Pulzáló fehér törpék

- **3 nagyobb csoport: GW Vir, DBV (V777 Her), DAV (ZZ Ceti)**
- elsőként felfedezett: HL Tau 76 (Arlo U. Landolt, 1964), gyors, kis amplitúdójú, multiperiodikus fényességváltozás
nemradiális, g-módusú pulzáció eredményei (1972)
szisztematikus észlelőmunka → **ZZ Ceti csillagok** (~12 000 K)
gerjesztési zóna: ahol a H egy része ionizálva van jelen + konvekció
- **DBV csillagok:** elméletileg megjósolva (~20 000 K), majd észleléssel megerősítve (Winget et al. 1982)
gerjesztés: He ionizációjához kapcsolódóan+konvekció
- időközben: PG 1159-035 (**GW Vir**) fényességváltozásai (McGraw et al. 1979)
gerjesztés: a C és O egy részének ciklikus ionizációja felelős
- **hőmérsékleti tartományok:**
GW Vir: 75 000 – 170 000 K,
DBV: 22 000 – 29 000 K,
DAV: 10 500 – 13 000 K

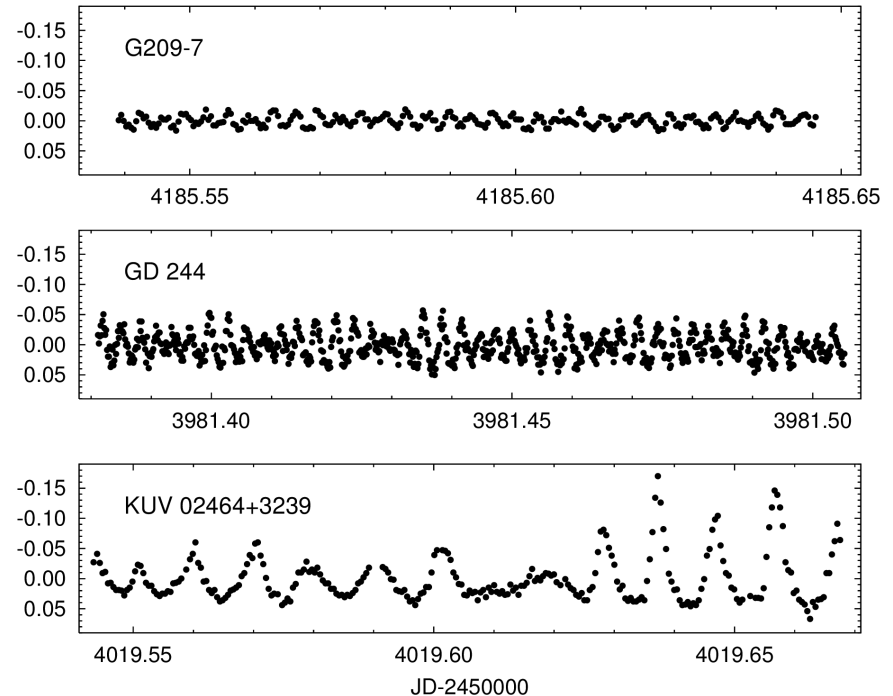
Pulzáló fehér törpék

Újabb változótípusok:

- forró DQ fehér törpék 18 000 – 23 000 K között (SDSS; Dufour et al. 2007), szén-dominált légkör
g-módusú pulzáció gerjesztése lehetséges (2008), elméletileg megjósolva, észlelve (Montgomery et al. 2008; viszonylag erős mágneses tér, $\sim 10^6$ G) → **DQV** csillagok
P ~ 150 – 1100 s
5 ismert tag (eddig)
- forró DAV csillagok (“**hot DAV**”): elméletileg megjósolva (Shibahashi 2007), 30 000 K körül DA csillagokban g-módusú pulzáció (a “DB gap”-ben), észlelve (Kurtz et al. 2008)
P ~ 150 – 700 s, A ~ 1 mmag
3 ismert tag (eddig)
- **ELM** (“extremely low-mass”; 0.16 – 0.23 naptömeg, He mag, 7 ismert tag) és **EHM** (“extremely high-mass”; O-Ne mag) **DAV** csillagok

Asztroszeizmológia

- pulzációs periódusok értékei:
 - GW Vir: 300 – 6000 s
 - DBV, DAV: 100 – 1500 s
 - trend a DAV csillagoknál: alacsonyabb hőmérséklet → hosszabb periódusok
- “tisztá (pure)” instabilitási tartományok?
 - DAV és DBV csillagok: úgy tűnik, igen
 - GW Vir csillagok: nem
- pulzációs módusokat elsődlegesen befolyásoló tényezők: tömeg, hőmérséklet, mag kémiai összetétele, H és He héjak tömege



Asztroszeizmológia

- kis elmélet, nemradiális pulzáció:
 - feltevések: lineáris elmélet elfogadható, a tömegelemek mozgása adiabatikus módon történik, a rotáció, a konvekció és a mágneses tér hatását elhanyagoljuk, szintén elhanyagoljuk a perturbációkat a gravitációs potenciálban (Cowling-közelítés)
 - az aszimptotikus határon, g -módusok esetében feltételezve, hogy az oszcillációk frekvenciája jóval kisebb a Lamb és a Brunt-Väisälä frekvenciáknál:

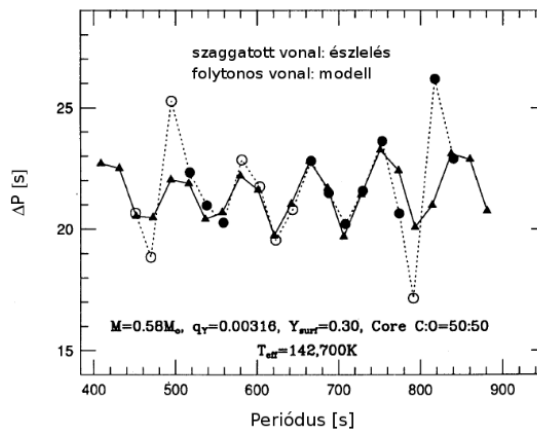
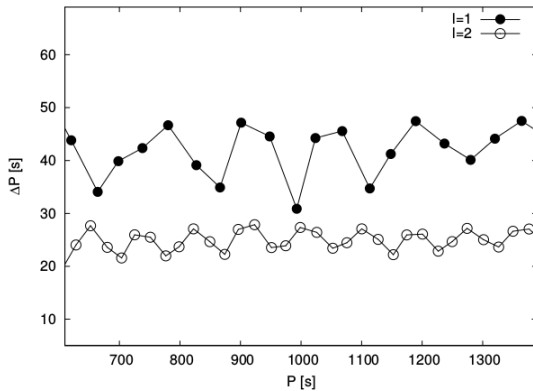
$$P_k = \frac{(k - \frac{1}{2}) 2\pi^2}{\sqrt{l(l+1)}} \left[\int \frac{N}{r} dr \right]^{-1} \rightarrow \Delta P = \frac{2\pi^2}{\sqrt{l(l+1)}} \left[\int \frac{N}{r} dr \right]^{-1}$$

azonos l , de különböző k (n) értékekhez tartozó módusok egyenközű sorozatot alkotnak (homogén csillag)

Asztroszeizmológia



- a periódustávolság-diagram tulajdonságai:



- szekuláris periódusváltozások:

$$\frac{\dot{P}}{P} = -a \frac{\dot{T}}{T} + b \frac{\dot{R}}{R}$$

ahol P a pulzációs periódus értéke ($\dot{P} \equiv dP/dt$), a és b pedig egységnyi nagyságrendű konstansok.

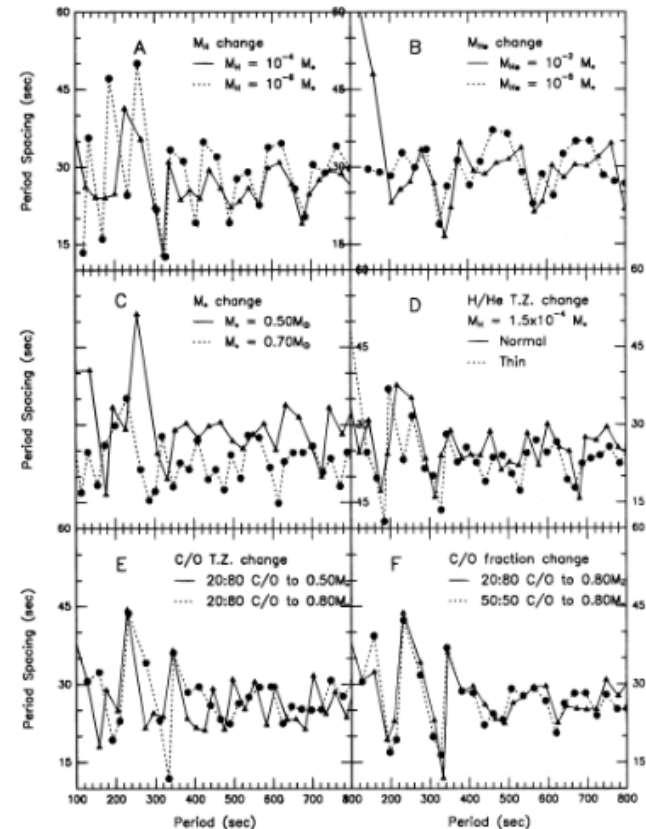
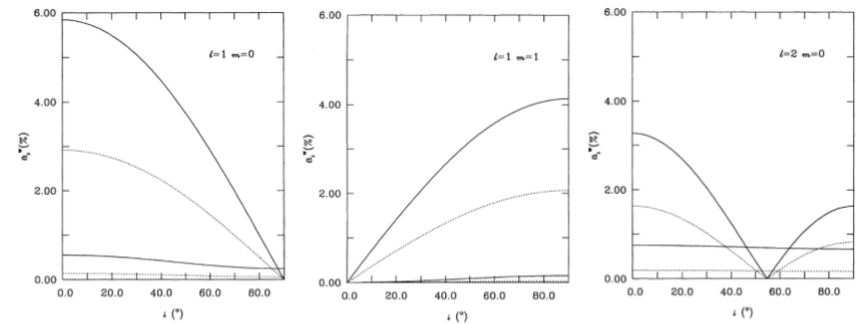
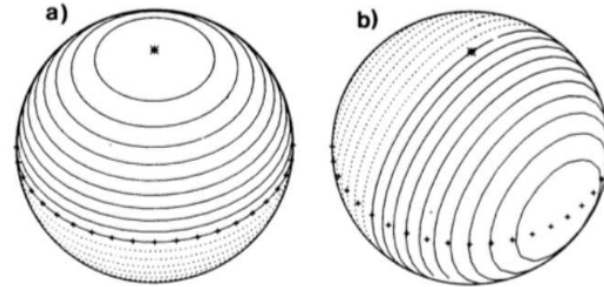
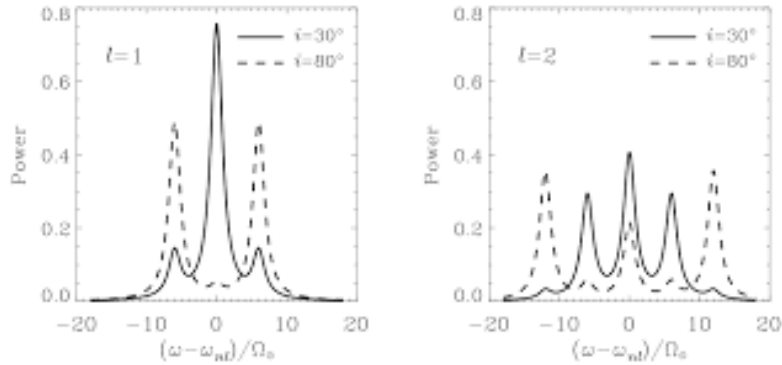


FIG. 3.—Six-panel summary describing the effect that changing various structural features has on the period spectrum, measured here by the period spacing between consecutive overtone modes. (a-f) show the effect of increasing M_0 , increasing M_0 , increasing M_c , making the H/He transition zone thinner, making the C/O transition region thinner, and increasing the oxygen fraction in the C/O core, respectively. (Consult the text for details.)

Asztroszeizmológia

- a csillag forgásának hatása: a pulzációs frekvenciák $2l+1$ komponensre való felbomlása (rotációs frekvenciafelhasadás), $-l \leq m \leq l$

$$\nu_{k,l,m} \approx \left\langle \frac{N^2 l(l+1)}{k^2 r^2} \right\rangle^{\frac{1}{2}} + \left[1 - \frac{C_k}{l(l+1)} \right] m \Omega$$



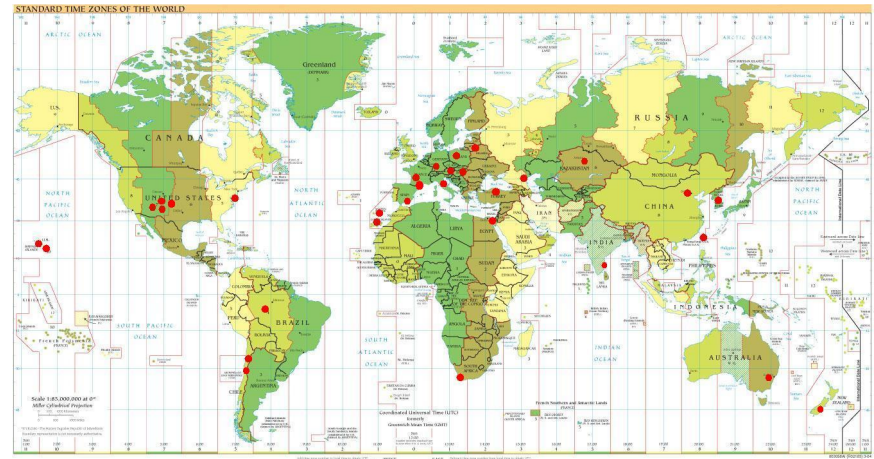
6. ábra. FELSŐ FOLYTONOS VONAL: LÁTSZÓ FOURIER-AMPLITÚDÓ VÁLTOZÁSA AZ i SZÖGGEL KÜLÖNBÖZŐ l ÉS m ÉRTÉKEKNÉL ($i = 0$ -NÁL A PÓLUSRA LÁTUNK RÁ) (Brassard et al. 1995).

Ground- and space-based observations

- WET (Whole Earth Telescope), XCOV1 campaign (eXtended Coverage): 1988 -
- single-site (pl. Konkoly)
- *Kepler*, *K2* (31 DAV, 2 DBV, up to Cycle 8)

High duty cycles, precise photometry, relatively large number of objects → in-depth investigations of the important topics:

- mode identification (l , m) and investigations of **stellar rotation**
- studies of **mode stability**:
 - mode line widths** in the Fourier transforms (FTs);
 - amplitude and frequency modulations** caused by nonlinear resonant mode couplings?
- **outbursts** in cool DAVs.
- **characterization of the DAV instability strip**



Stellar rotation

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL SUPPLEMENT SERIES, 232:23 (28pp), 2017 October

Hermes et al.

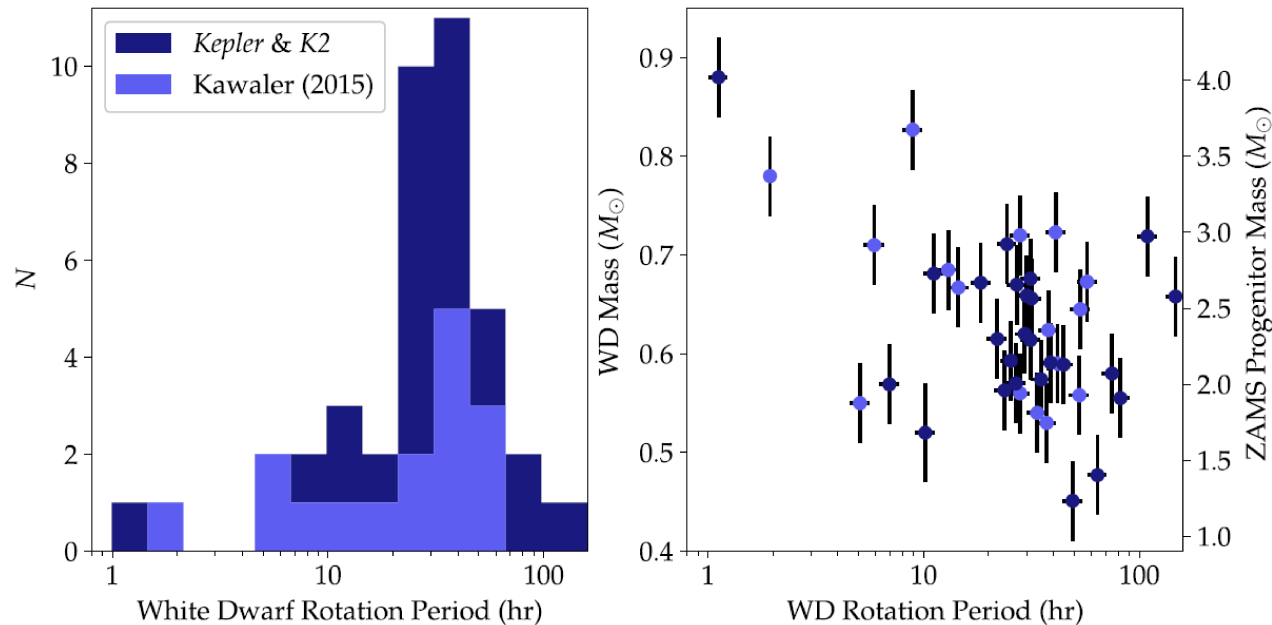


Figure 8. We compare asteroseismically determined rotation periods for all known pulsating white dwarfs, detailed in Table 4. All white dwarfs presented here appear to be isolated stars, so these rotation periods should be representative of the endpoints of single-star evolution; we excluded the only known close binary (a WD+dM in a 6.9 hr orbit, EPIC 201730811 (SDSS J1136+0409, Hermes et al. 2015a). The left histogram shares the color coding of the right panel, which compares white dwarf rotation as a function of mass. Estimates of the ZAMS progenitor masses for each white dwarf are listed on the right axis. Notably, EPIC 211914185 (SDSS J0837+1856) is more massive ($0.88 \pm 0.03 M_{\odot}$) and rotates faster (1.13 ± 0.02 hr) than any other pulsating white dwarf (Hermes et al. 2017c); we see evidence for a link between high mass and fast rotation, but require additional massive white dwarfs to confirm this trend.

0.51–0.73 M_{sun} white dwarfs, which evolved from 1.7–3.0 M_{sun} ZAMS progenitors, have a mean rotation period of 35 ± 28 hr with notable exceptions for higher-mass white dwarfs

Mode stability investigations

- mode line widths

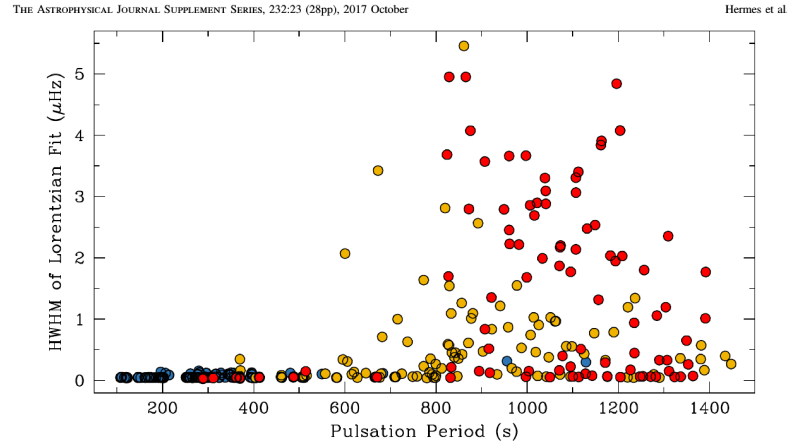
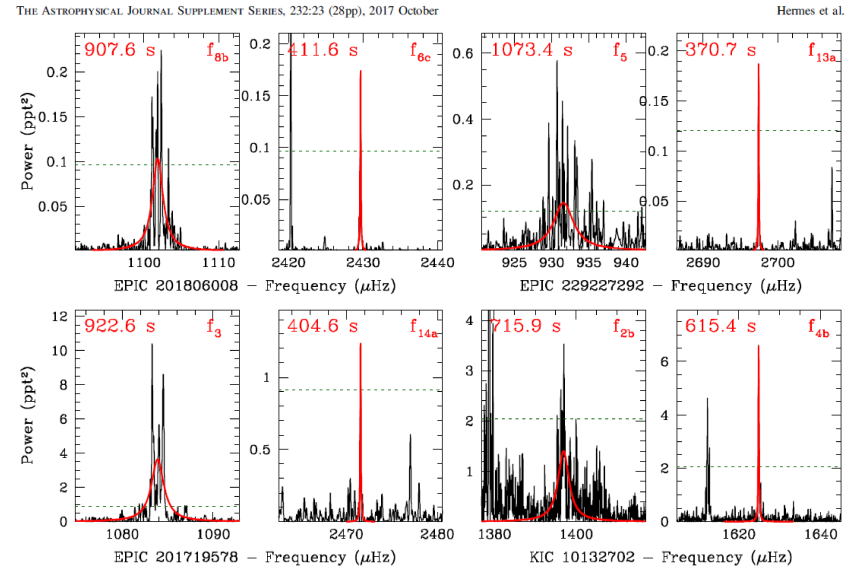


Figure 5. Half-width at half-maximum (HWHM) of Lorentzian functions fit to all significant peaks in the power spectra of the 27 DA white dwarfs observed through *K2* Campaign 8 by the *Kepler* space telescope; our procedure is described in Section 5. We use the same color classification as in Figure 3, where blue denotes objects with WMP < 600 s, gold with WMP > 600 s, and red those with outbursts (see Section 6). We excluded any nonlinear combination frequencies in this analysis. We see a sharp increase in HWHM at roughly 800 s, indicating that modes with relatively high radial order ($k > 15$ for $\ell = 1$ modes) are not coherent in phase, similar in behavior to stochastically excited pulsators. We save a discussion of the possible physical mechanisms behind this phenomenon for a future work (M. H. Montgomery et al. 2017, in preparation).

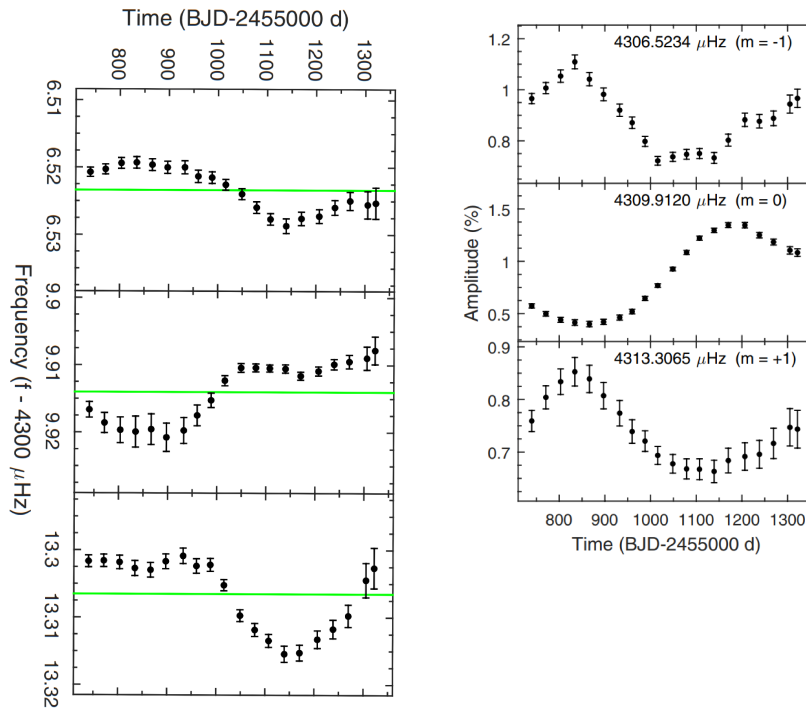


- white dwarf pulsations with periods exceeding 800 s have substantially broader mode line widths

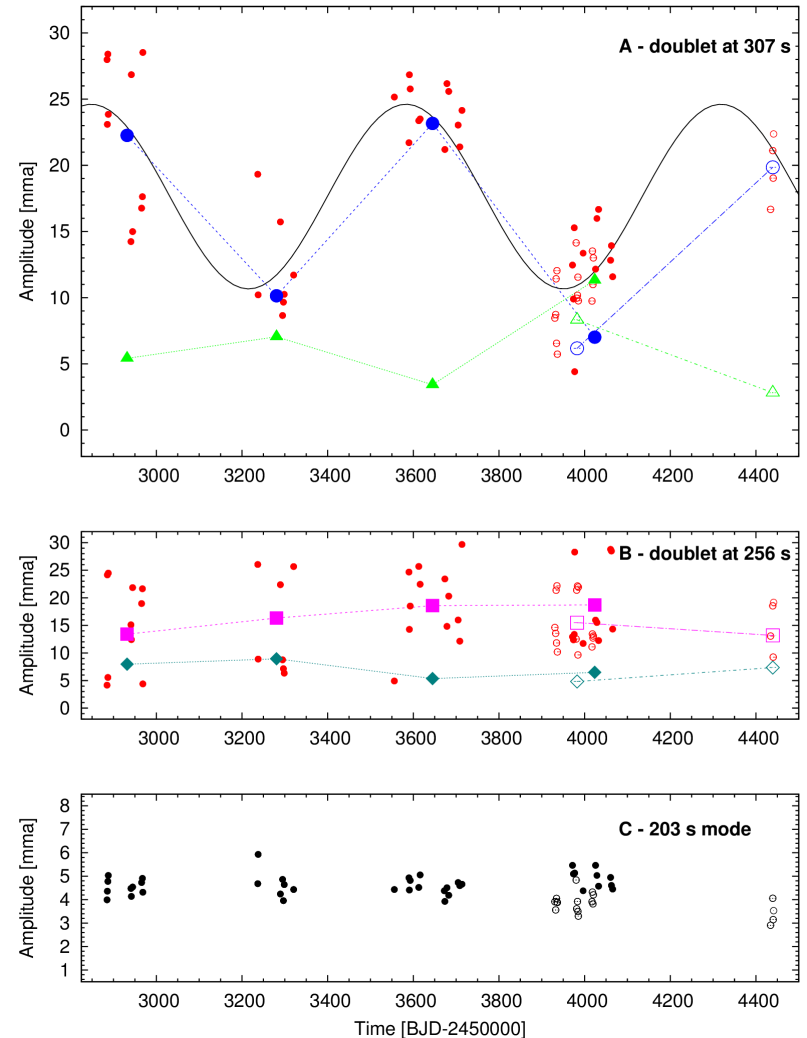
Mode stability investigations

- amplitude and frequency modulations

caused by nonlinear resonant mode couplings?



KIC 08626021 (DBV)



GD 244 (DAV)

Outbursts of cool DAV stars

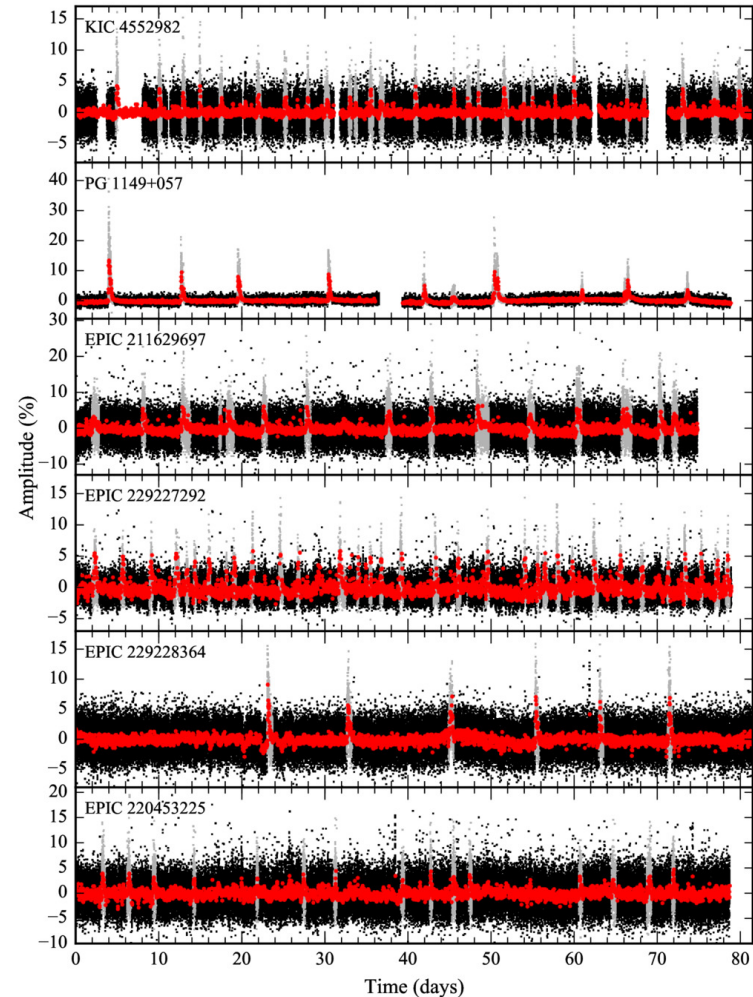
- “outburst”

How?

- the mean stellar flux increases up to 15% in about 1 hour
- duration: hours – 1 day
- recurrence: in a couple of days or in a week
- there are no regularities

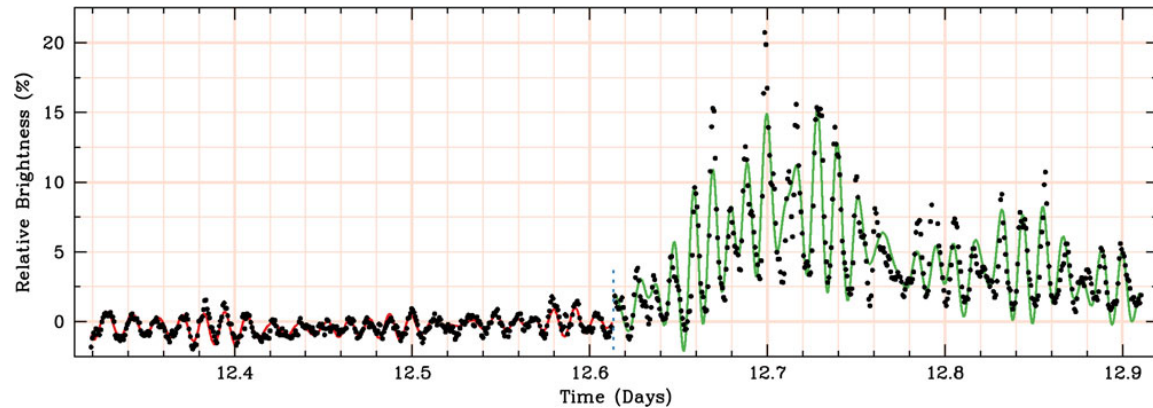
What causes these phenomenon?

nonlinear mode coupling; “in this model, a resonant coupling can transfer energy from a driven parent mode into two daughter modes. If these daughter modes are damped at the base of the convection zone, they will deposit their energy there, heating the surface of the star.”

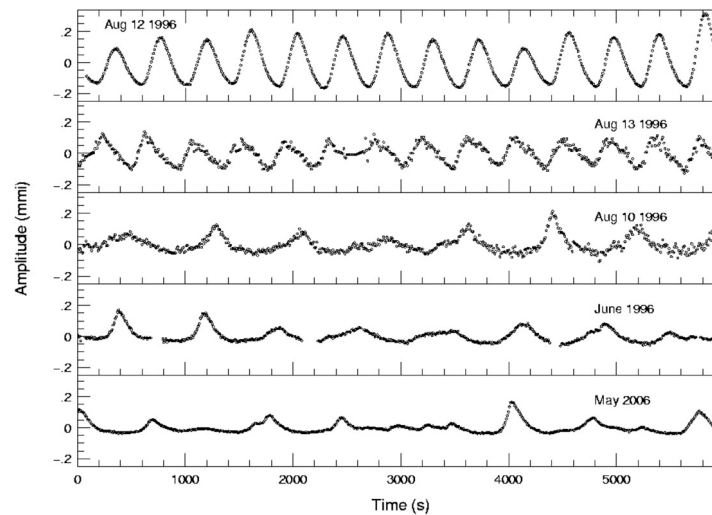


Outbursts of cool DAV stars

- PG 1149+057



- GD 358
(ground-based observation)



Characterization of the DAV instability strip

(a) DAVs begin pulsating at the blue edge of the Instability strip with low- k modes from roughly 100–300 s and relatively low amplitudes (~ 1 ppt).

(b) relatively short-period pulsations but their observed amplitudes increase. Extremely long mode lifetimes, and most modes with periods shorter than 400 s appear coherent in phase.

(c) DAVs in the middle of the instability strip: very high-amplitude modes and the greatest number of nonlinear combination frequencies.

(d) *Kepler* observations: a new phase in the evolution of DAVs as they approach the cool edge of the instability strip: aperiodic outbursts.

(e) DAVs do not experience large-scale flux excursions, suggesting that not all DAVs outburst at the cool edge of the instability strip. The coolest DAVs tend to have the longest-period pulsations with relatively low amplitudes.

