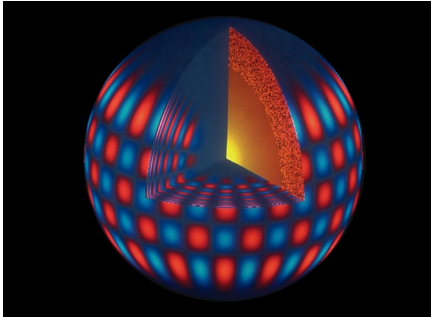
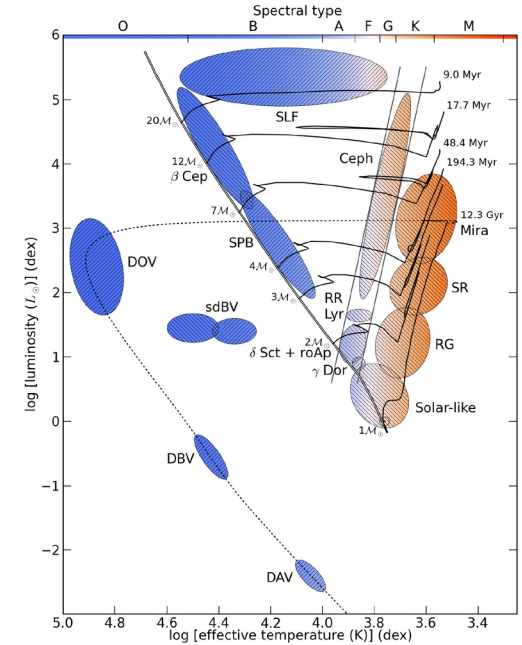


# Hvězdné pulzace

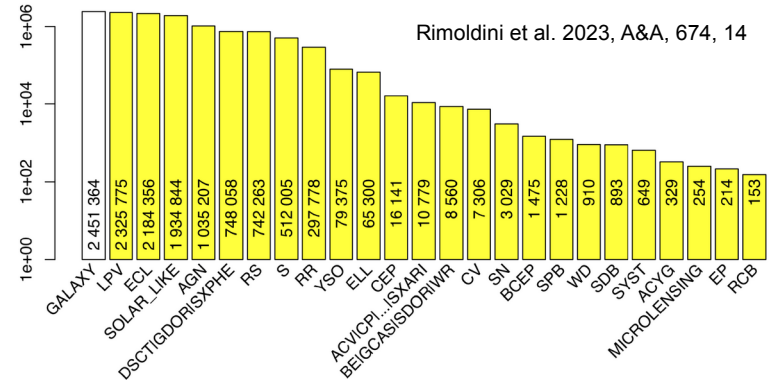
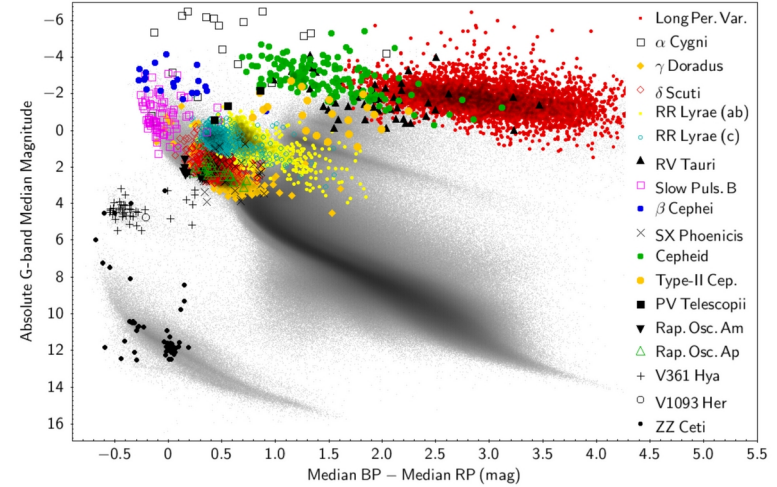
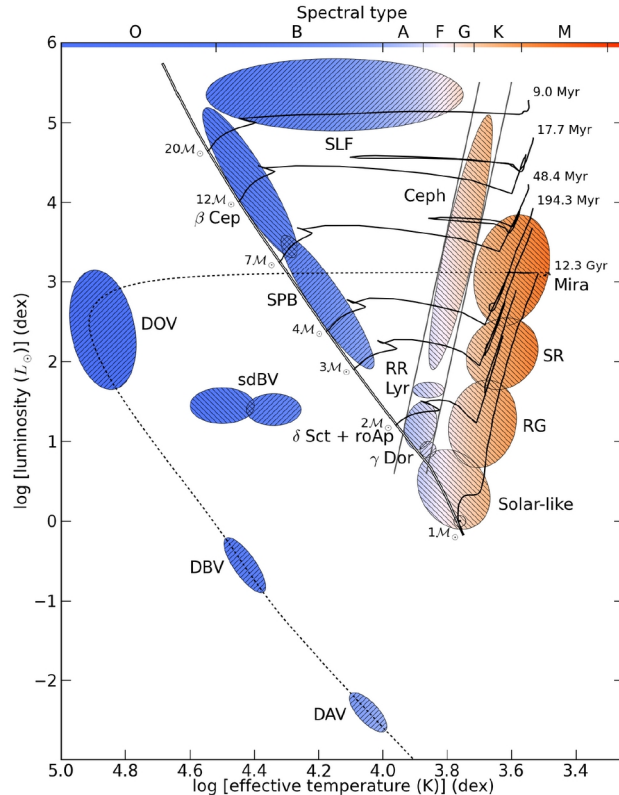


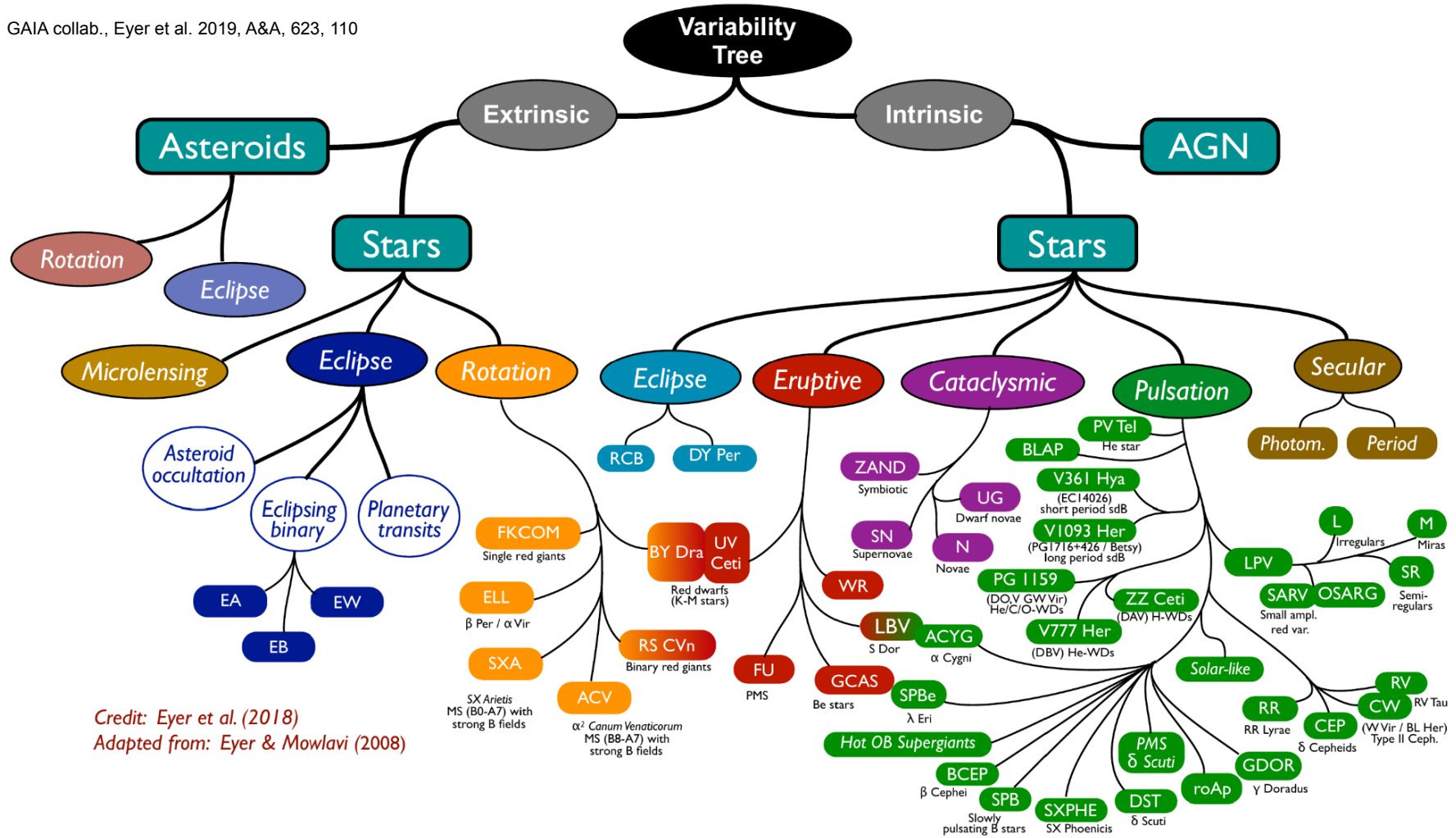
Marek Skarka



# Pulzující hvězdy v HRD

- Pulzující hvězdy se vyskytují v celém HR diagramu kromě málo hmotných hvězd hlavní posloupnosti (konvekce, malé amplitudy, špatná detekovatelnost)
- Nejpočetnější skupina proměnných hvězd (cca 70 % ve VSX)





Credit: Eyer et al. (2018)  
Adapted from: Eyer & Mowlavi (2008)

<i>Class</i>	<i>Other names</i>	<i>Mode Type</i>	<i>Period Ranges</i>	<i>Amplitudes (Light variation)</i>
Solar-like pulsator	main-sequence red giants, sub-giants	<i>p</i> <i>p</i>	3 to 10 min few hrs to few days	<8 ppm few 10 ppm
$\gamma$ Dor	slowly pulsating F	<i>g</i>	0.3 to 3 d	< 50 mmag
$\delta$ Sct	SX Phe(Pop.II)	<i>p</i>	18 min to 8 h	< 0.3 mag
roAp	–	<i>p</i>	5.7 to 23.6 min	< 10 mmag
SPB	5 Per	<i>g</i>	0.5 to 5 d	< 50 mmag
$\beta$ Cep	$\beta$ CMa, $\zeta$ Oph 53 per	<i>p&amp;g</i>	2 to 8 h( <i>p</i> ) few days( <i>g</i> )	< 0.1 mag < 0.01 mag
pulsating Be	$\lambda$ Eri,SPBe	<i>p&amp;g</i>	0.1 to 5 d	< 20 mmag
pre-MS pulsator	pulsating T Tauri, Herbig Ae/Be, T Tauri	<i>p</i> <i>p</i> <i>g</i>	1 to 8 h 1 to 8 h 8 h to 5 d	< 5 mmag < 5 mmag < 5 mmag
<i>p</i> -mode sdBV	EC14026, V361Hya	<i>p</i>	90 to 600 sec	< 0.3 mag
<i>g</i> -mode sdBV	PG1716+426	<i>g</i>	0.5 to 3 h	< 0.01 mag
<i>p</i> -mode sdOV		<i>p</i>	60 to 120 sec	< 0.2 mag
PNNV	ZZLep	<i>g</i>	5 h to 5 d	< 0.3 mag
DOV	, GW Vir	<i>g</i>	5 to 80 min	< 0.2 mag
DBV	V777Her	<i>g</i>	2 to 16 min	< 0.2 mag
DAV	ZZCeti	<i>g</i>	1 to 30 min	< 0.3 mag
RR Lyr	RRab RRc RRd	F FO F+FO	$\sim$ 0.5 d $\sim$ 0.3 d 0.3 to 0.5 d	< 1.5 mag < 0.5 mag < 0.2 mag
Type II Cepheid	W Vir BL Her	F F	0.8 to 35 d 1 to 8d	< 1 mag < 1 mag
RV Tauri	RVa,RVb	F?	30 to 150 d	< 3 mag
Type I Cepheid	Classical Cepheids s-Cepheid	F FO	1 to 135 d < 20d	< 2 mag < 0.1 mag
Mira	SRa, SRb SRc SRd	<i>l</i> = 0 <i>l</i> = 0 <i>l</i> = 0	> 80 d > 80d < 80d	< 8 mag < 1 mag < 1 mag

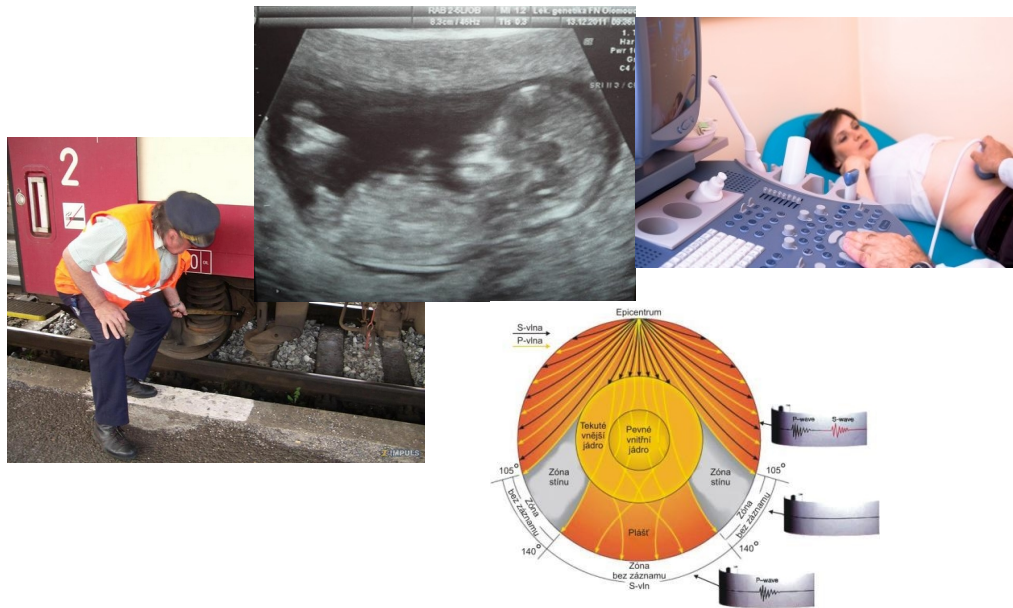
# Proč studovat hvězdné pulzace

Studium změn jasnosti a spektra způsobených pulzacemi je jedinou možností, jak se podívat dovnitř hvězdy

Přesné určení fyzikálních veličin

- Hmotnost, velikost, hustota
- Vnitřní rotace
- Rozhraní vrstev a vnitřní stavba
- Chemické složení
- Průběh teploty

**Každá hvězda pulzuje!**



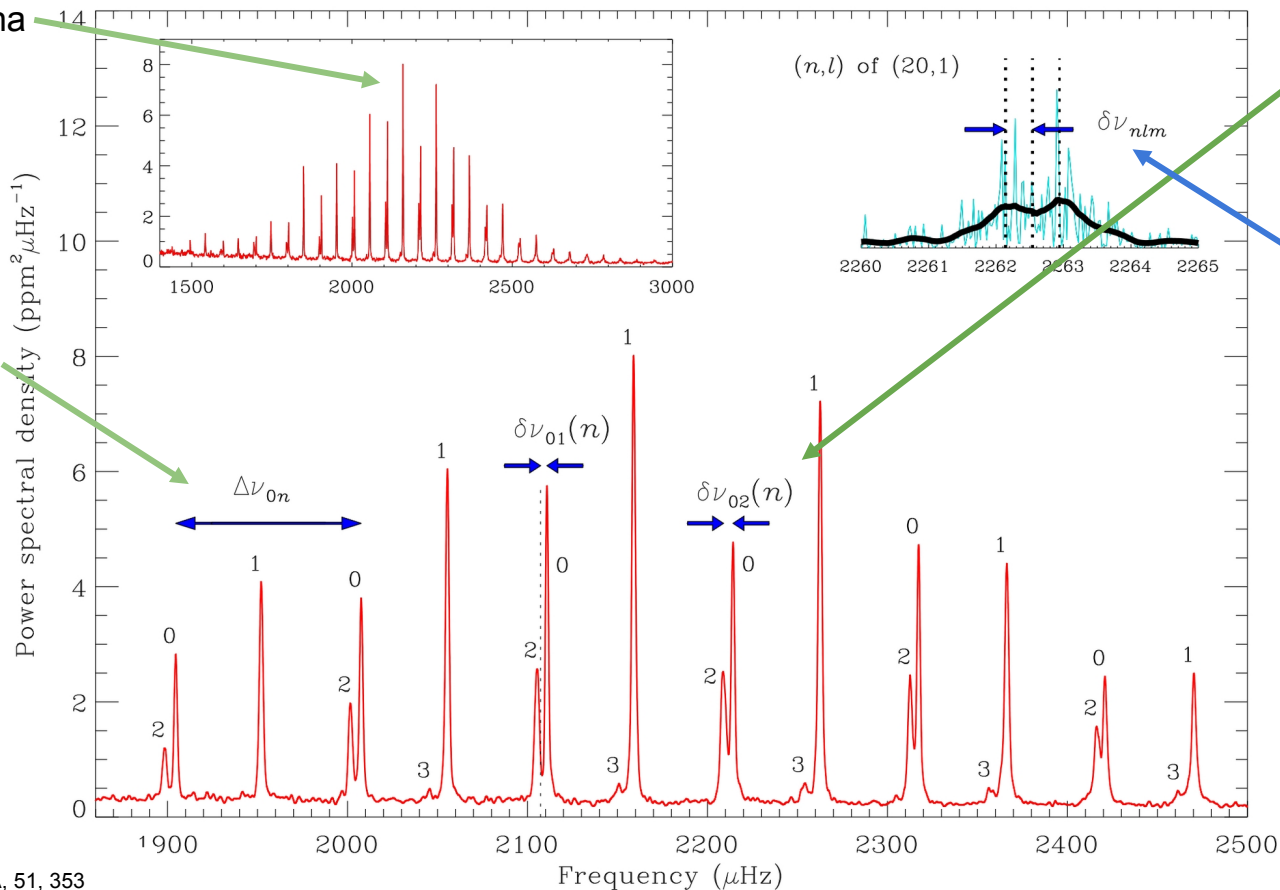
**Jak?**

Spektroskopické charakteristiky + studium časového vývoje jasnosti (Fourierovská transformace - frekvenční spektrum)

# Proč studovat hvězdné pulzace

Ploha maxima struktury citlivá na velikost hvězdy

Tzv. velká vzdálenost souvisí s rychlostí zvuku - citlivé na hustotu

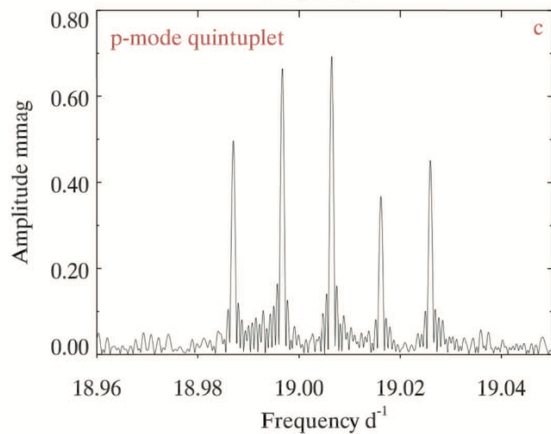
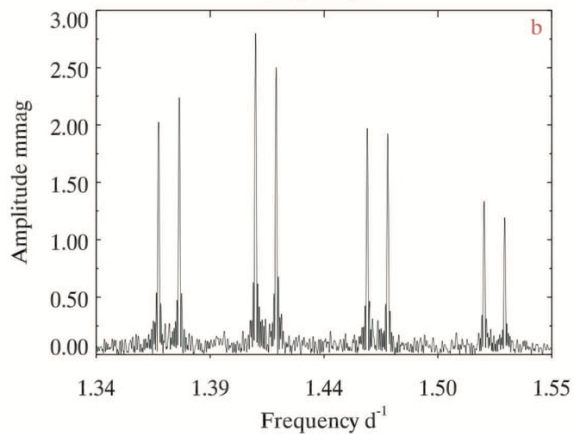
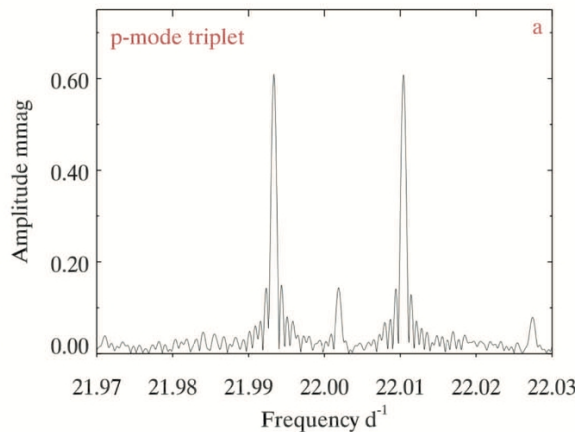
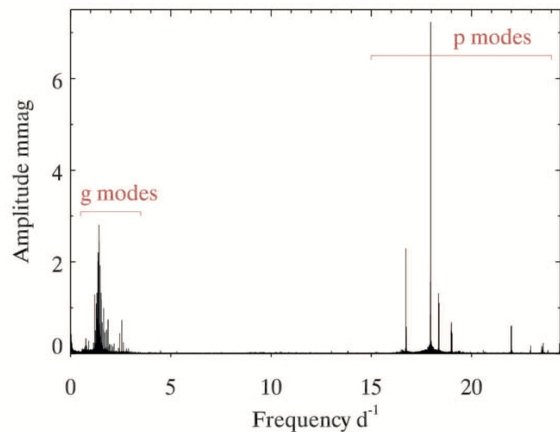


Tzv. malá vzdálenost citlivá na gradient rychlosti zvuku - > citlivé na chemické složení a diskontinuity

Rozštěpení díky rotaci - zanedbatelné pro hvězdy slunečního typu

Velikost  
Hmotnost  
Poloměr  
Věk  
+  
Teff (spect.)  
->  
Svítivost

# Proč studovat hvězdné pulzace



Rotační rozštěpení nám  
prozradí, jak se hvězda otáčí  
nejen na povrchu, ale i pod ní

# Proč studovat hvězdné pulzace

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL LETTERS, 811:L37 (5pp), 2015 October 1

METCALFE, CREEVEY, & DAVIES

**Table 1**  
Properties of the Optimal Models Using Various Constraints and Fitting Methods

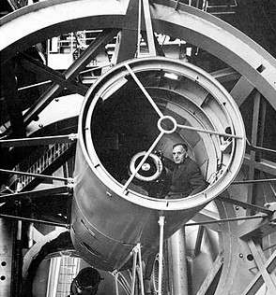
Case	$R/R_{\odot}$	$M/M_{\odot}$	$L/L_{\odot}$	$t/\text{Gyr}$	$Z$	$Y_i$	$\log g$	AMP <sup>a</sup>
<b>16 Cyg A (Kepler)</b>								
1: all constraints	$1.229 \pm 0.008$	$1.08 \pm 0.02$	$1.55 \pm 0.07$	$7.07 \pm 0.26$	$0.021 \pm 0.002$	$0.25 \pm 0.01$	$4.292 \pm 0.003$	767
2: without R	$1.225 \pm 0.008$	$1.07 \pm 0.02$	$1.53 \pm 0.07$	$7.15 \pm 0.27$	$0.020 \pm 0.002$	$0.25 \pm 0.01$	$4.291 \pm 0.002$	773
3: without R, L	$1.225 \pm 0.007$	$1.07 \pm 0.02$	$1.52 \pm 0.07$	$7.12 \pm 0.23$	$0.021 \pm 0.001$	$0.25 \pm 0.01$	$4.291 \pm 0.002$	776
4: fitting method	$1.229 \pm 0.007$	$1.08 \pm 0.02$	$1.55 \pm 0.06$	$7.07 \pm 0.37$	$0.021 \pm 0.002$	$0.25 \pm 0.01$	$4.292 \pm 0.002$	770
5: surface term	$1.229 \pm 0.008$	$1.08 \pm 0.02$	$1.55 \pm 0.07$	$7.07 \pm 0.34$	$0.021 \pm 0.002$	$0.25 \pm 0.01$	$4.292 \pm 0.002$	797
6: 3 months data	$1.229 \pm 0.008$	$1.08 \pm 0.02$	$1.55 \pm 0.07$	$6.99 \pm 0.37$	$0.024 \pm 0.002$	$0.26 \pm 0.01$	$4.292 \pm 0.003$	778
<b>16 Cyg B (Kepler)</b>								
1: all constraints	$1.116 \pm 0.006$	$1.04 \pm 0.02$	$1.25 \pm 0.05$	$6.74 \pm 0.24$	$0.022 \pm 0.003$	$0.26 \pm 0.01$	$4.359 \pm 0.002$	768
2: without R	$1.116 \pm 0.006$	$1.04 \pm 0.02$	$1.25 \pm 0.06$	$6.74 \pm 0.23$	$0.022 \pm 0.002$	$0.26 \pm 0.01$	$4.359 \pm 0.002$	774
3: without R, L	$1.116 \pm 0.006$	$1.04 \pm 0.02$	$1.24 \pm 0.06$	$6.79 \pm 0.19$	$0.022 \pm 0.002$	$0.26 \pm 0.01$	$4.359 \pm 0.002$	777
4: fitting method	$1.116 \pm 0.005$	$1.04 \pm 0.01$	$1.25 \pm 0.05$	$6.89 \pm 0.28$	$0.020 \pm 0.002$	$0.25 \pm 0.01$	$4.359 \pm 0.002$	771
5: surface term	$1.116 \pm 0.006$	$1.04 \pm 0.02$	$1.24 \pm 0.05$	$6.96 \pm 0.29$	$0.020 \pm 0.002$	$0.25 \pm 0.01$	$4.359 \pm 0.002$	798
6: 3 months data	$1.113 \pm 0.006$	$1.03 \pm 0.02$	$1.25 \pm 0.05$	$6.66 \pm 0.27$	$0.022 \pm 0.001$	$0.27 \pm 0.01$	$4.358 \pm 0.002$	779
<b>Sun (SOHO/VIRGO)</b>								
1: all constraints	$1.003 \pm 0.006$	$1.01 \pm 0.02$	$0.98 \pm 0.04$	$4.62 \pm 0.15$	$0.018 \pm 0.002$	$0.26 \pm 0.02$	$4.439 \pm 0.002$	766
2: without R	$1.007 \pm 0.006$	$1.02 \pm 0.02$	$1.02 \pm 0.04$	$4.53 \pm 0.15$	$0.018 \pm 0.002$	$0.26 \pm 0.01$	$4.440 \pm 0.002$	772
3: without R, L	$1.010 \pm 0.005$	$1.03 \pm 0.02$	$1.00 \pm 0.04$	$4.77 \pm 0.18$	$0.017 \pm 0.001$	$0.27 \pm 0.02$	$4.437 \pm 0.004$	800
4: fitting method	$1.010 \pm 0.007$	$1.03 \pm 0.02$	$1.00 \pm 0.04$	$4.62 \pm 0.15$	$0.018 \pm 0.002$	$0.26 \pm 0.02$	$4.439 \pm 0.002$	766
5: surface term	$1.003 \pm 0.007$	$1.01 \pm 0.02$	$1.00 \pm 0.03$	$4.62 \pm 0.15$	$0.018 \pm 0.002$	$0.26 \pm 0.02$	$4.439 \pm 0.002$	766
6: 3 months data	$0.996 \pm 0.010$	$0.99 \pm 0.03$	$1.00 \pm 0.04$	$4.77 \pm 0.18$	$0.017 \pm 0.001$	$0.27 \pm 0.02$	$4.437 \pm 0.004$	800

Přesnost určení parametrů v rámci procent



# Přesnost měření s pomocí asteroseismologie výrazně lepší než s jinými metodami

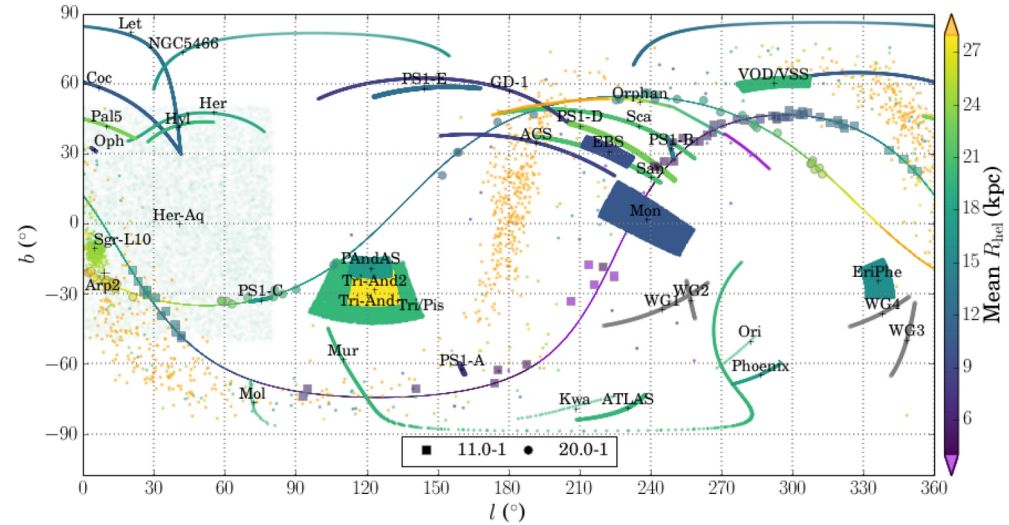
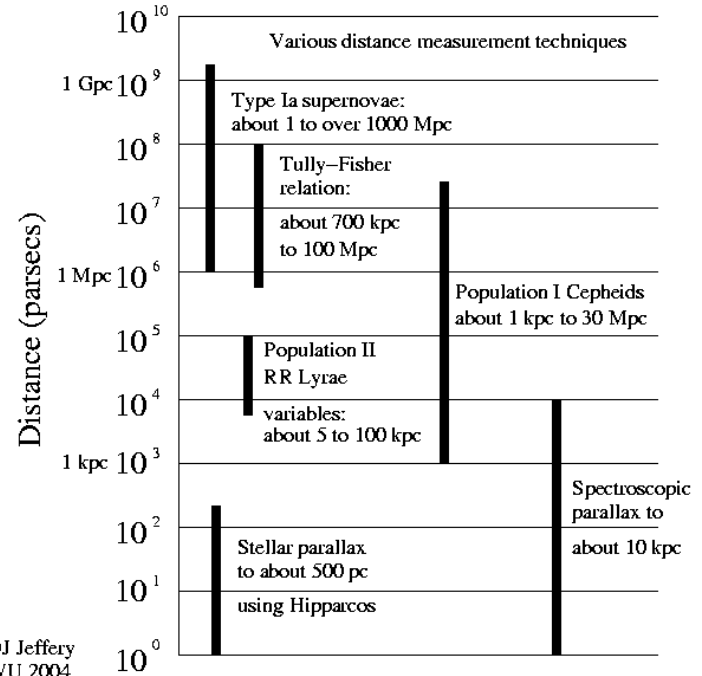
Method	Type of star	Diagnostic	Precision	Model dependence
Spectral lines	LM	$T_{\text{eff}}$ , abundances	$\sim 1\%$	A: medium
Spectral lines	IM	$T_{\text{eff}}$ , abundances	$\sim 2\%$	A: medium
Spectral lines	HM	$T_{\text{eff}}$ , abundances	$\sim 5\%$	A: medium
IRFM/SED <sup>b</sup>	LM, IM	$T_{\text{eff}}$	$\sim 2\%$	A: low
RV & light curves <sup>c</sup>	EB/SB2	$M$	$\sim 1\%$	None
RV & light curves <sup>c</sup>	EB/SB2	$R$	$\sim 3\%$	A: low
Interferometry <sup>d</sup>	All	$R$	$\sim 3\%$	A: low
Typical <i>Gaia</i> DR2 <sup>e</sup>	LM & IM	$L$	$\lesssim 15\%$	A: medium
Typical <i>Gaia</i> DR2 <sup>e</sup>	LM & IM	$R$	$\lesssim 10\%$	A: medium
Cluster (E)MST <sup>f</sup>	All	age	$\sim 30\%$	I: strong
Gyrochronology <sup>g</sup>	LM	$\Omega_{\text{surf}}$	$\sim 10\%$	None
Gyrochronology <sup>g</sup>	LM	age	$\sim 20\%$	I: medium
Coherent g modes <sup>h</sup>	IM	$\omega_{nlm}$	$\sim 0.1\%$	None
Coherent p modes <sup>h</sup>	IM	$\omega_{nlm}$	$\sim 0.01\%$	None
Damped p modes <sup>h</sup>	LM	$\omega_{nlm}$	$\sim 0.001\%$	None
Damped mixed modes <sup>h</sup>	RG	$\omega_{nlm}$	$\sim 0.01\%$	None
g-mode splittings <sup>h</sup>	IM	$\Omega_{\text{core}}$	$\sim 0.1\%$	None
g-mode spacings <sup>h</sup>	IM	$\Omega_{\text{core}}$	$\sim 5\%$	I: low
p-mode splittings <sup>h</sup>	IM	$\Omega_{\text{env}}$	$\sim 30\%$	I: medium
p-mode splittings <sup>h</sup>	LM	$\Omega_{\text{env}}$	$\sim 50\%$	I: medium
mixed-mode splittings <sup>h</sup>	RG	$\Omega_{\text{core}}$	$\sim 1\%$	None
Phase modulation & RV <sup>h,i</sup>	PB1/PB2	$M, R$	as EB/SB2	None



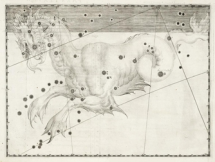
# Proč studovat hvězdné pulzace

Určování vzdáleností ve vesmíru, mapování Galaxie

A Cartoon of the Distance Ladder

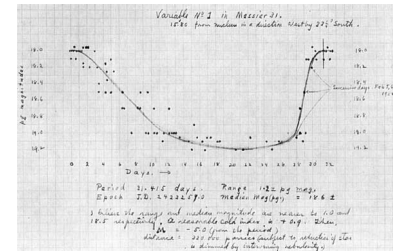
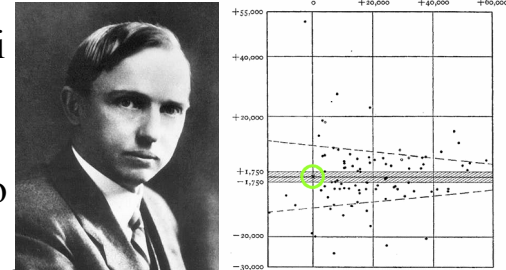
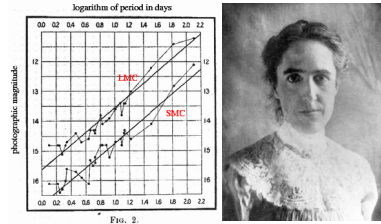


Mateu et al. 2017, MNRAS, 469, 721



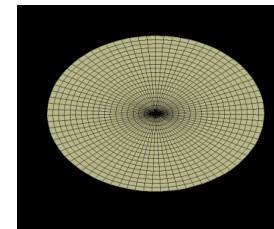
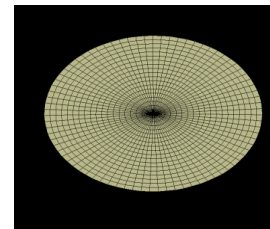
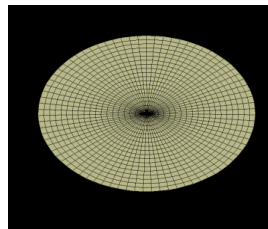
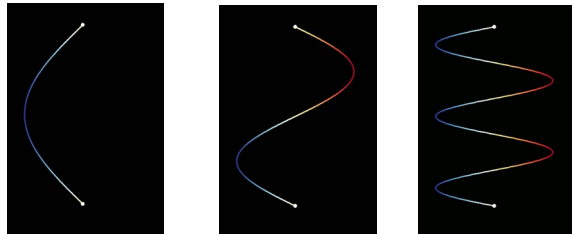
# Pulzující hvězdy v kontextu dějin

- První objevená periodicky proměnná hvězda byla pulzující (Mira, D. Fabricius, 1596) => konec aristotelovského náhledu na svět
- H. S. Leawittová objevila vztah perioda-zářivý výkon u cefeid ve velkém Magellanově oblaku (1912)
- H. Shapley navrhl teorii světelných změn pomocí pulzací (1914)
- H. Shapley zjistil, že se Slunce nachází na periferii Galaxie (měření vzdálenosti pomocí hvězd typu RR Lyrae v kulových hvězdokupách, 1920)
- A. Eddington navrhl  $\kappa$  mechanismus (1926)
- V. Slipher a E. Hubble rozlišili cefeidy v M31 a M33, potvrdili tak domněnku o galaxiích jako hvězdných ostrovech a odhadli jejich vzdálenosti (1926-1929)
- A. Zhevakin, A. Cox – rozpracování teorie radiálních hvězdných pulzací (1956-1963)
- A. Cox, M. Tassoul – rozpracování teorie neradiálních pulzací (1980)
- Do 90. let klasifikace a pozorování, od 90. let 20. století interpretace
- Nové tisíciletí: objevování nových jevů a chování pulzujících hvězd, výrazný posun v chápání hvězdných pulzací, vesmírné mise, charakterizace hvězd



# Popis hvězdných oscilací

Hvězdy - trojrozměrné (víceméně) sférické oscilátory - možnost výchylek ve třech směrech, popis pomocí sférických souřadnic a sférických harmonických funkcí



AstroSTEP, <http://www.asterostep.eu/Outreach.html#zero>

Pulzace probíhají na tzv. vlastních frekvencích, které jsou plně závislé na konkrétních charakteristikách konkrétní hvězdy

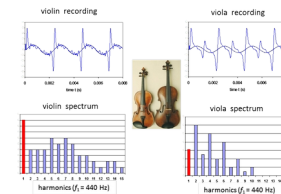
$$\xi_r(r, \theta, \phi, t) = a(r) Y_l^m(\theta, \phi) \exp(-i 2\pi \nu t),$$

$$\xi_\theta(r, \theta, \phi, t) = b(r) \frac{\partial Y_l^m(\theta, \phi)}{\partial \theta} \exp(-i 2\pi \nu t),$$

$$\xi_\phi(r, \theta, \phi, t) = \frac{b(r)}{\sin \theta} \frac{\partial Y_l^m(\theta, \phi)}{\partial \phi} \exp(-i 2\pi \nu t),$$

$$Y_l^m(\theta, \phi) = (-1)^m \sqrt{\frac{2l+1}{4\pi} \frac{(l-m)!}{(l+m)!}} P_l^m(\cos \theta) \exp(im\phi)$$

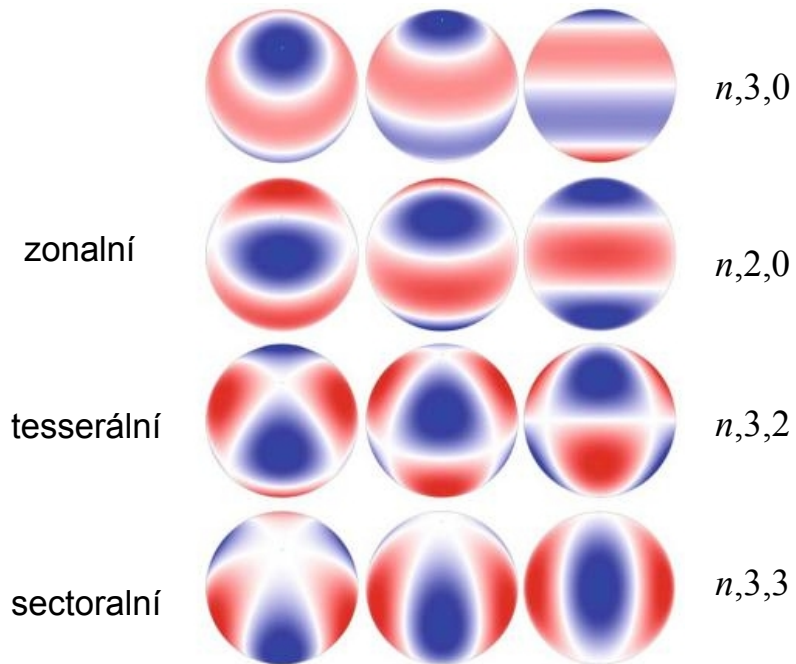
$$P_l^m(\cos \theta) = \frac{1}{2^l l!} (1 - \cos^2 \theta)^{m/2} \frac{d^{l+m}}{d \cos^{l+m} \theta} (\cos^2 \theta - 1)^l$$



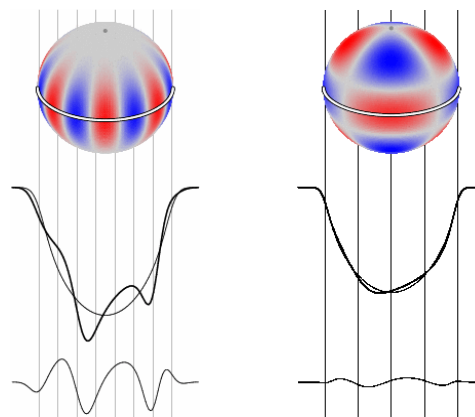
<http://staff.not.iac.es/~jht/science/nrpform/>

# Popis hvězdných oscilací

$n$  - radiální řád;  $\ell$  - sférický stupeň (celkový počet uzlových kružnic na povrchu);  $m$  - azimutální řád ( $-\ell, 0, +\ell$ ); počet uzlových kružnic na povrchu procházející póly  
Značení: základní mód "F", 1 harmonický "1O"



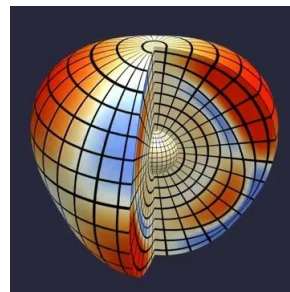
Aerts, Christensen-Dalsgaard, Kurtz 2010, Asteroseismology, Springer



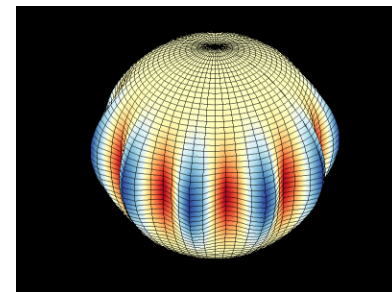
<https://www.youtube.com/watch?v=P-fOJ-XdlmY>

<https://www.youtube.com/watch?v=4z4QdiqP-q8>

<http://www.acs.psu.edu/drussell/>



$n, 3, 2$



$n, 10, 10$

Sektorální a tesserální pulzace jsou klíčové - rotace

AstroSTEP, <http://www.asterostep.eu/Outreach.html#zero>

# Excitační mechanismy I

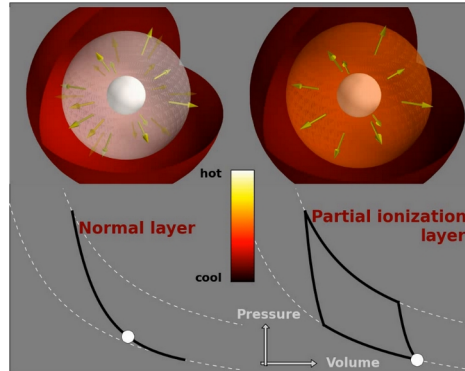
- Záklopkový mechanismus (Eddington 1926) - radiální pulzace

- Změny v opacitě ( $\kappa$ ), adiabatickém exponentu ( $\gamma$ ), produkci energie ( $\epsilon$ ),

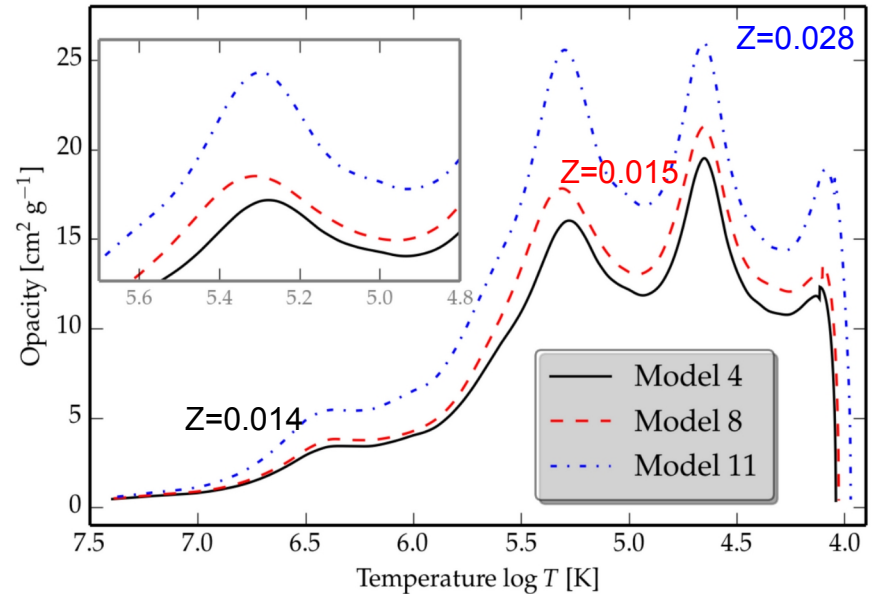
e.g. Eddington 1926, ISBN 9780521337083, Cowley 1934, MNRAS, 94, 768; Cox 1963, ApJ, 138, 487; Cox et al. 1966, ApJ, 144, 1038

$$\kappa \sim \rho T^{-\frac{7}{2}}$$

- (1) Záření ionizuje He II, opacita vzrůstá, roste tlak záření. Roste tepelná kapacita materiálu, vrstva je tak schopna pojmout více energie než okolní vrstvy
- (2) Expanze
- (3) S klesající teplotou se začne rekombinace, uvolní se teplo, opacita poklesne, záření je uvolněno efektivněji než v okolních vrstvách, tlak poklesne
- (4) Kontrakce

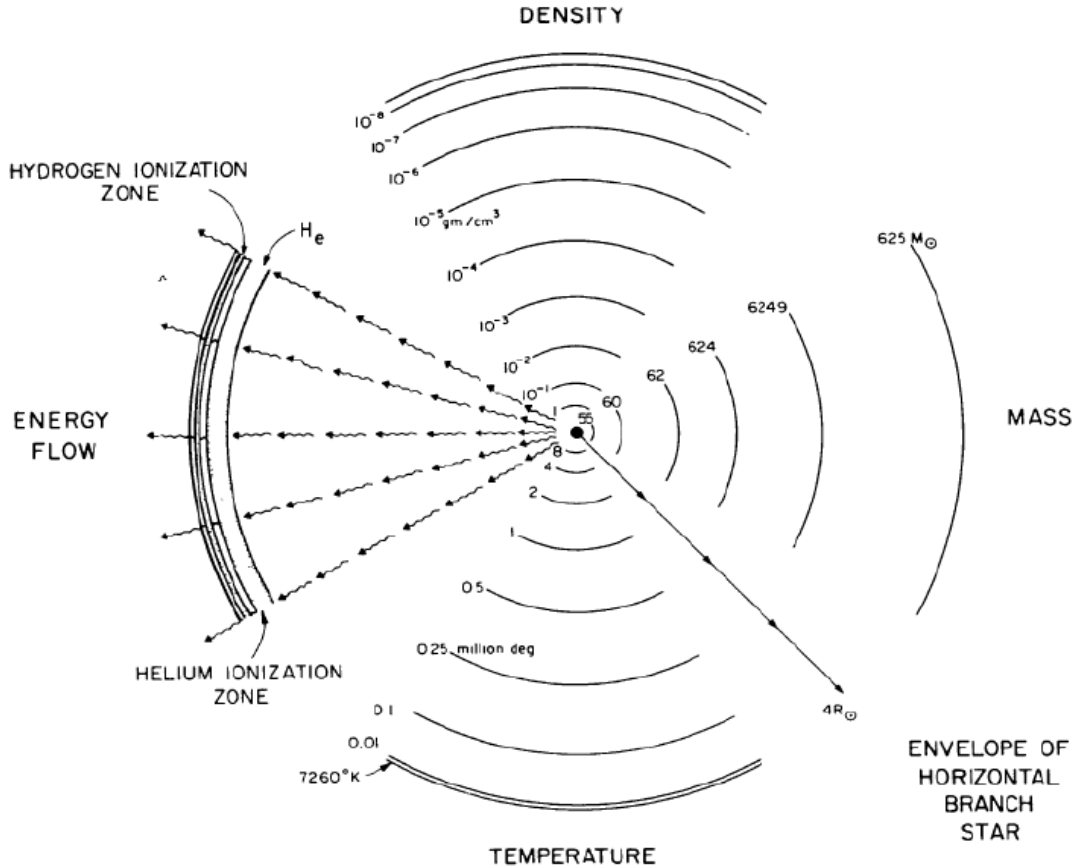


$\kappa$ -mechanismus ve vrstvách H, HeII, Fe, teploty cca 10, 40, 200 kK)



Týká se pouze vnějších vrstev hvězdy

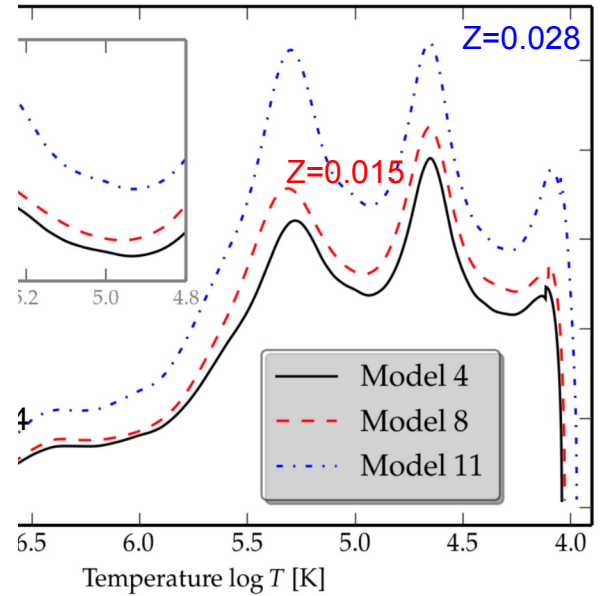
# Excitační mechanismy I



energie ( $\epsilon$ ),  
 Cox et al. 1966, ApJ, 144, 1038

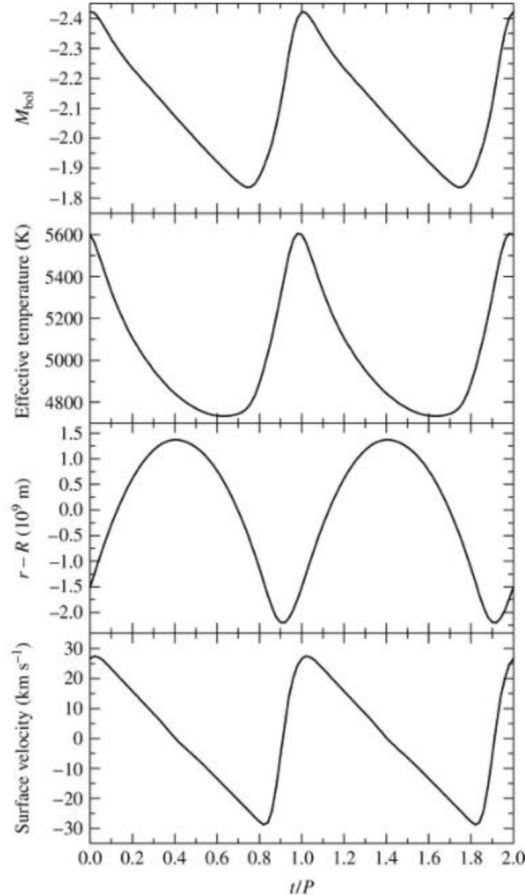
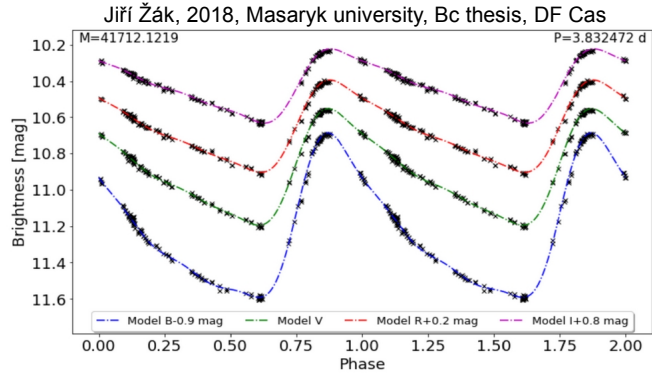
$$\kappa \sim \rho T^{-\frac{7}{2}}$$

ve vrstvách H, HeII, Fe, teploty cca 10, 40, 200 kK)

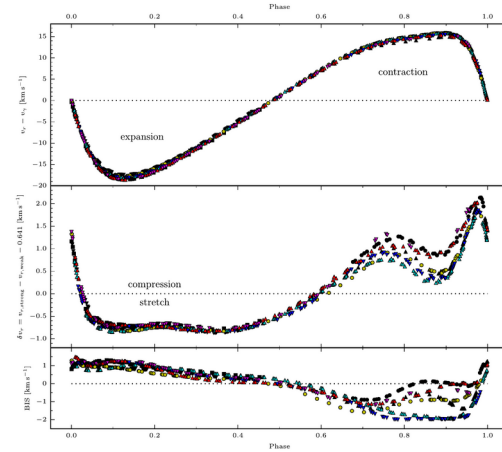


# Excitační mechanismy I

Typická křivka hvězdy řízené záklopkovým mechanismem - rychlý vzestup jasnosti, pozvolný pokles - (Hvězdy pásu **nestability** - DCEP, RR Lyr, HADS, T2CEP, ACEP)

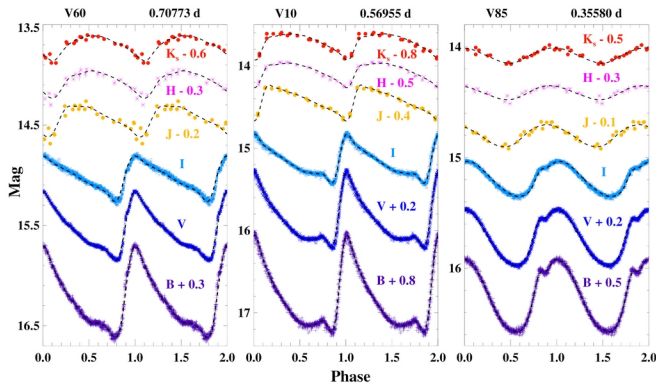


Maximum jasnosti nastává přibližně při největším smrštění a nejvyšší teplotě



Anderson 2016, MNRAS, 463, 1707 - změny radiálních rychlostí u  $\ell$  Car nejsou stejné v každém cyklu a navíc se mění s hloubkou zkoumané vrstvy

Křivky mají různou amplitudu v různých filtrech - koukáme na různé vrstvy fotosféry





# Pás nestability

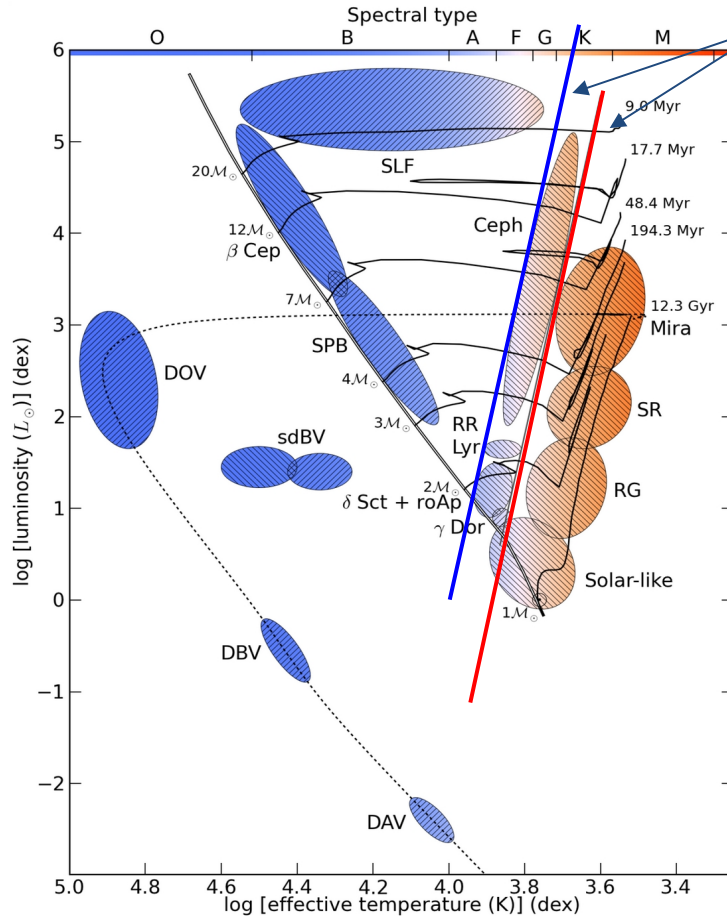
Pro radiálně pulzující hvězdy v pásu nestability platí pulzační rovnice

$$\Pi \sqrt{\rho} \approx Q$$

a vztah perioda-zářivý výkon

Čím větší hvězda, tím nižší hustota a tím delší perioda základního módu pulzací.

Teplotu můžeme v pásu nestability aproximovat jako konstantu a tedy zářivý výkon je hlavně funkcí rozměru. Odtud pak zmíněný vztah perioda-zářivý výkon



## Pás nestability

- oblast, ve které se mohou rozvinout radiální pulzace
- Teplota ideální k tomu, aby byla řídicí vrstva dostatečně hmotná a v ideální hloubce, aby se pulzace udržely

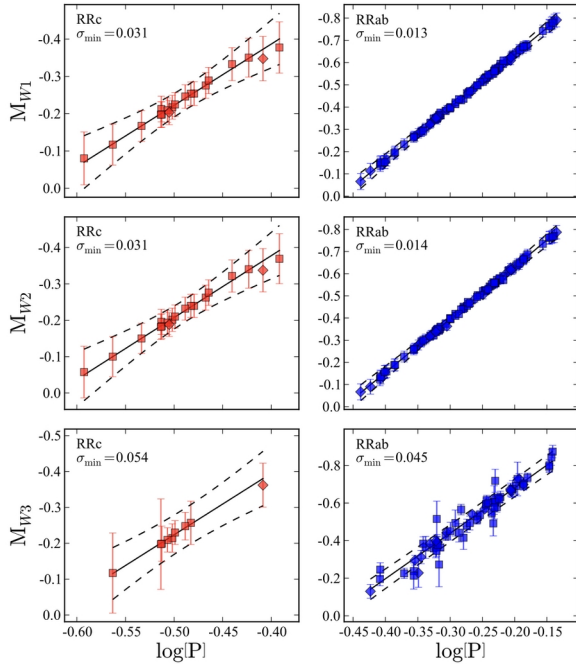
Červená hranice - vrstva je příliš hluboko, má malou výchylku, nastupuje konvekce

Modrá hranice - vrstva je příliš blízko povrchu a má nízkou hmotnost

Nelze obecně říct, co přesně definuje, jestli bude hvězda pulzovat v základním nebo v harmonickém módu. Zřejmě spojeno s tím, kde se nacházejí pro dané podmínky uzly kmitání.

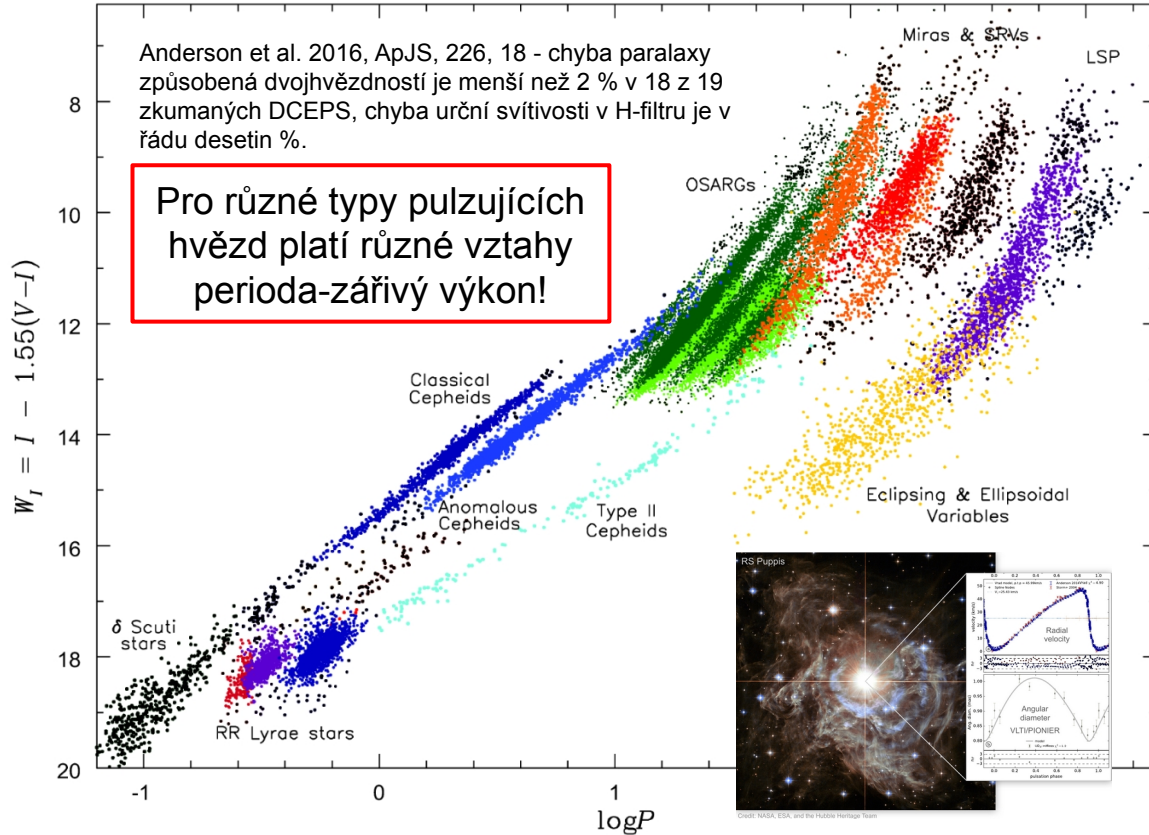


# Vztah perioda-zářivý výkon



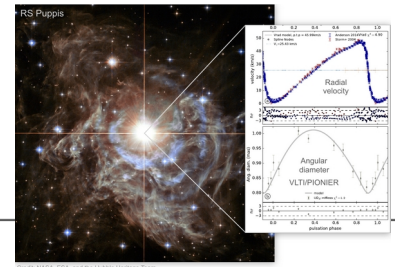
Klein et al. 2014, MNRAS, 440, 96 - WISE mid-IR RRL P-L vztahy

Vztah perioda-zářivý výkon může být ovlivněna dalšími faktory jako metalicita, dvojhvězdnost, přítomnost okolohvězdného materiálu, ...



Anderson et al. 2016, ApJS, 226, 18 - chyba paralaxy způsobená dvojhvězdností je menší než 2 % v 18 z 19 zkoumaných DCEPS, chyba určení svítivosti v H-filtru je v řádu desetin %.

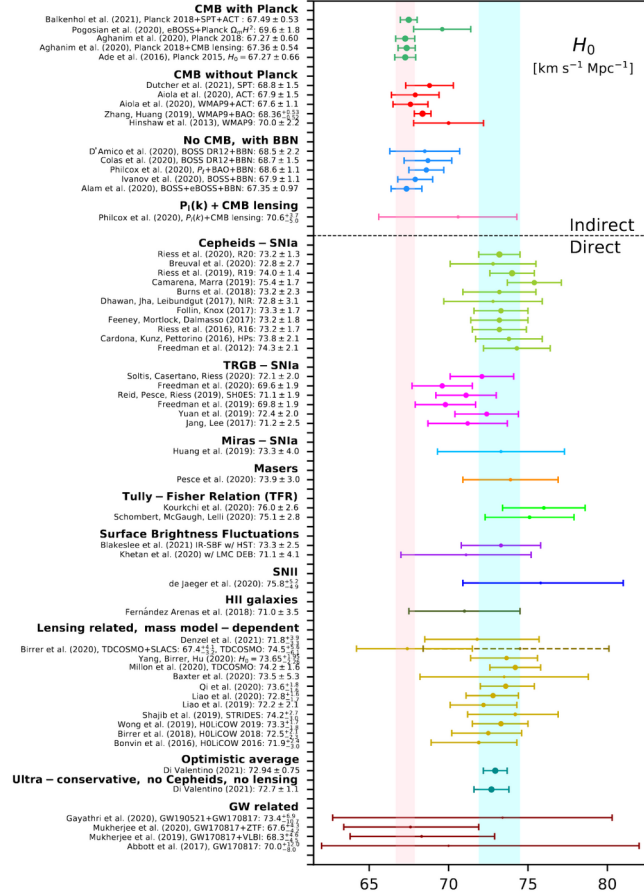
Pro různé typy pulzujících hvězd platí různé vztahy perioda-zářivý výkon!



Udalski, A. 2015, ASPC, 491, 278

# Vztah perioda-zářivý výkon

Di Valentino et al. 2021, CQG, 38, 15



Hubble tension - rozdíl mezi  $H_0$  odhadlou z CMB a standardních svíček (DCEPs+SN)

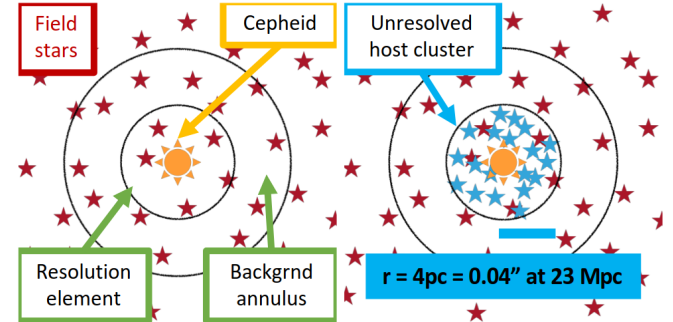
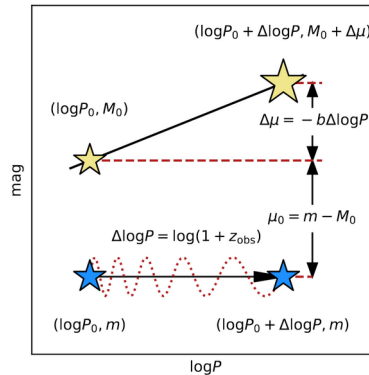
$$H_0 = 73.04 \pm 1.04 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1} \text{ (SH0ES, HST, Riess et al. 2022, ApJ, 934, 7)}$$



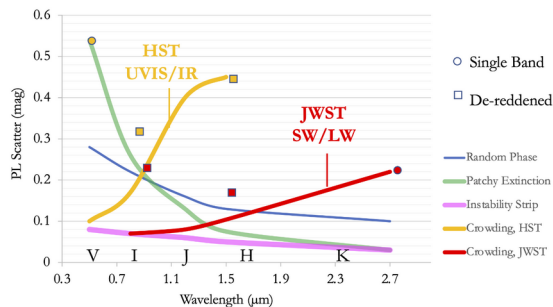
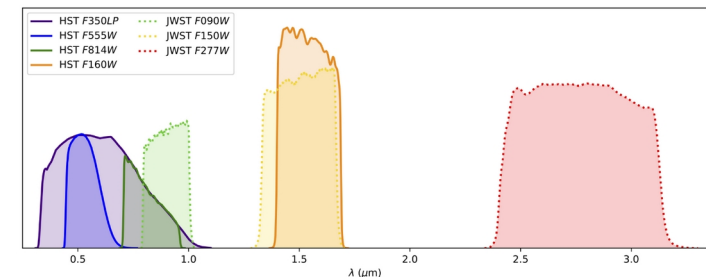
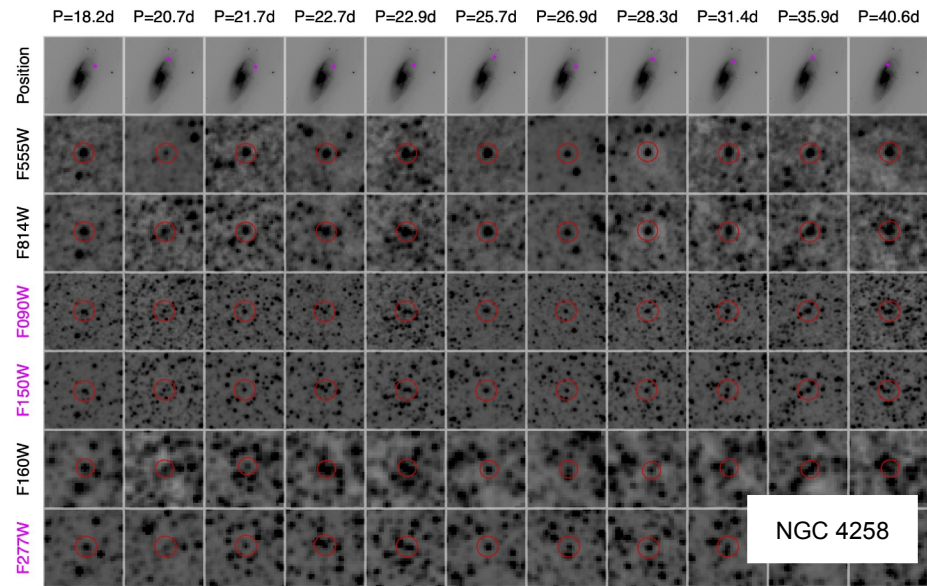
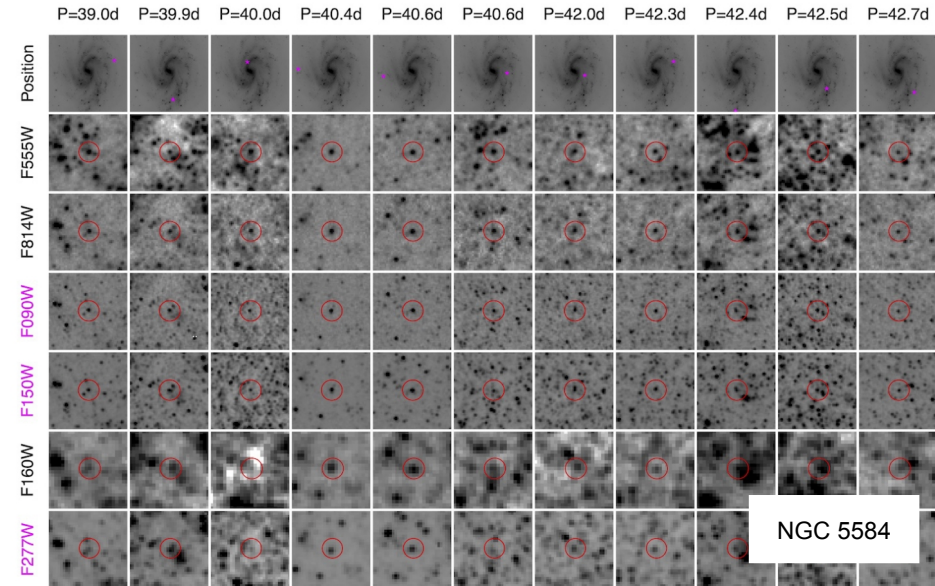
$$H_0 = 67.4 \pm 0.5 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1} \text{ (\Lambda CDM, Planck, Aghanim et al. 2020, A&A, 641, 6)}$$

Efekte, které je dále nutné vzít v potaz:

- Anderson 2019, A&A, 631, 165; Anderson 2022, A&A, 658, 148 - červený posuv, rotace galaxie, změna SED, kontaminace



# Vztah perioda-zářivý výkon



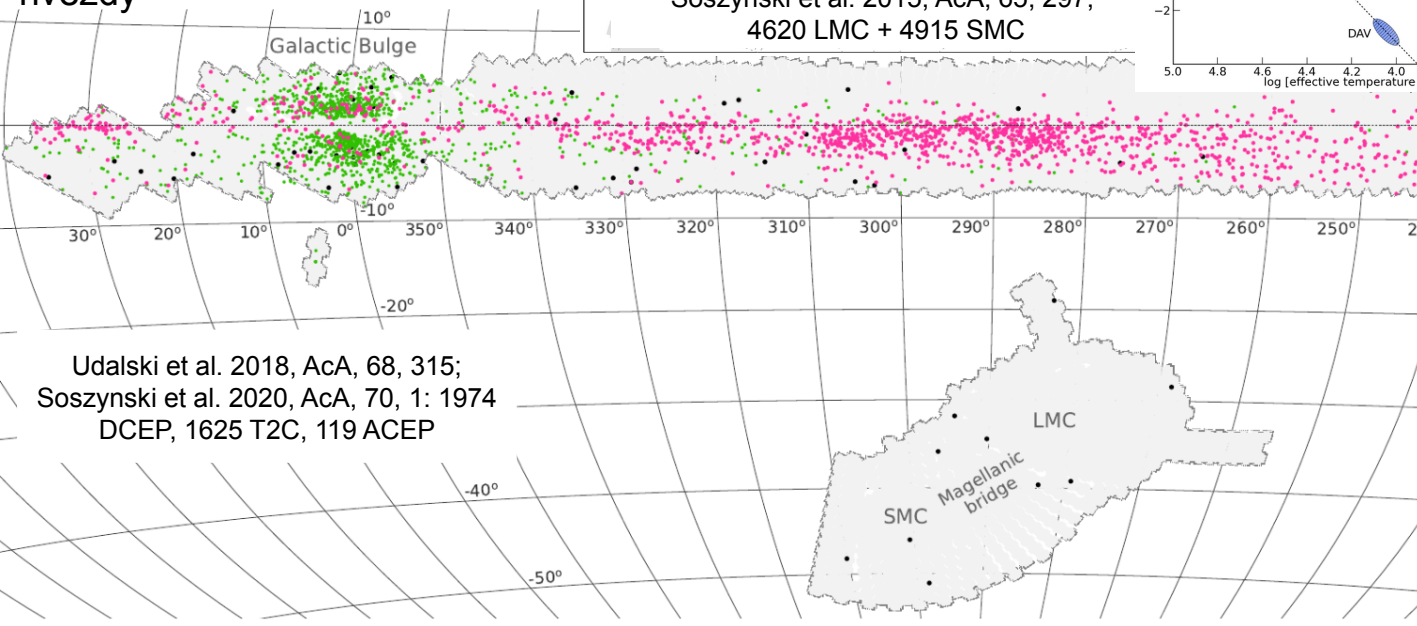
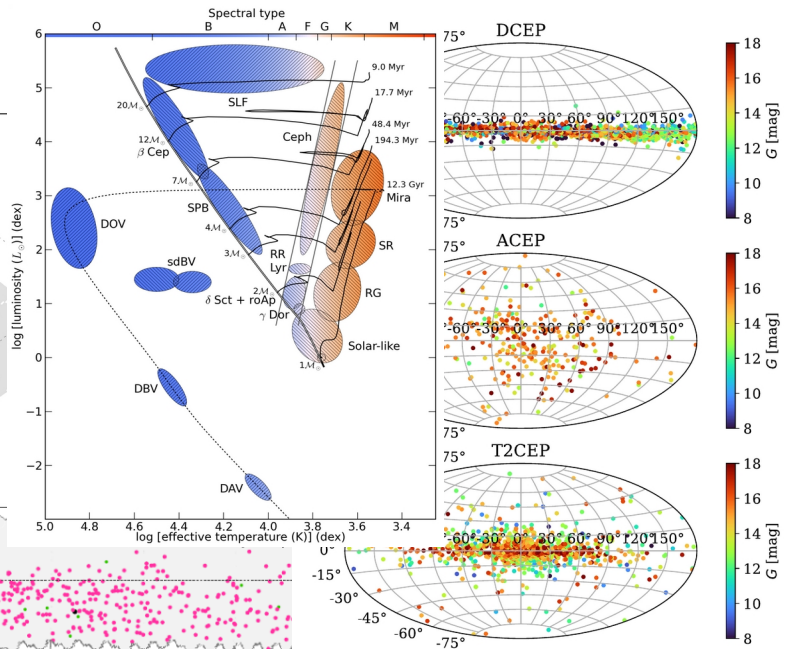
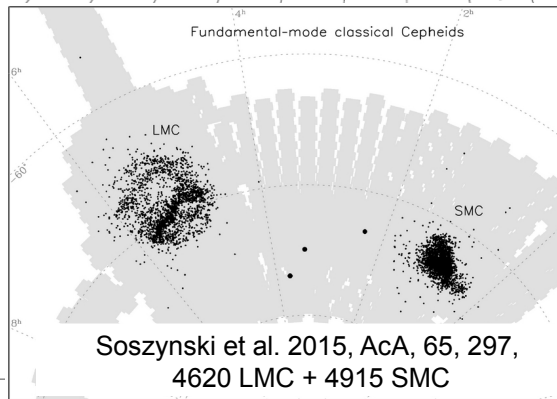
Riess et al. 2023,  
2023arXiv230715806R, možná  
kontaminace blízkými hvězdami není  
problém, HST dává stejné výsledky  
jako JWST

# Cefeidy

DCEP - klasické cefeidy,  
radiálně pulzující mladé hmotné  
hvězdy (do 100 miliónů let, 5-20  
Msun) spalující He v jádru.

T2CEP - staré, málo hmotné a  
vyvinuté hvězdy

ACEP - nejistý původ,  
pravděpodobně staré vyvinuté  
hvězdy



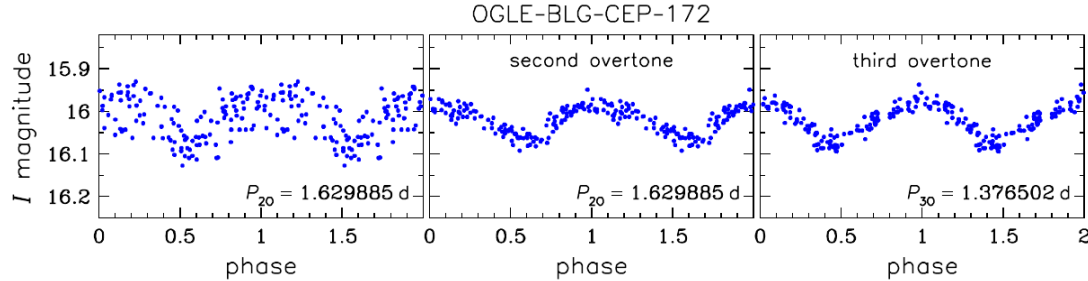
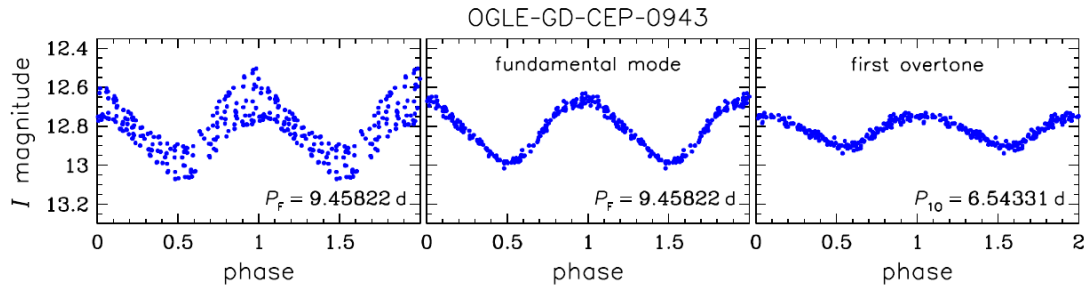
Udalski et al. 2018, AcA, 68, 315;  
Soszynski et al. 2020, AcA, 70, 1: 1974  
DCEP, 1625 T2C, 119 ACEP

Ripepi et al. 2023, A&A, 674, 17, Gaia DR3

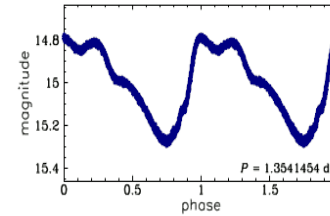
Type	All sky	LMC	SMC	M 31	M 33
DCEP F	2.008	2357	2487	309	173
DCEP 1O	1101	1931	1803	10	12
DCEP MULTI	195	58	110	-	-
DCEP Total	3304	4346	4400	319	185
ACEP F	150	69	87	-	-
ACEP 1O	132	32	80	-	-
ACEP Total	282	101	167	-	-
T2CEP BLHER	579	66	16	-	-
T2CEP WVIR	795	120	20	-	-
T2CEP RVTAU	261	30	13	2	-
T2CEP Total	1635	216	49	2	-
Cepheid Total	5221	4663	4616	321	185
OTHER	15	-	-	-	-
Reclassified	327	15	1	18	5
New	472	3	11	22	57

# Cefeidy

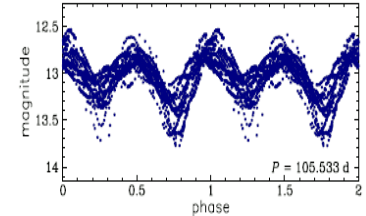
- 11, 9, 6 % DCEP v MW, LMC a SMC jsou vícenásobné nebo double-mode pulsatory - závislost na metalicitě (Soszynski et al. 2020, Aca, 70, 1)
- O2+O3 pulsatory jsou extrémně vzácné (jen 3 hvězdy)
- Jen 8 známých double-mode T2CEP (Smolec et al. 2018, 481, 3724, Udalski et al. 2018, Aca, 68, 315, Soszynski et al. 2020, Aca, 70, 1)



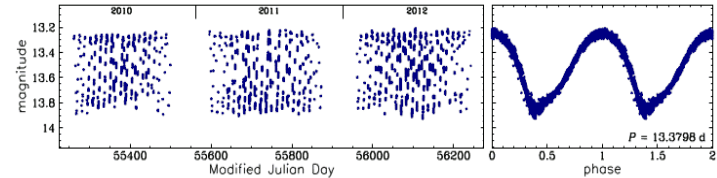
**BL Her**



**RV Tau**

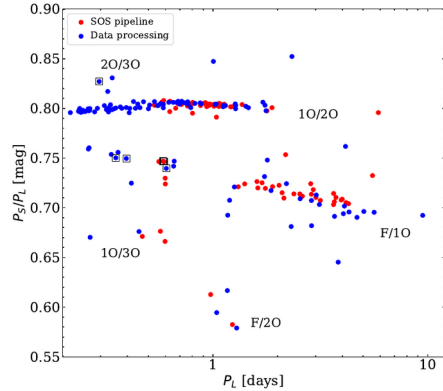


**W Vir**

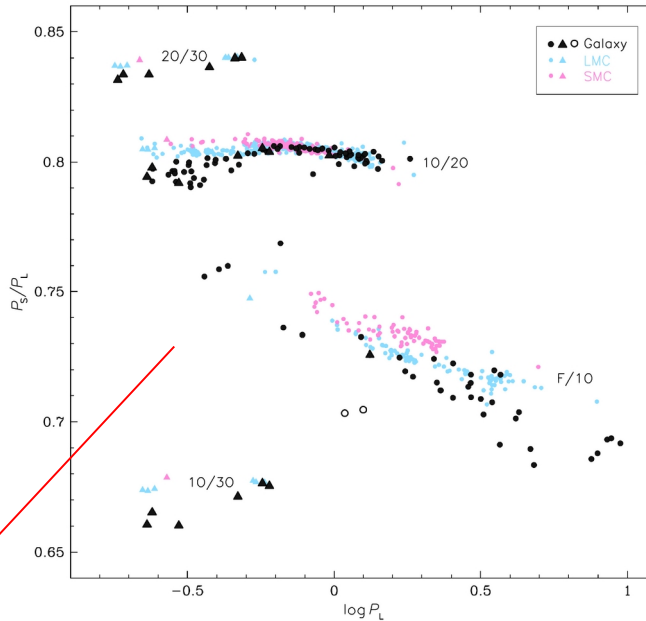


# Cefeidy

- 11, 9, 6 % DCEP v MW, LMC a SMC jsou vícenásobné nebo double-mode pulsatory - závislost na metalicitě (Soszynski et al. 2020, Aca, 70, 1)
- O2+O3 pulsatory jsou extrémně vzácné (jen 3 hvězdy)
- Jen 8 známých double-mode T2CEP (Smolec et al. 2018, 481, 3724, Udalski et al. 2018, Aca, 68, 315, Soszynski et al. 2020, Aca, 70, 1)



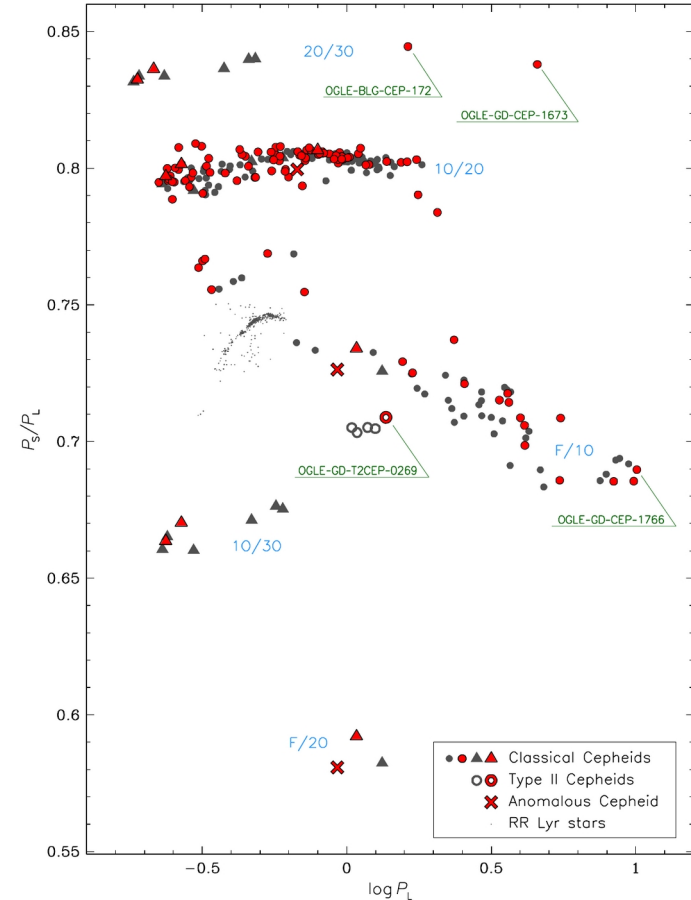
Ripepi et al. 2023, A&A, 674, 17, Gaia DR3



Udalski et al. 2018, Aca, 68, 315

Poměr  $P_S/P_L$  závisí na metalicitě

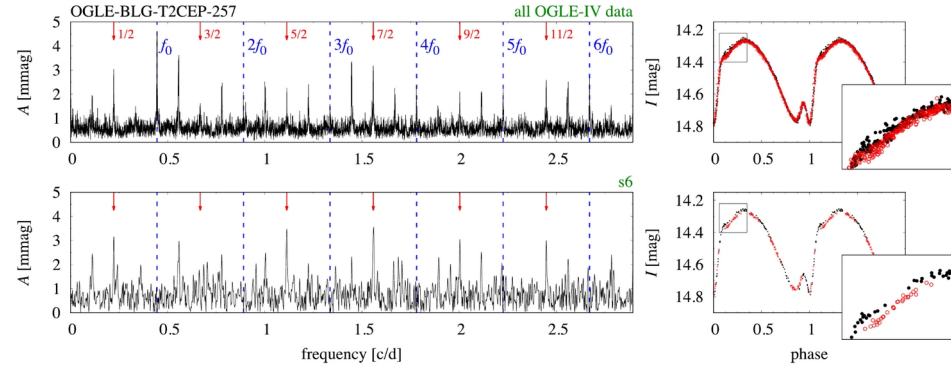
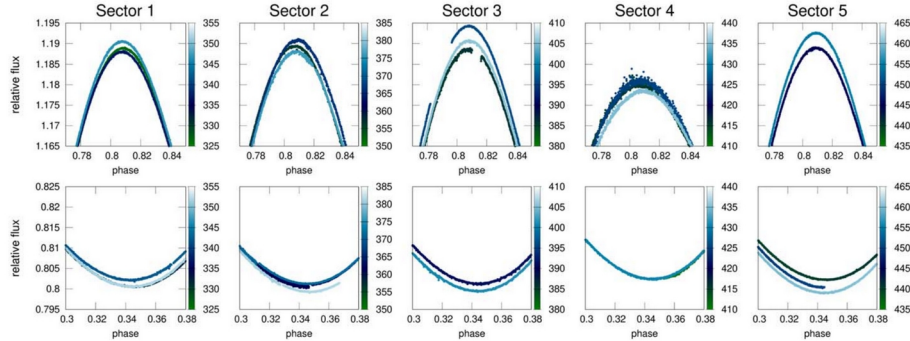
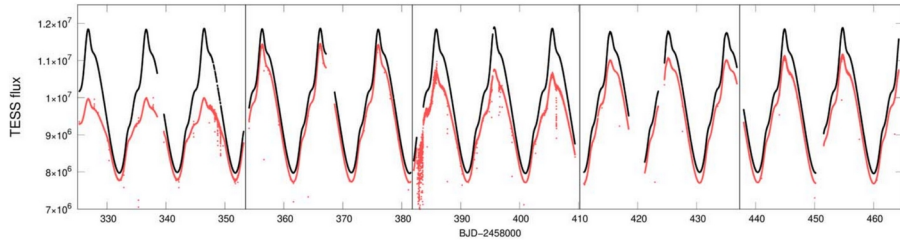
Soszynski et al. 2020, Aca, 70, 1



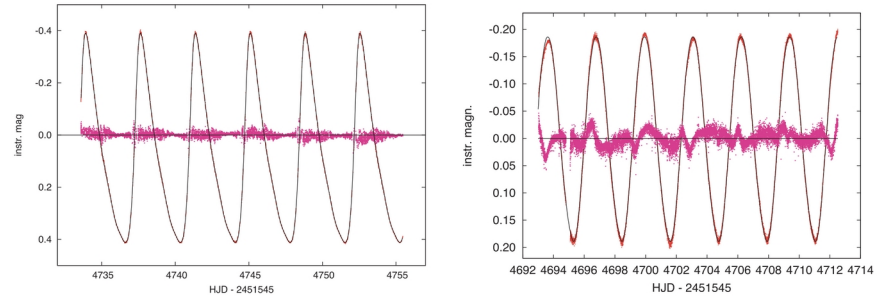
# Cefeidy

Dynamické efekty mezi cefeidami - změny mezi cykly, dlouhodobé modulace, period doubling, možné neradiální módy (zejména u ACEP, T2CEP)

Plachy et al. 2021, ApJS, 253, 11 - změny mezi cykly DCEP  $\beta$  Dor



Smolec et al. 2018, 481, 3724 - Dynamical phenomena in T2CEPs

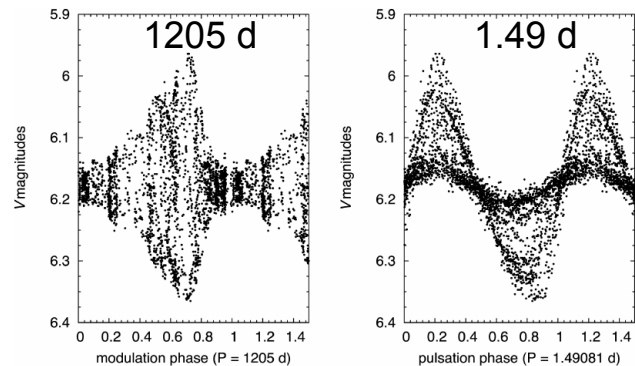
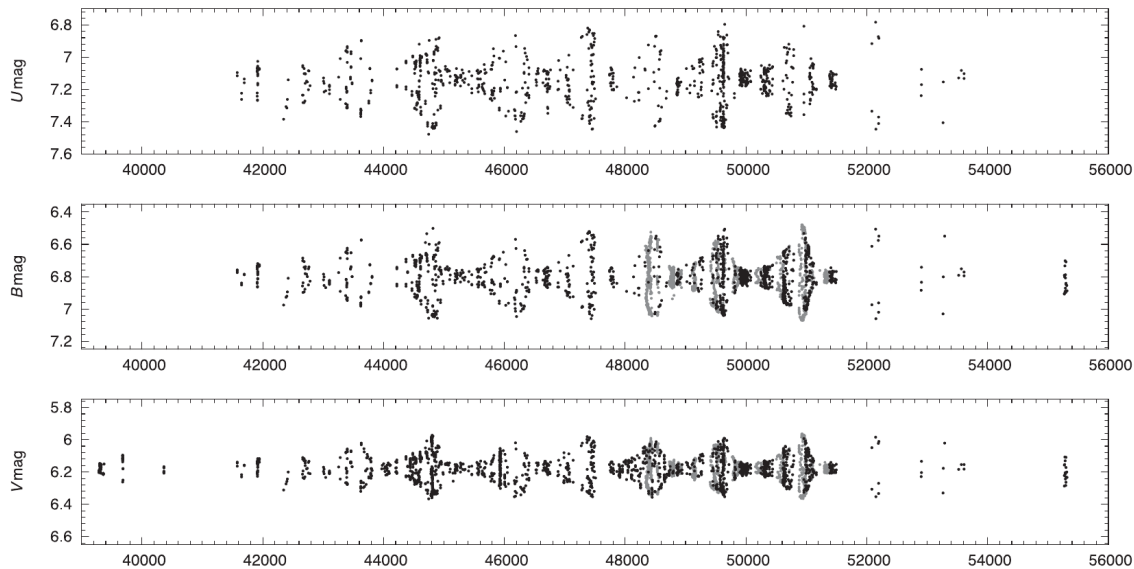


Evans et al., 2015MNRAS.446.4008E - další módy jsou více běžné mezi 10 pulzátory

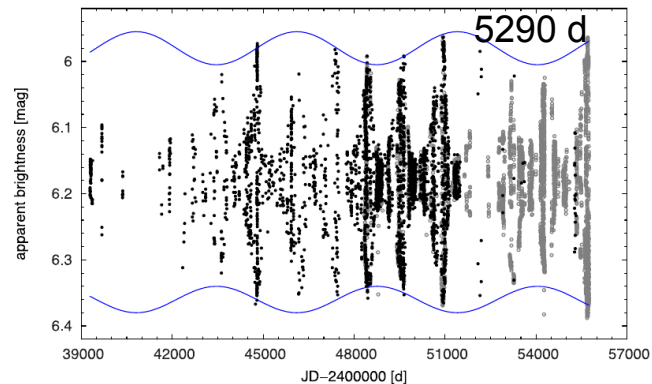


# Cefeidy

(kvazi)periodická dlouhodobá modulace světelné křivky - Blazhko effect; rezonance (beating) u multi-mode pulzátorů (DSCT, GDOR)



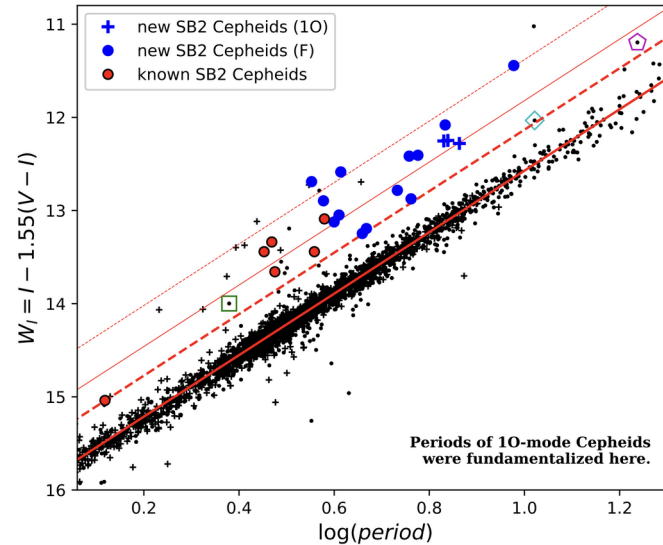
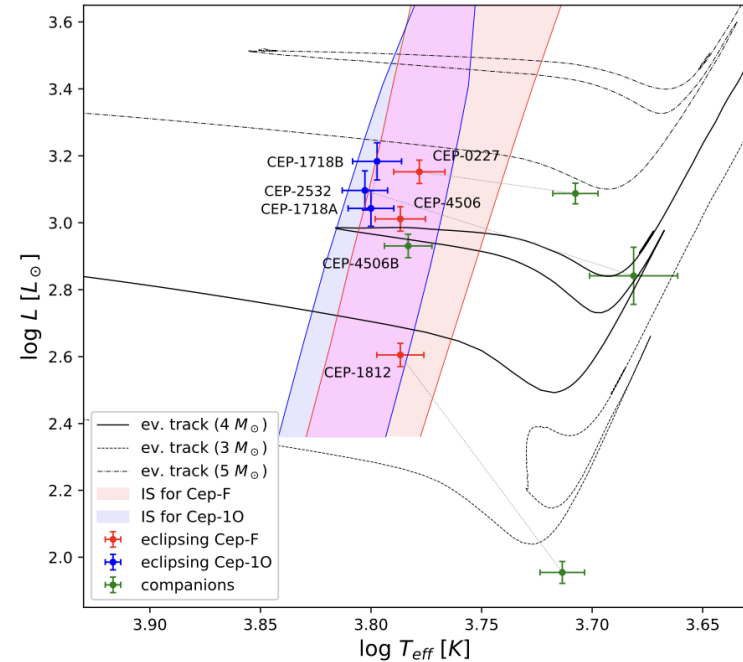
Molnár&Szabados 2014, MNRAS, 442, 3222 - V473 Lyr - O2 DCEP se dvěma modulačními periodami



# Cefeidy

Počet DCEPs ve vícenásobných systémech 30 -> 80 % (Evans et al. 2015, AJ, 150, 13 - 40 jasných DCEPs během desetiletí spektroskopicky, přesnost cca 1 km/s, 29+-8 %; Kervella et al. 2019A&A...623A.116K, na pm anomálii - mezi 100 nejbližšími DCEPS 67 vykazuje pm nebo jsou známy jako binární systémy, efektivita metody -> 80 %)

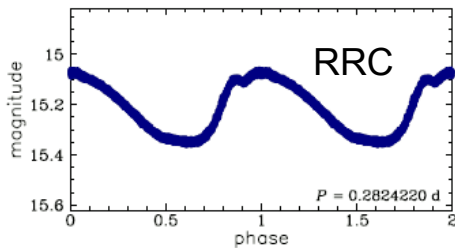
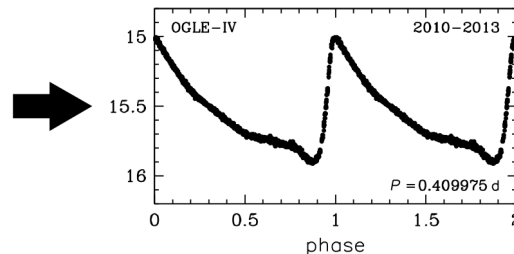
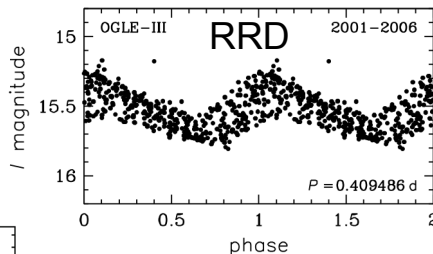
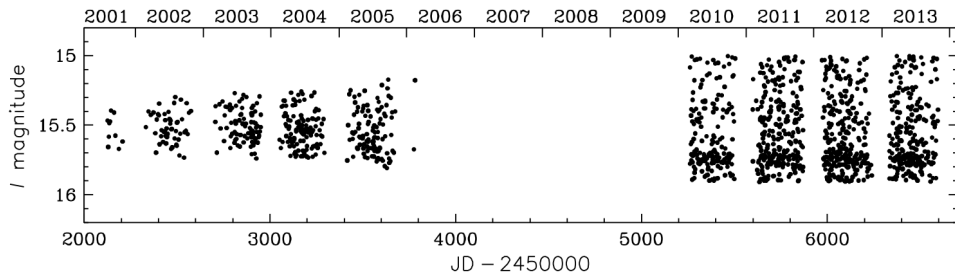
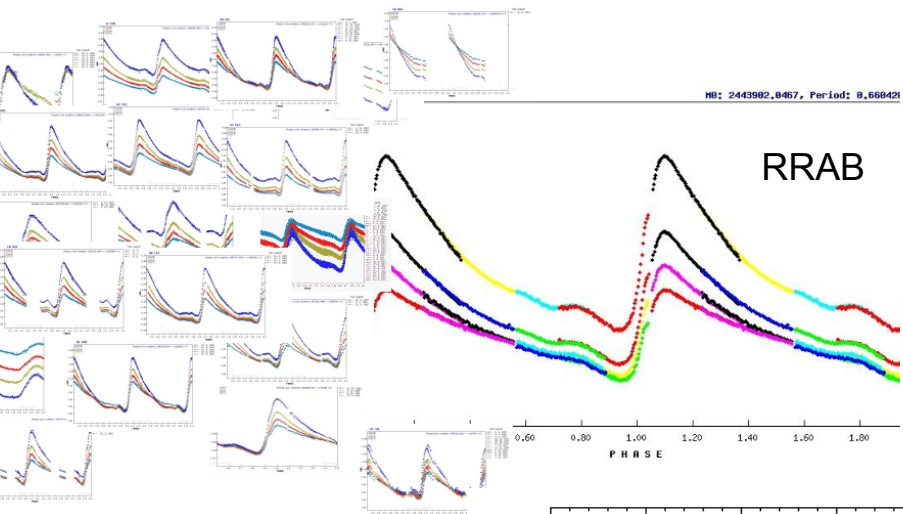
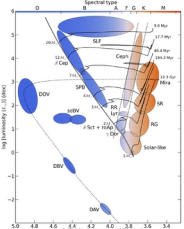
- Studie jsou limitovány na složky s vysokou hmotností, vše komplikováno pulzacemi



Pilecki et al. 2019, ApJ, 910, 118  
 - only 6 DCEPS are known to reside in binary systems - large discrepancies in masses for pulsation and evolutionary models (up to 20 %); 41 candidates, 16 out of 18 confirmed SB2 binaries, till then only 11 systems from which only 5 SB2

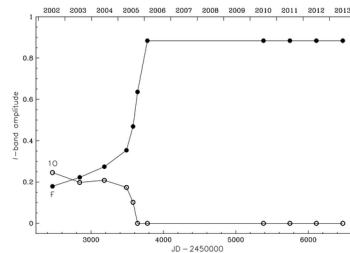
# Hvězdy typu RR Lyrae

Vyvinuté, málo hmotné hvězdy horizontální větve obrů (typicky mezi 0.5 a 0.8 Msun), pulzují hlavně v základním módu (72 %) a 1O (27 %) 0.5, 5, 11 % RRLs v MW, LMC a SMC jsou multi- nebo double-mode pulzátory - naopak než DCEPs! (Soszynski et al. 2019, Aca, 69, 321 - 78000 RRLs from the Galactic bulge and disk from OGLE)



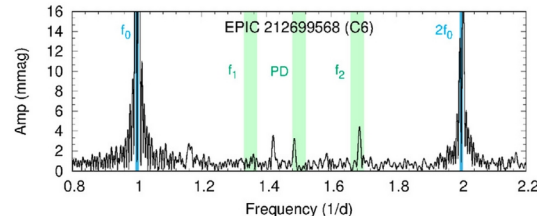
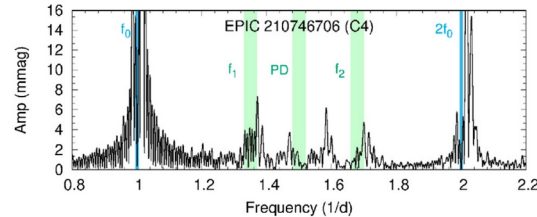
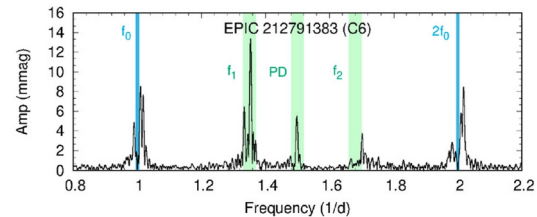
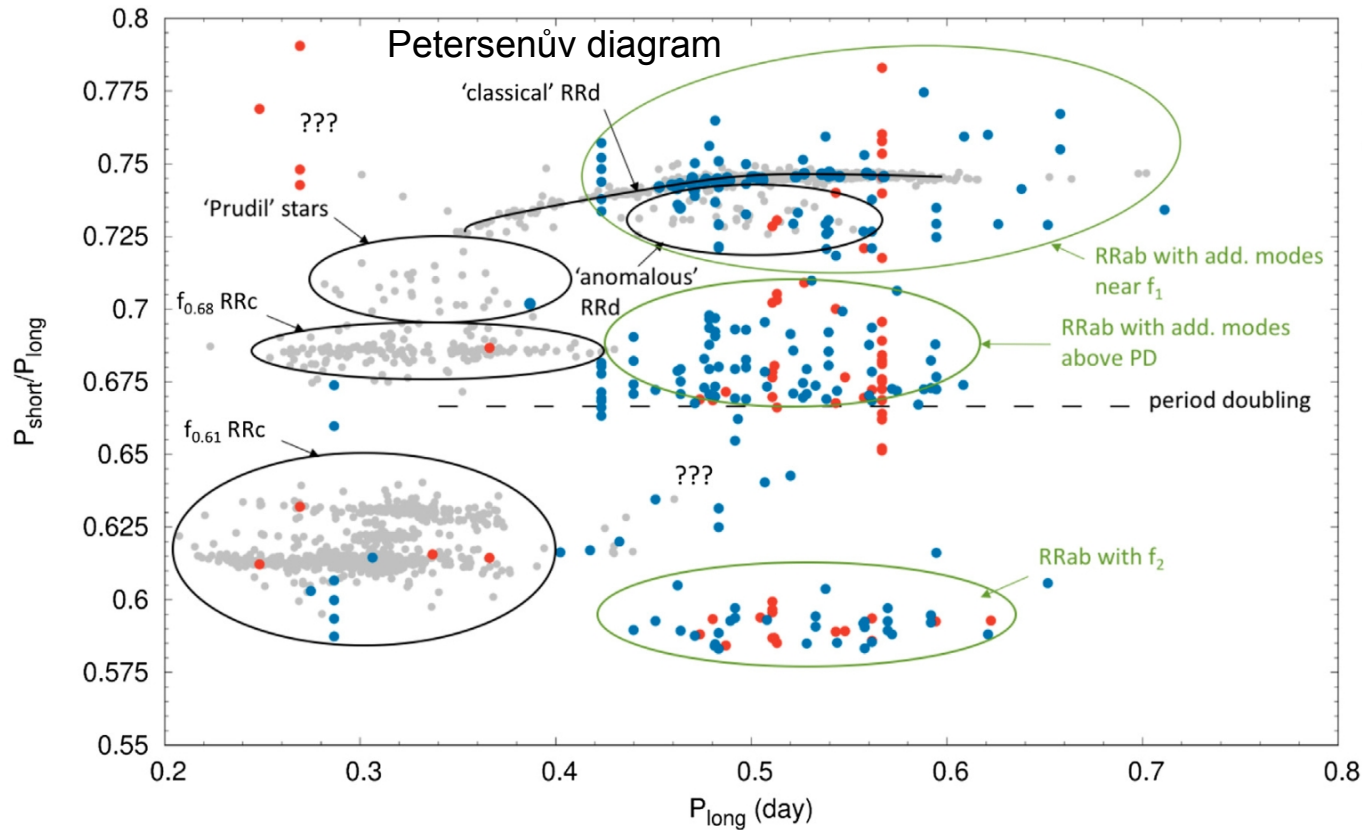
Pulzující hvězdy obecně mají vyšší amplitudy v modré oblasti spektra než v červené!

Soszynski et al. 2014, Aca, 64, 1 - přepnutí módu pulzací RRL



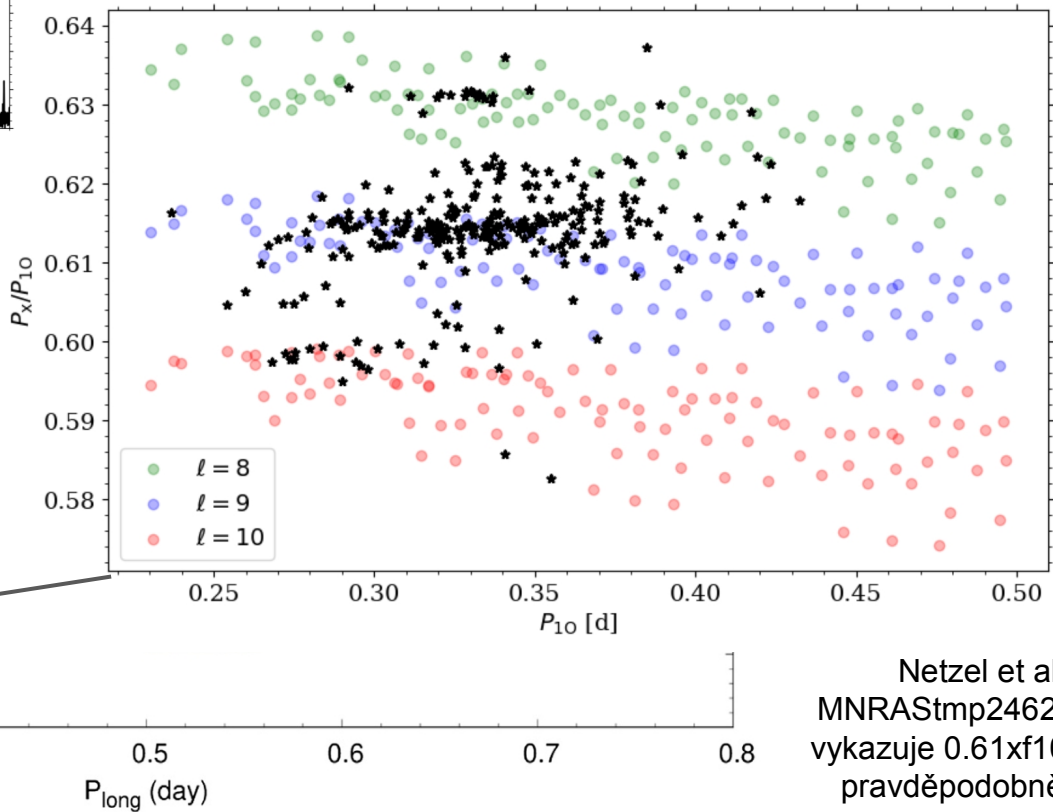
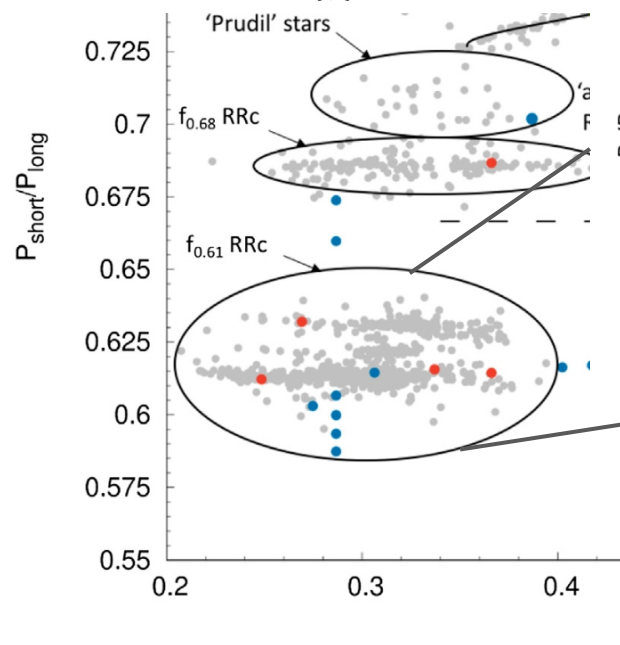
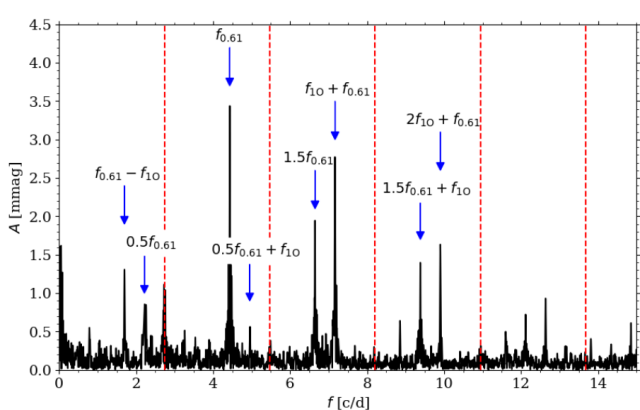
# Hvězdy typu RR Lyrae

RRLs (hlavně RRc) vykazují další dynamické efekty jako period doubling či neradiální pulzace



Plachy&Szabo 2021, FrASS, 7, 81

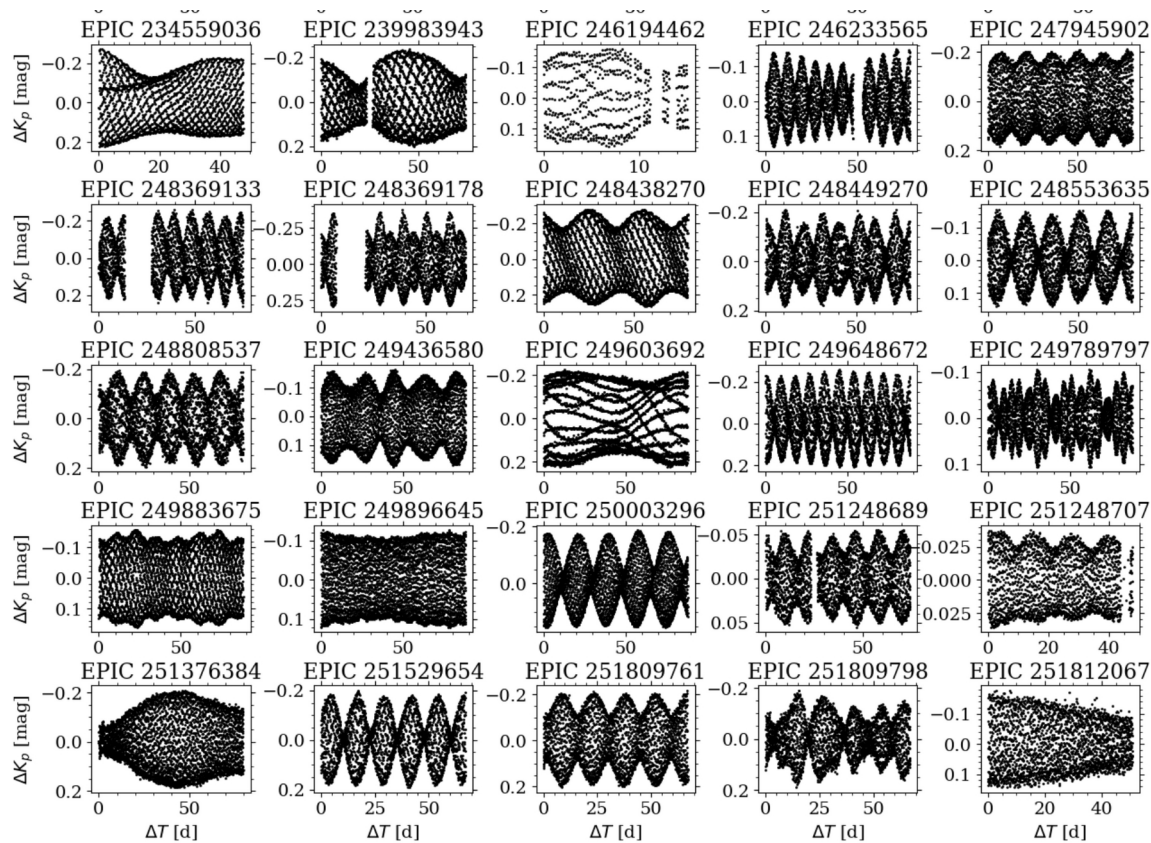
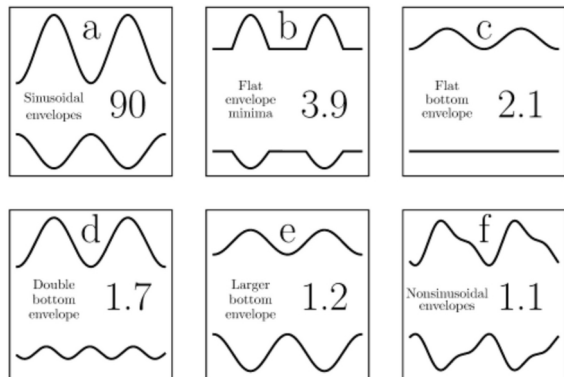
# žvzdy typu RR Lyrae



Netzel et al. 2023,  
MNRASmp2462 - 62 % RRC  
vykazuje 0.61xf10 módy, velmi  
pravděpodobně neradiální  
pulzace

# Blažkův jev

V závislosti na vlastnostech dat se Blažkův jev vyskytuje mezi 30-50 % RRab a 5-15 % RRC hvězd

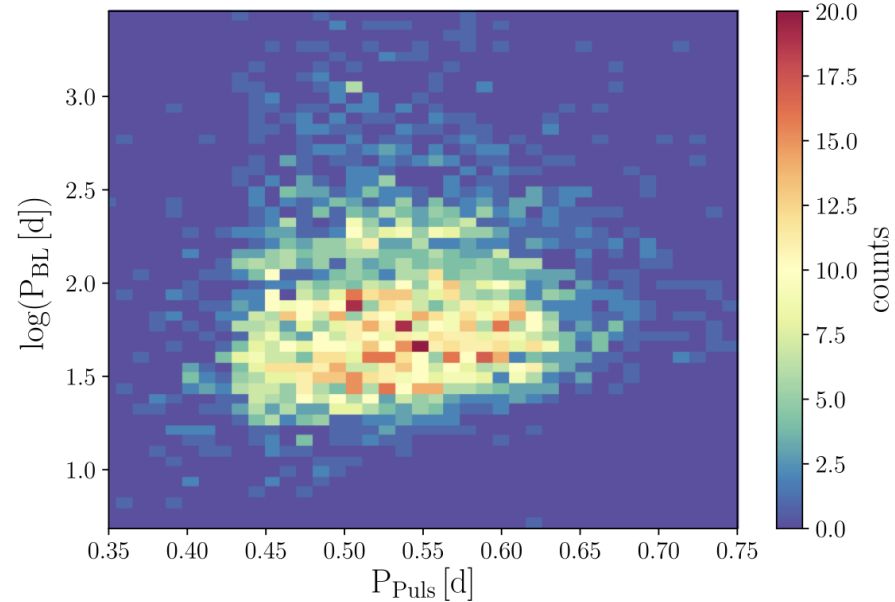
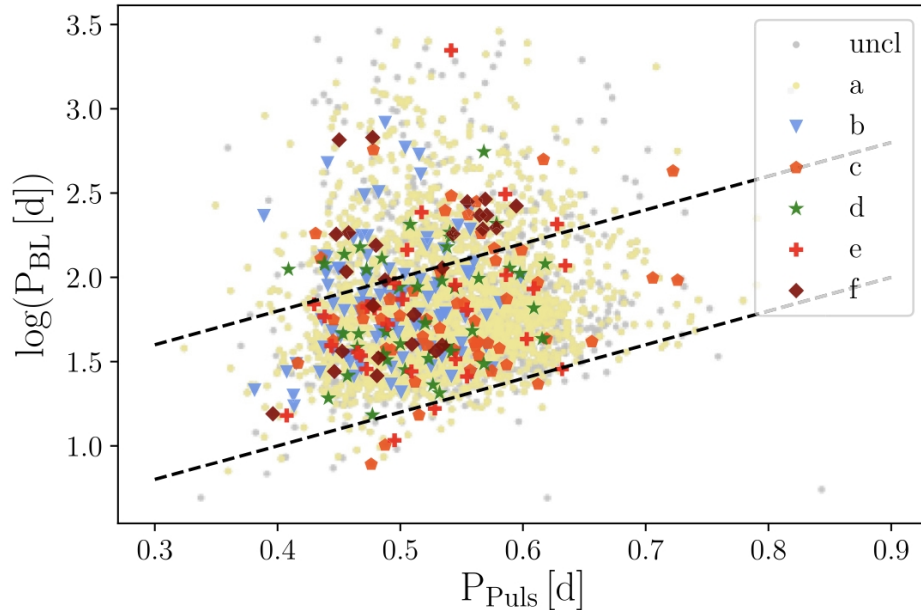


Skarka et al. 2020, MNRAS, 494, 1237 - 3141 RRab BL hvězdy z Galaktické výdutě GB, hvězdy s delší pulzační periodou mají tendenci mít menší modulační amplitudy, cca 90 % modulovaných hvězd má stejný typ modulační obálky

Netzel et al. 2023, MNRASmp2462 - 15 % RRC jsou modulovány

# Blažkův jev

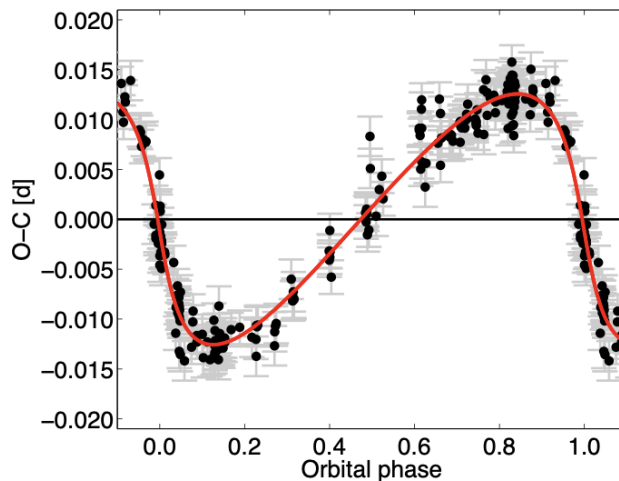
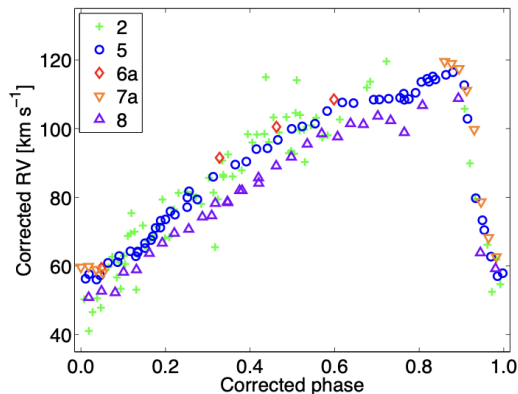
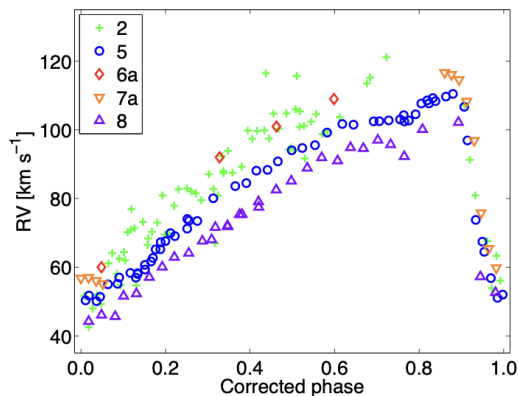
Modulační periody jsou mezi dny až desítkami let



Skarka et al. 2020, MNRAS, 494, 1237 - Spodní limit pro modulační periody, Blazhko valley (horní čárkovaná čára v levém obrázku - malé zastoupení modulovaných hvězd s danými modulačními periodami)

Kolláth 2018, pas6.conf, 137 - Nejpravděpodobnější vysvětlení Blažkova jevu je 9:2 rezonance mezi F a O9 módy

# Binarity among RR Lyrae stars



Kervella et al. 2019, A&A, 623, 116

- hmotnost souputníka cca 2 Ms

- dalších 7 kandidátů - **potřeba dlouhodobého spektroskopického monitoringu**

## Adopted parameters

Parallax from GDR2 $\varpi$	$1.592 \pm 0.063$ mas
Mass of RRL $m_1$	$0.6 \pm 0.1 M_{\odot}$

## Parameters from Liška et al. (2016a)

Orbital period $P$	$8499 \pm 29$ d
Eccentricity $e$	$0.686 \pm 0.025$
Arg. of periastron $\omega$	$184 \pm 2$ deg
$v_r$ amplitude $K_1$	$5.2 \pm 0.4$ km s $^{-1}$
$v_r$ at Hip epoch	$+0.33 \pm 0.16$ km s $^{-1}$
$v_r$ at GDR2 epoch	$+0.83 \pm 0.14$ km s $^{-1}$

## PMA vectors

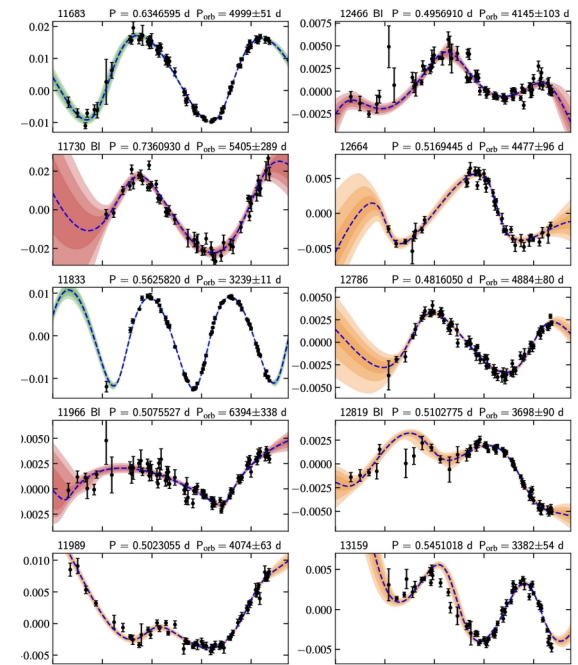
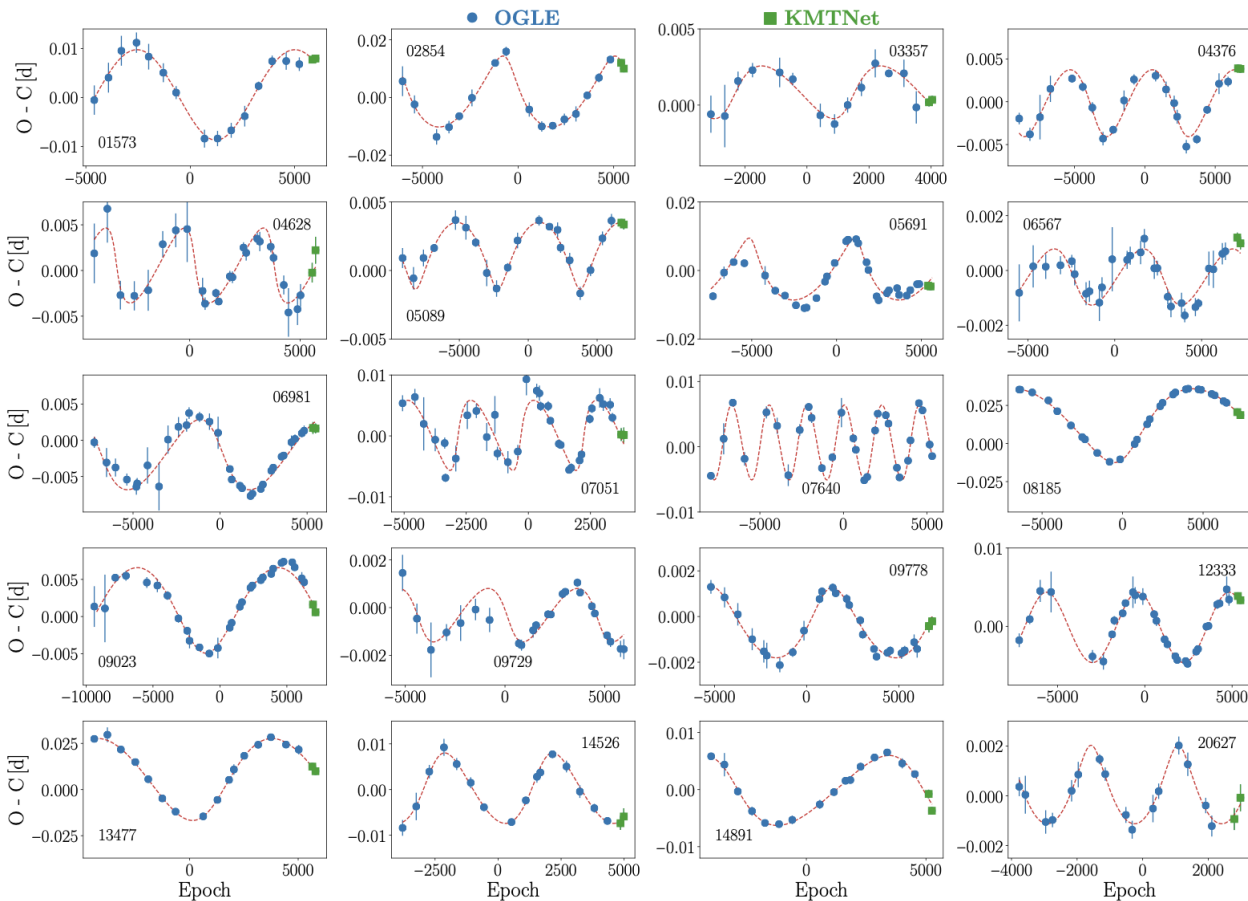
$\mu_{\text{Hip}}$	$[+0.2_{\pm 1.1}, +3.0_{\pm 1.1}]$ mas a $^{-1}$
$\mu_{\text{G2}}$	$[+0.75_{\pm 0.12}, +0.30_{\pm 0.14}]$ mas a $^{-1}$

## Parameters from present analysis

Inclination $i$	$160 \pm 6$ deg
Semimajor axis $a$	$11.18 \pm 0.51$ au
Ang. semimajor axis $\theta$	$17.8 \pm 1.1$ mas
Long. of asc. node $\Omega$	$358 \pm 23$ deg
Mass of secondary $m_2$	$1.98 \pm 0.33 M_{\odot}$



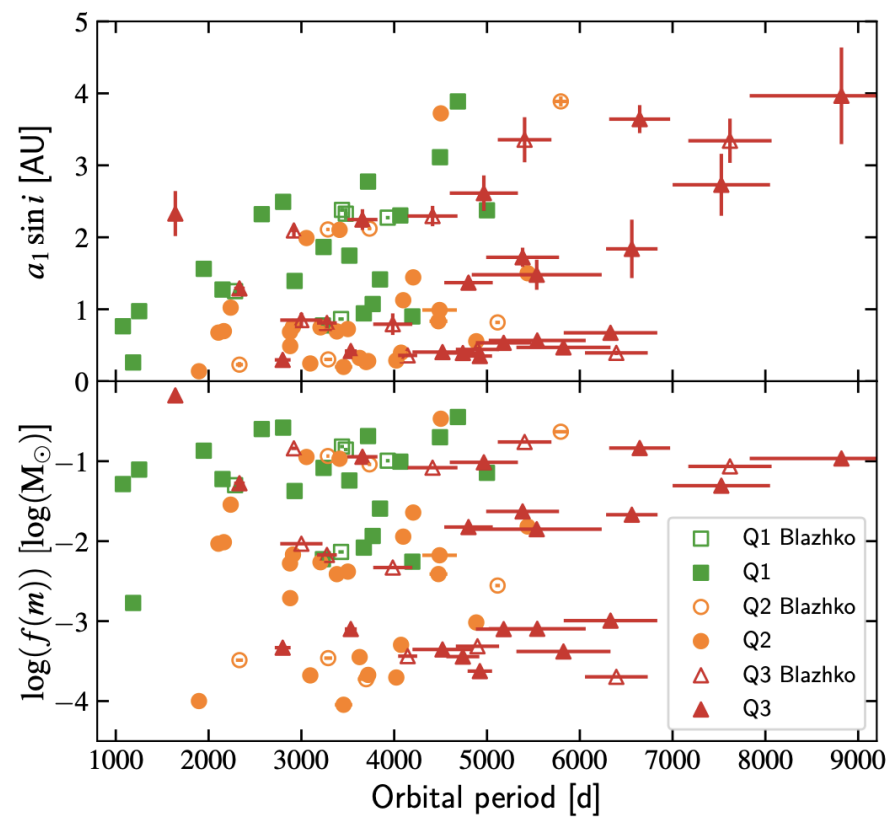
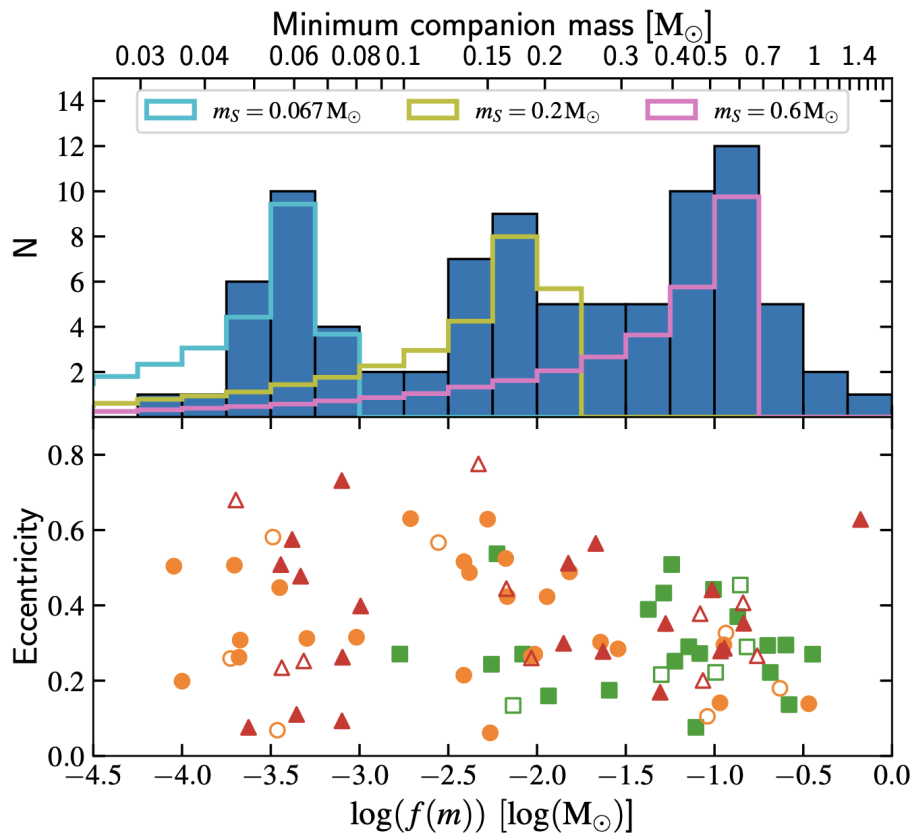
# Binarity among RR Lyrae stars



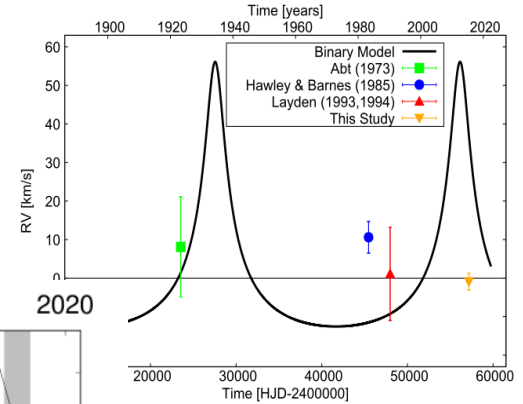
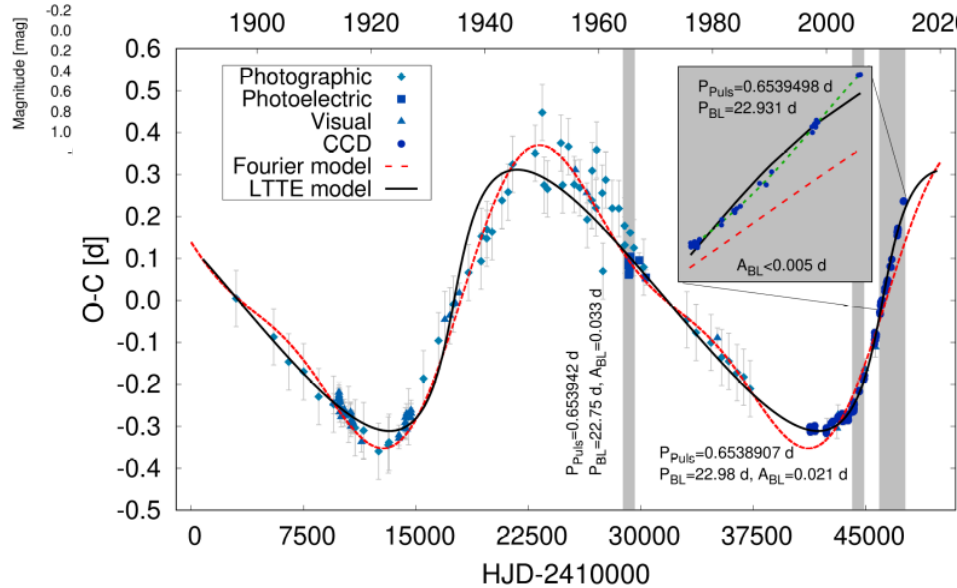
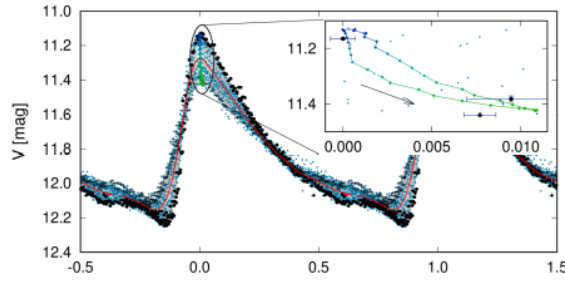
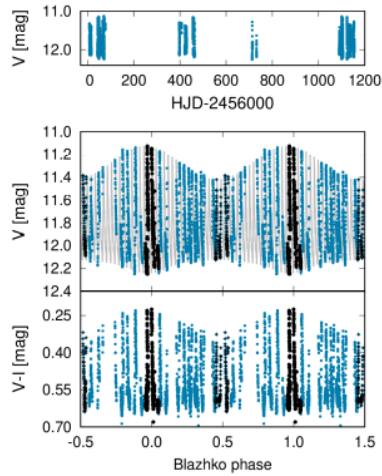
Hajdu et al. 2021, ApJ, 915, 50 - 87 binárních kandidátů z GB

Prudil, Skarka, et al. 2019, MNRAS, 487, 1 - 20 dvojhvězdných kandidátů z Galaktické výdutě

# Binarity among RR Lyrae stars



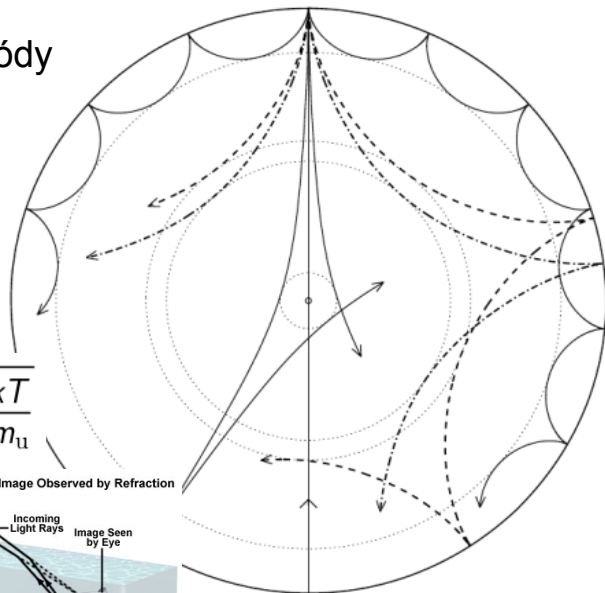
# Binarity among RR Lyrae stars



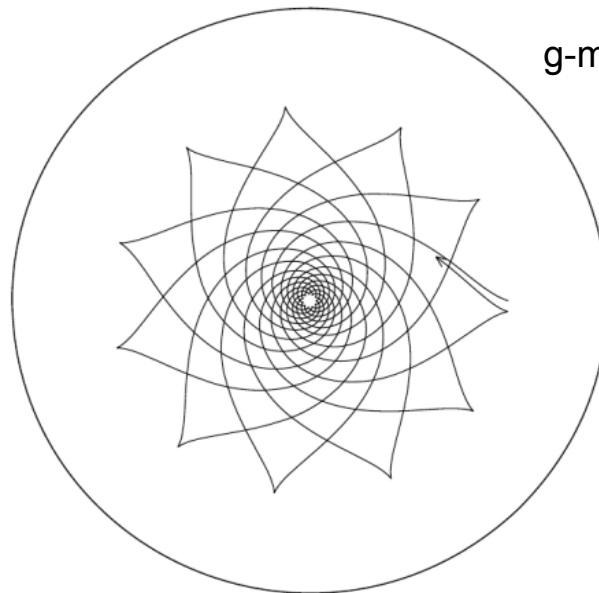
# Excitační mechanismy II

- p-módy (pressure) - výchylky v radiálním směru, vnější obálka, vyšší frekvence, stochastický charakter
- g-módy (vztlaková síla) - neradiální výchylky, hlubší vrstvy hvězdy, nižší frekvence

p-módy



g-módy



$$c = \sqrt{\frac{\gamma p}{\rho}} = \sqrt{\frac{\gamma k T}{\mu m_{\text{H}}}}$$

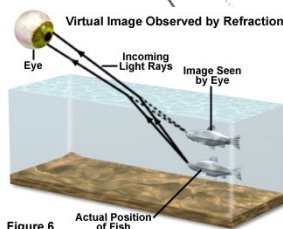


Figure 6

# Excitační mechanismy II

- p-módy (pressure) - výchylky v radiálním směru, vnější obálka, vyšší frekvence, stochastický charakter
- g-módy (vztlaková síla) - neradiální výchylky, hlubší vrstvy hvězdy, nižší frekvence

Vlnění se může šířit pouze v určitých místech hvězdy, kde  $k_r > 0$

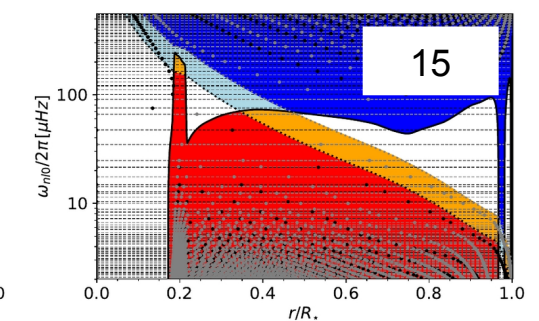
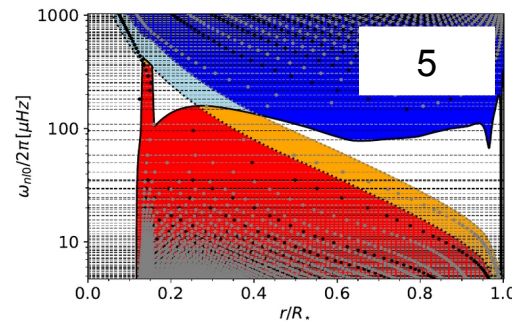
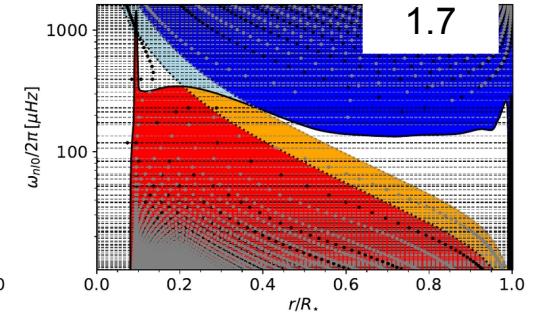
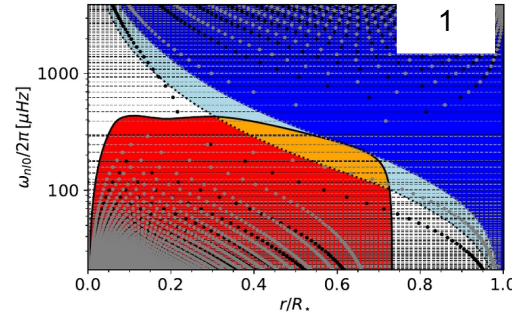
$$k_r = \frac{1}{\nu^2 c_0^2} (L_l^2 - \nu^2) (\nu^2 - N^2)$$

Brunt-Väisälä frekvence

$$N^2 = g_0 \left[ \frac{1}{\Gamma_{1,0}} \frac{d \ln \rho_0}{dr} - \frac{d \ln \rho_0}{dr} \right]$$

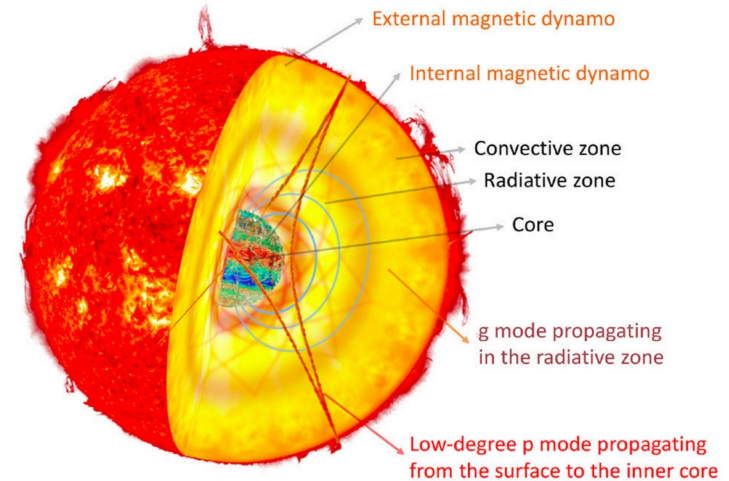
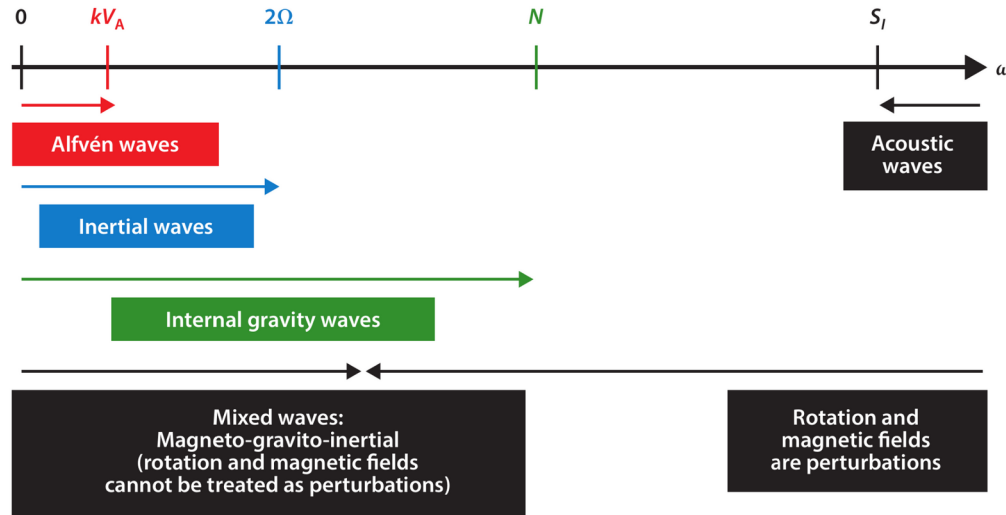
Lambova frekvence

$$L_l^2 = \frac{l(l+1)}{r^2} c_0^2$$



# Excitační mechanismy II

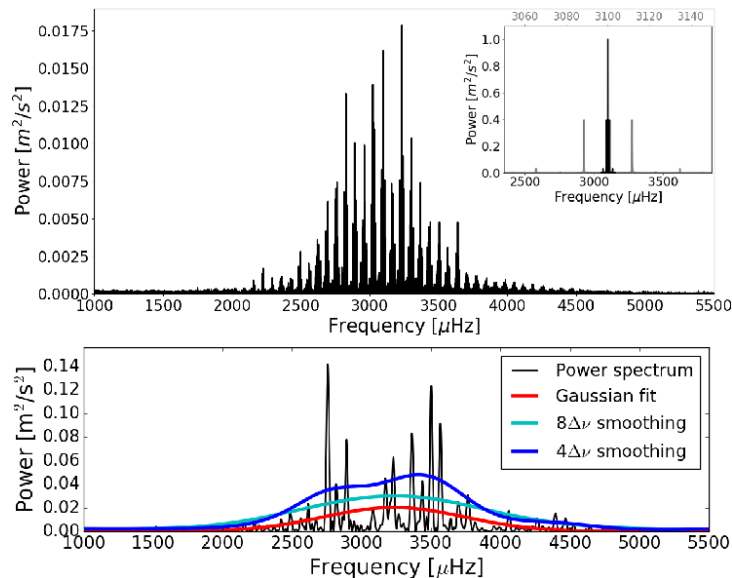
- p-módy (pressure) - výchylky v radiálním směru, vnější obálka, vyšší frekvence, stochastický charakter
- g-módy (vztlaková síla) - neradiální výchylky, hlubší vrstvy hvězdy, nižší frekvence
- r-modes (Coriolisova síla)
- Alfvén (Lorentzova síla)
- Slapově indukované (gravitace)



# Excitační mechanismy II

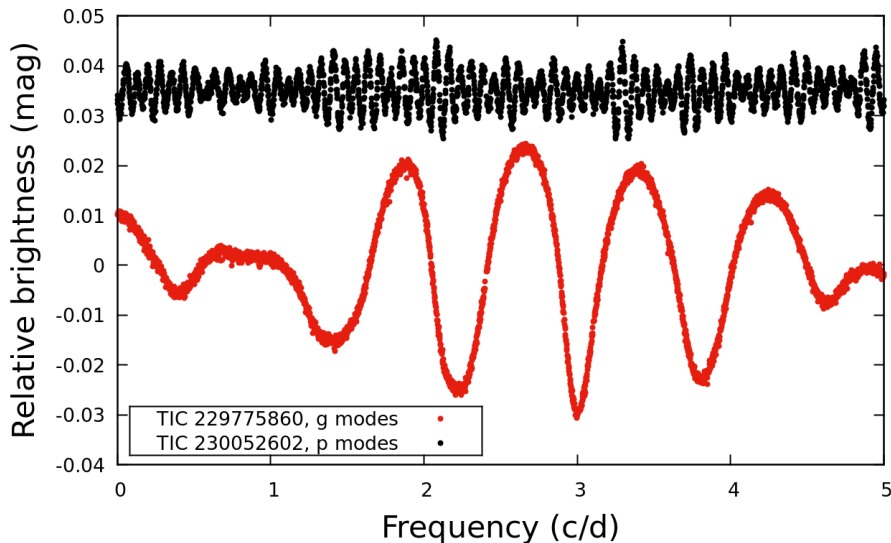
- p-módy (pressure) - výchylky v radiálním směru, vnější obálka, vyšší frekvence, stochastický charakter
- g-módy (vztlaková síla) - neradiální výchylky, hlubší vrstvy hvězdy, nižší frekvence

Oscilace slunečního typu jsou stochastické



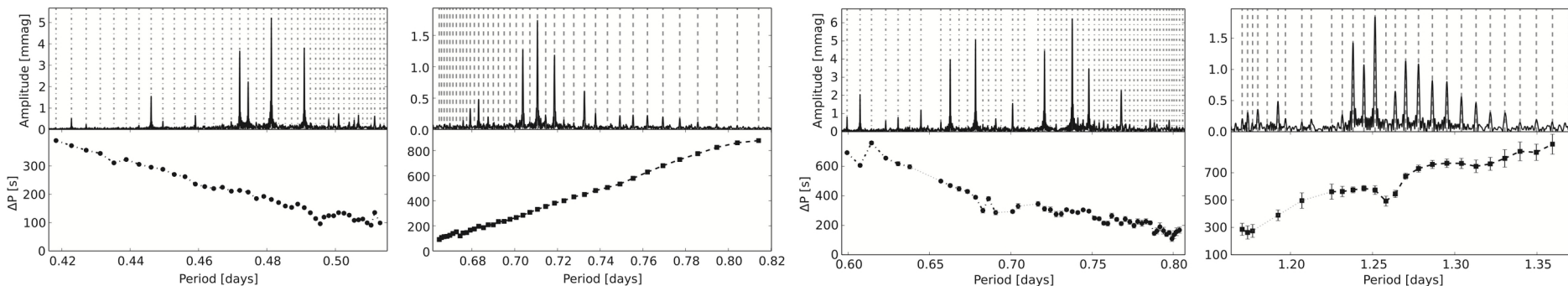
Andersen et al. 2019, A&A, 623, L9 - the Sun, RVs - 57 versus 1 day

Pulzace horkých hvězd (SPB, BCP, DSCT, GDOR) jsou víceméně stabilní



# Excitační mechanismy II

- p-módy (pressure) - výchylky v radiálním směru, vnější obálka, vyšší frekvence, stochastický charakter
- g-módy (vztlaková síla) - neradiální výchylky, hlubší vrstvy hvězdy, nižší frekvence
- r-modes (Coriolisova síla) - prográdní ( $m>0$ ) a retrográdní ( $m<0$ ) módy

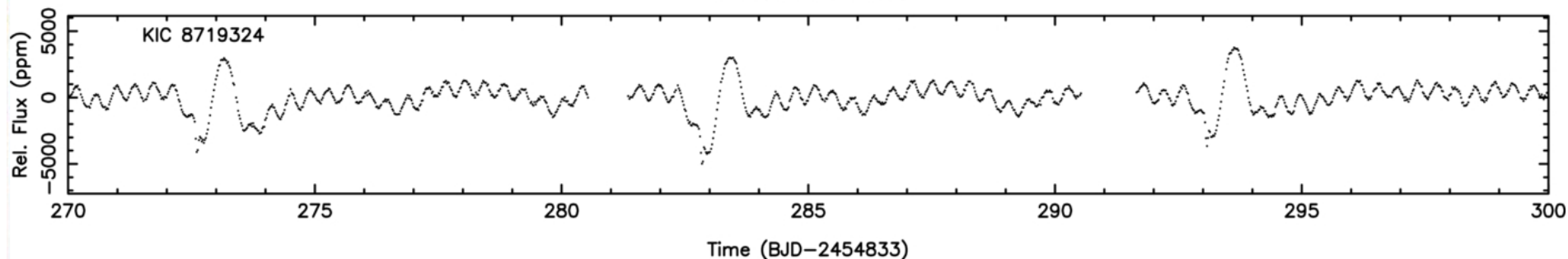
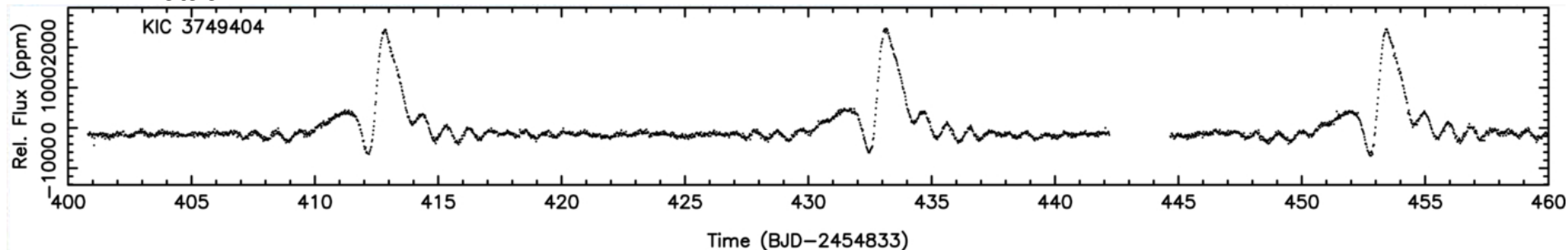


Van Reeth et al. 2015, ApJ, 218, 27 - Rotace vnitřních částí hvězdy z analýzy vzdáleností píků g-módů - vzestupný trend prográdní módy, sestupný trend retrográdní módy.



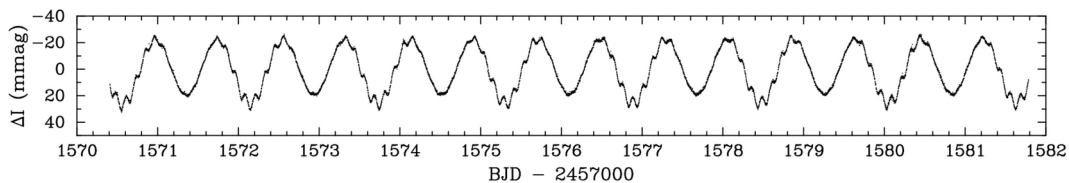
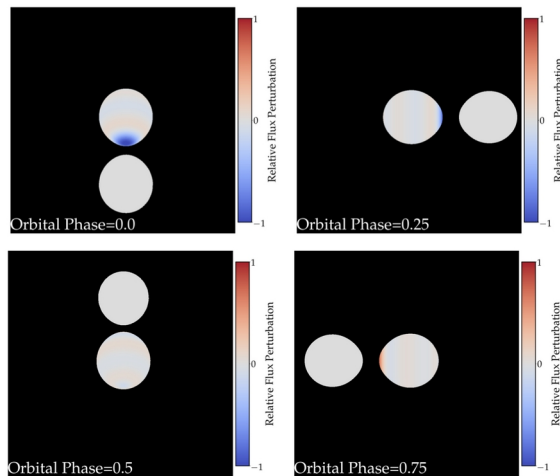
# Excitační mechanismy II

- p-módy (pressure) - výchylky v radiálním směru, vnější obálka, vyšší frekvence, stochastický charakter
- g-módy (vztlaková síla) - neradiální výchylky, hlubší vrstvy hvězdy, nižší frekvence
- r-modes (Coriolisova síla) - prográdní ( $m > 0$ ) a retrográdní ( $m < 0$ ) módy
- Alfvén (Lorentzova síla) - dosud spíše hypotetické
- Slapově indukované (gravitace) - v excentrických systémech + v těsných systémech s vázanou rotací

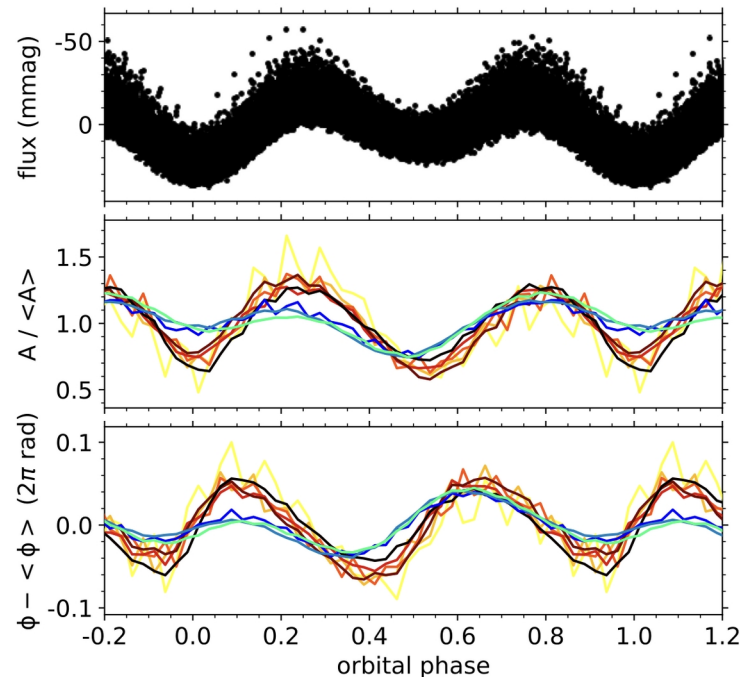


# Excitační mechanismy II

- Slapově indukované (gravitace) - v excentrických systémech + v těsných systémech s vázanou rotací



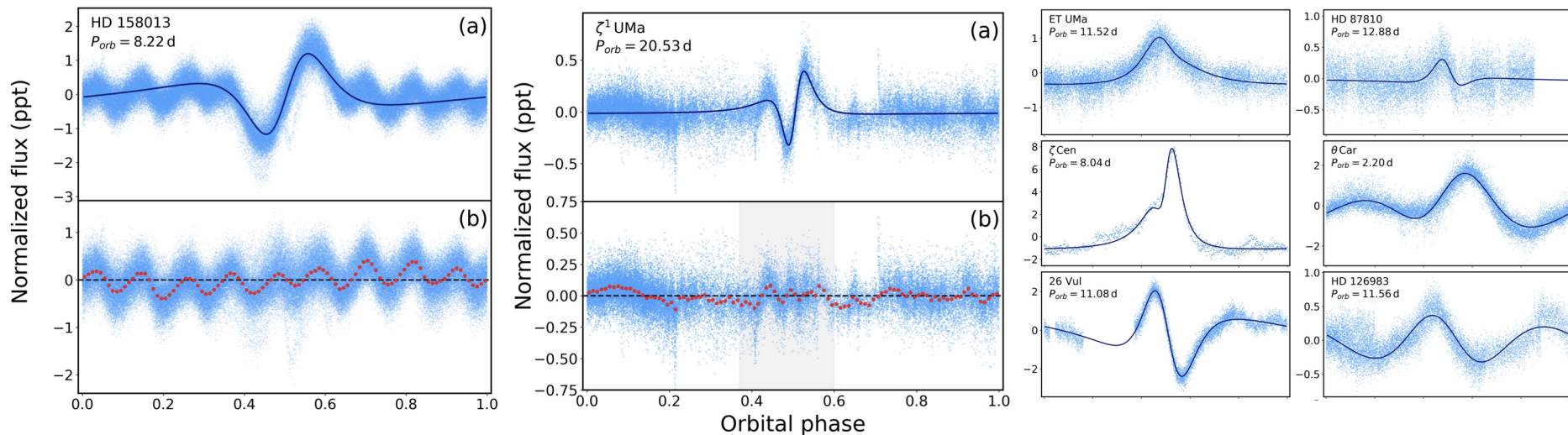
Fuller et al. 2020, MNRAS, 498, 5730, Handler et al. 2022, pas..conf, 183 -  
Slapově uvězněné módy pulzací



Van Reeth et al. 2023, A&A, 671, 121 - slapově  
ovlivněné g-módy

# Excitační mechanismy II

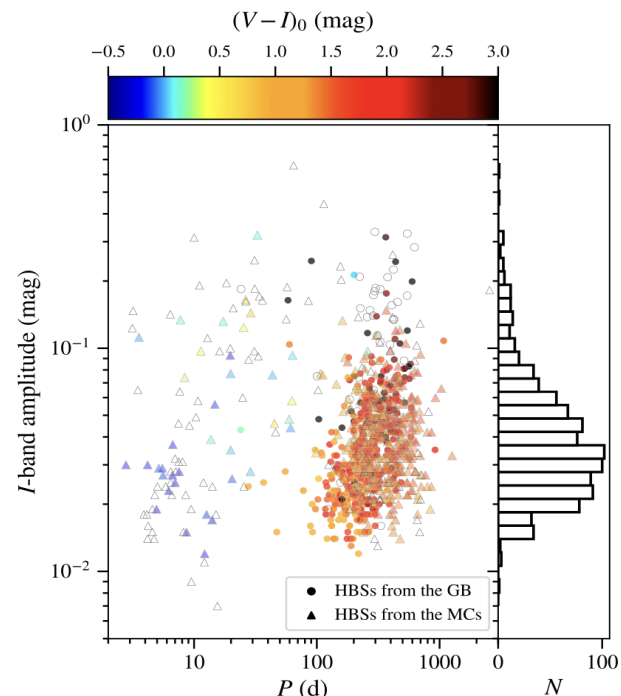
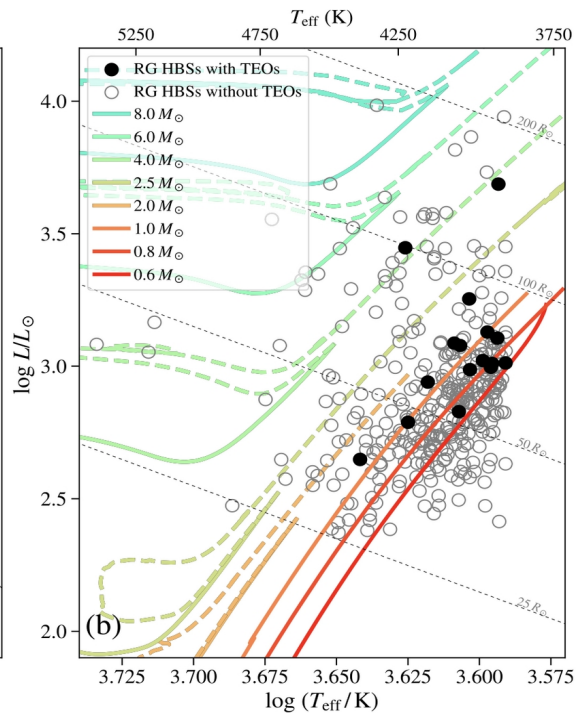
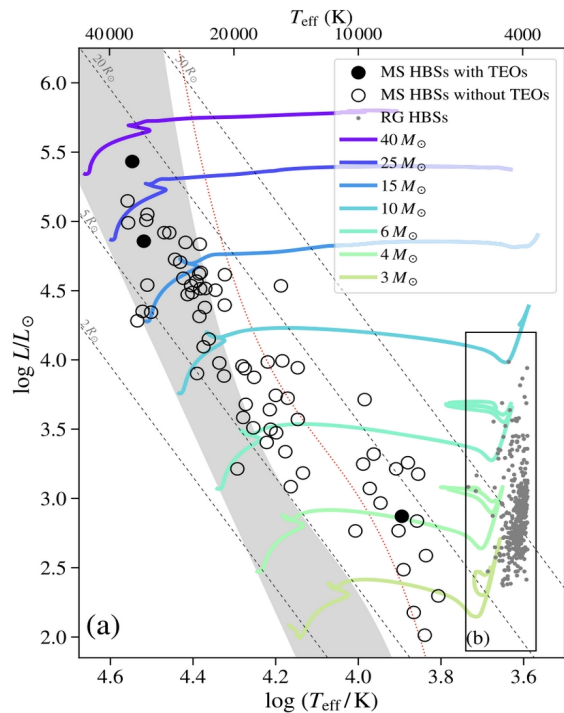
- Slapově indukované (gravitace) - heart-beat stars (HBs) - poprvé identifikované Welsch et al. 2011, ApJS, 197, 4 v datech z dalekohledu Kepler



Kołaczek-Szymanski 2021, A&A, 647, 12 - horké HBs z TESS

# Excitační mechanismy II

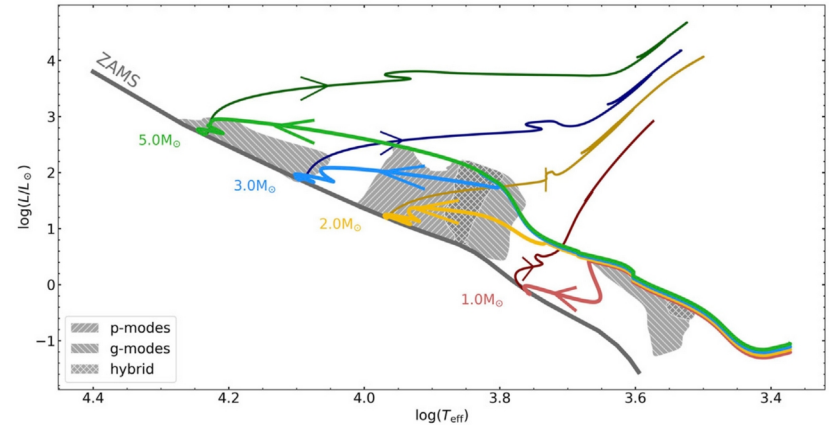
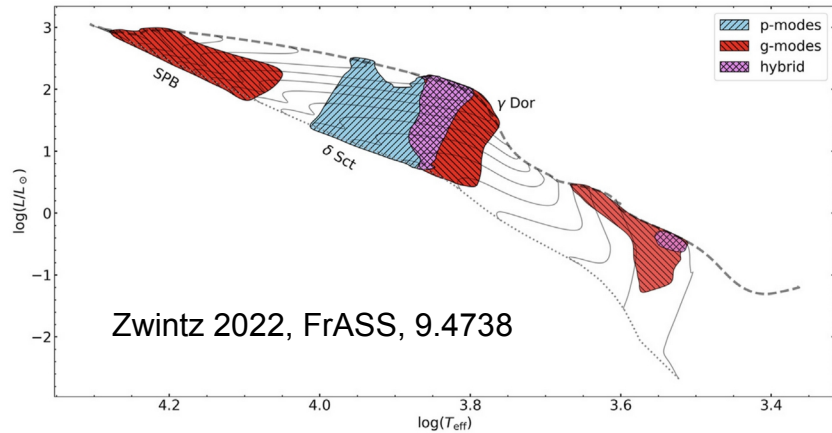
- Slapově indukované (gravitace) - heart-beat stars (HBs) - objevují se u všech typů hvězd, nejvíce je jich známo u červených obrů v Galaktické výduti - červení obři díky své stavbě snadněji slapově pulzují, částečně pozorovací bias (obři v Gal. výduti - staré hvězdy)



Wrona et al. 2022, ApJ, 928, 135 - HBs z OGLE, 5 % are TEOs (tidally excited oscillators)

# Hvězdy před hlavní posloupností

Problémy s okolohvědným materiálem, jinými typy proměnnosti a identifikací oscilací, problém s identifikací a samotným pozorováním. Při průchodu pásy nestability mohou hvězdy začít pulzovat



**TABLE 1** | Types of known pre-main sequence pulsators and their properties (as of March 2022).

Pulsation Type	Mass Range	Periods	Known Objects	References
SPB	$3.0\text{--}7.0 M_{\odot}$	0.8–3 d	18	[1], [2]
$\delta$ Scuti	$1.5\text{--}2.5 M_{\odot}$	18 min–8 h	> 100	[3]
Tidally perturbed	$1.8\text{--}1.9 M_{\odot}$	48 min–3.3 h	1	[4]
$\gamma$ Doradus	$1.4\text{--}1.8 M_{\odot}$	0.3–3 d	8	[5], [6]
$\delta$ Scuti - $\gamma$ Doradus hybrids	$1.4\text{--}2.2 M_{\odot}$	18 min–8 h and 0.3–3 d	4	[7]
Solar-like	$\sim 1 M_{\odot}$	$\sim 1.15 \text{ h}^a$	1 <sup>★</sup>	[8]
M-stars	$\sim 0.15 M_{\odot}$	0.5–5 d	1 <sup>★</sup>	[6]

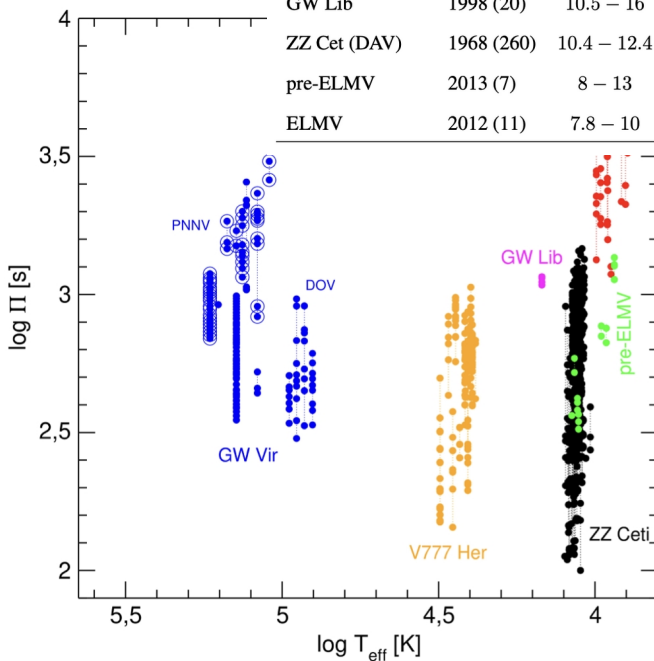
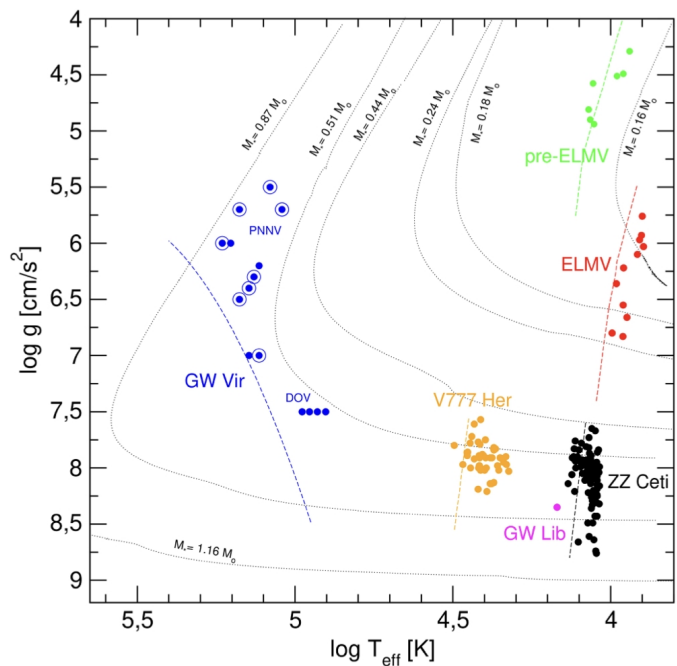
References: [1] Gruber et al. (2012), [2] Zwintz et al. (2017), [3] multiple papers, e.g., Zwintz (2008); Zwintz et al. (2014); Mellon et al. (2019); Steindl et al. (2021a), [4] Steindl et al. (2021b), [5] Zwintz et al. (2013), [6] Steindl et al. (2021a), [7] Ripepi et al. (2010), [8] Müllerer et al. (2021).

<sup>a</sup>... value for  $v_{\max}$ .

★... Only candidate stars detected so far.

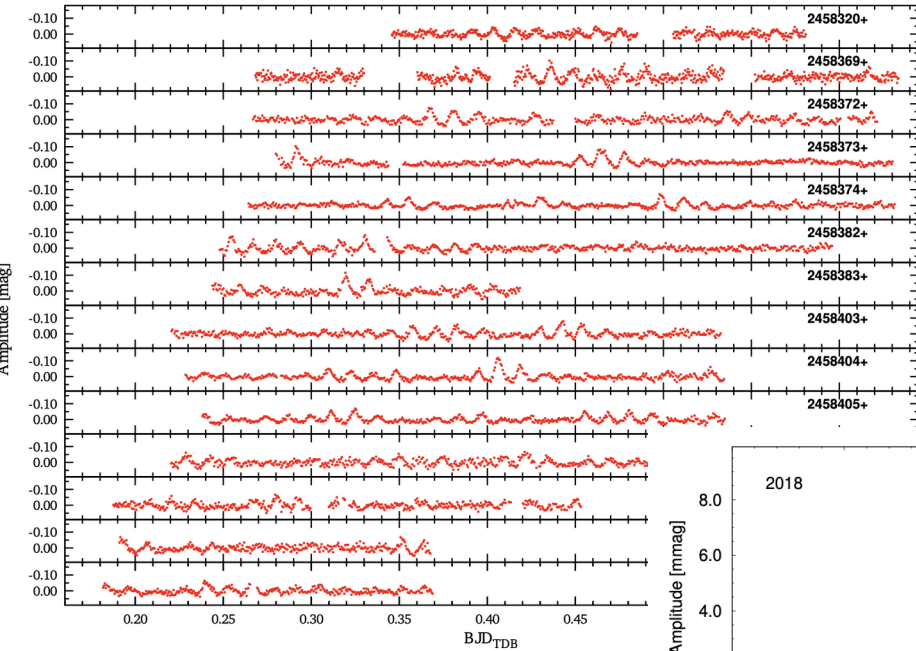
# Hvězdné zbytky

Pulzující bílí trpaslíci - základní parametry z asteroseismologie + věk z chladnoucích sekvencí

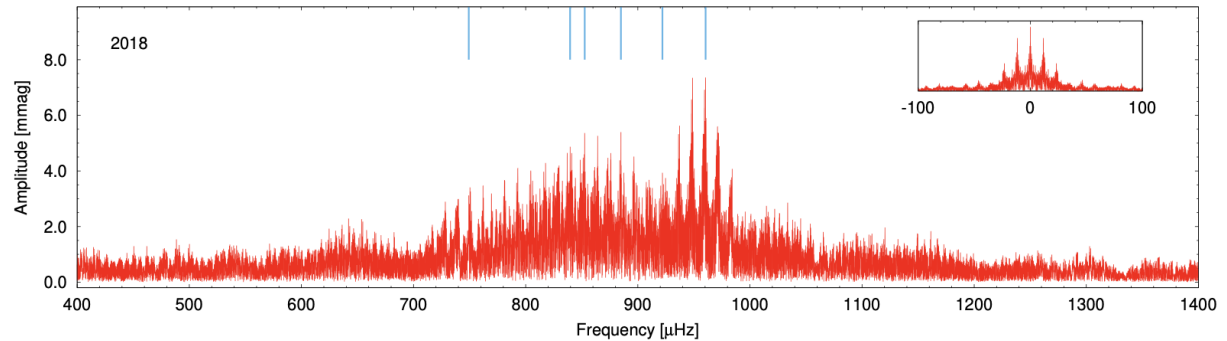
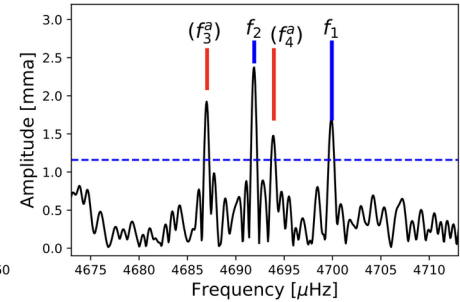
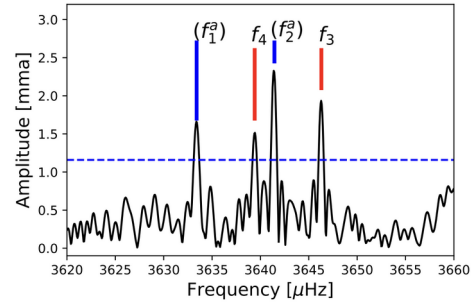


Class	Year of disc. (#)	$T_{\text{eff}}$ [ $\times 1000$ K]	$\log g$ [C.G.S.]	Period range [s]	Amplitudes [mag]	Main surface composition
GW Vir (PNNV)	1984 (10)	100 – 180	5.5 – 7	420 – 6000	0.01 – 0.15	He, C, O
GW Vir (DOV)	1979 (9)	80 – 100	7.3 – 7.7	300 – 2600	0.02 – 0.1	He, C, O
V777 Her (DBV)	1982 (27)	22.4 – 32	7.5 – 8.3	120 – 1080	0.05 – 0.3	He (H)
GW Lib	1998 (20)	10.5 – 16	8.35 – 8.7	100 – 1900	0.007 – 0.07	H, He
ZZ Cet (DAV)	1968 (260)	10.4 – 12.4	7.5 – 9.1	100 – 1400	0.01 – 0.3	H
pre-ELMV	2013 (7)	8 – 13	4 – 5	300 – 1400	0.001 – 0.05	He, H
ELMV	2012 (11)	7.8 – 10	6 – 6.8	100 – 6300	0.002 – 0.044	H

# Hvězdné zbytky



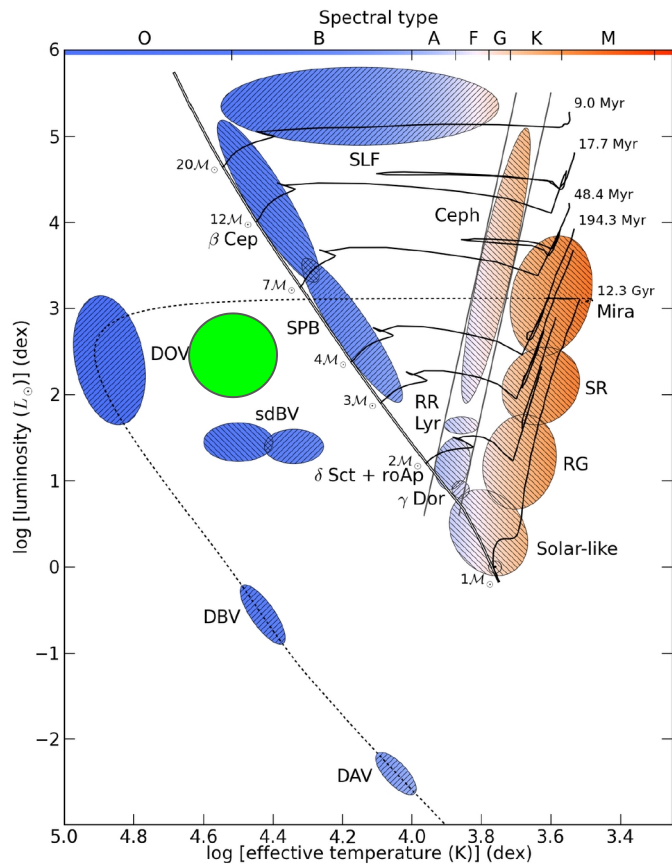
Bognár et al. 2020, A&A, 638, 82 - TESS data



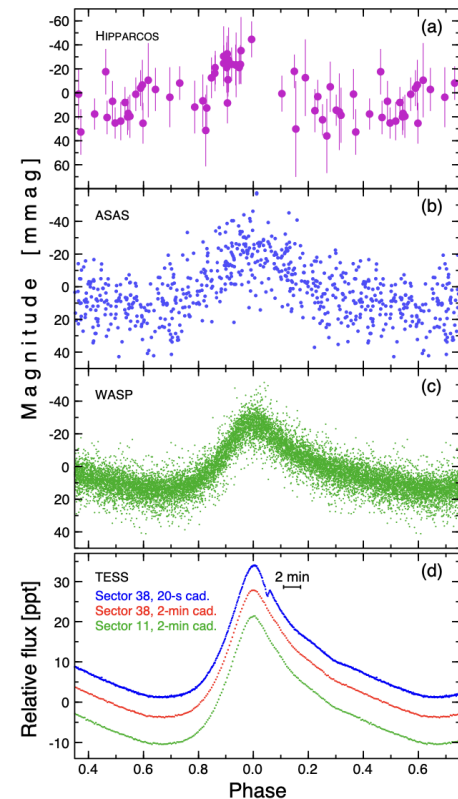
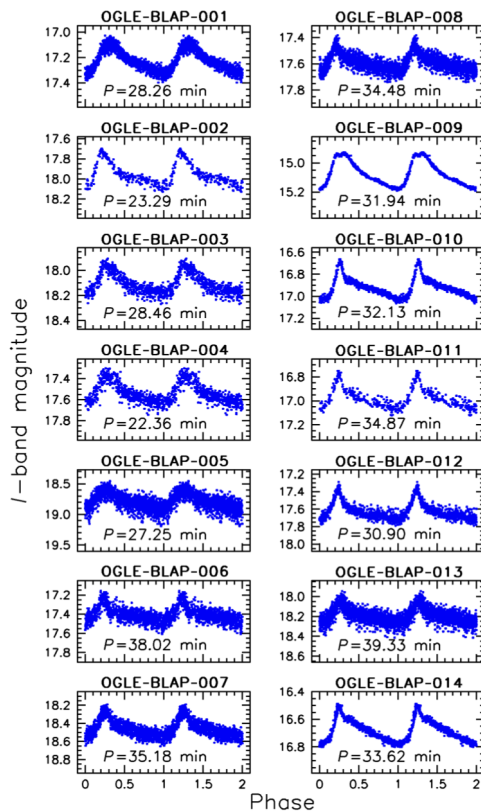
Bognár et al, 2021, A&A, 651, 14 - 2 WDs pozorování na Piszkesteto observatory (Maďarsko, 1m telescope), silný aliasing

# BLAPs Blue Large-amplitude pulsating stars

Radiální pulzace, horké hvězdy s periodami cca 20-40 min a amplitudami cca desetiny magnitudy



Pietrukowicz et al. 2017, NatAs, 1, 166



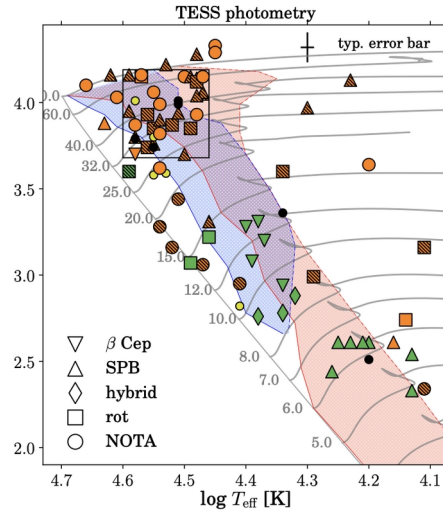
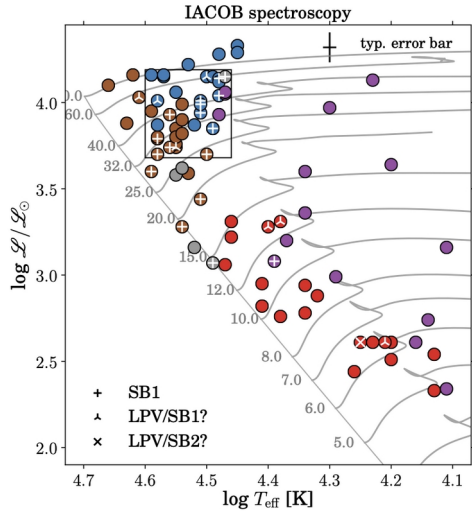
Pigulski et al. 2022, A&A, 663, 62  
 ‘ $\sim 0.3 M_{\odot}$  objekty s degenerovaným He jádrom a H fúzujícím v okolní vrstvě X více hmotné ( $0.5\text{--}0.8 M_{\odot}$ ) hvězdy fúzující He v jádře X  $\sim 0.7 M_{\odot}$  složky systému po výbuchu supernovy’



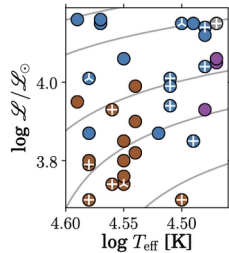
# Hmotné hvězdy

Nad 5 Msun  
SPB (p~hodiny-dny);  
BCEP (p~minuty až hodiny)

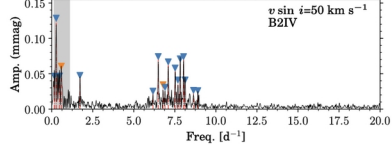
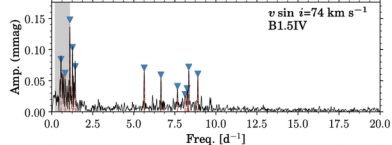
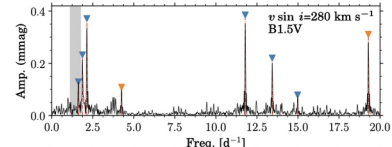
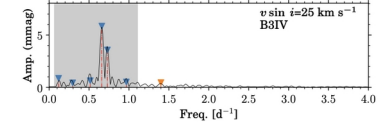
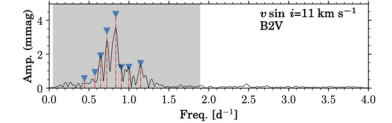
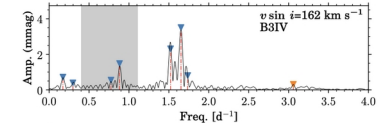
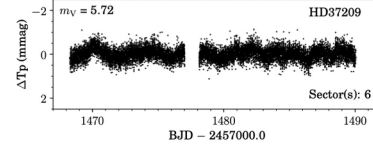
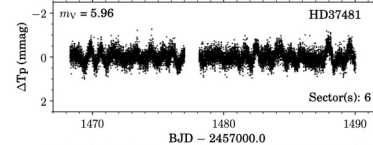
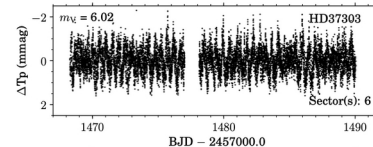
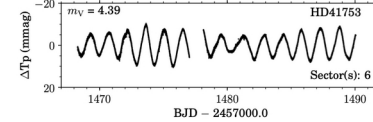
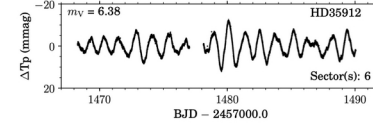
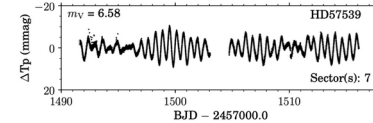
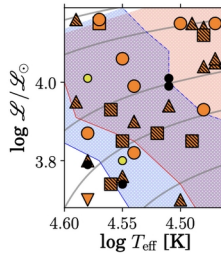
- Bursens et al. 2020, A&A, 639, 81 - proměnnost 98 OB hvězd z TESS cycle 1; 14 p-and g-mode pulzátorů



- O: LC V & IV
- O: LC III, II & I
- B: LC V & IV
- B: LC III, II & I
- mag.

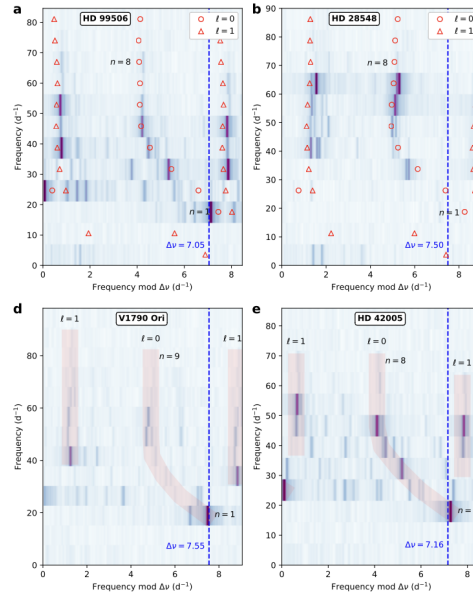
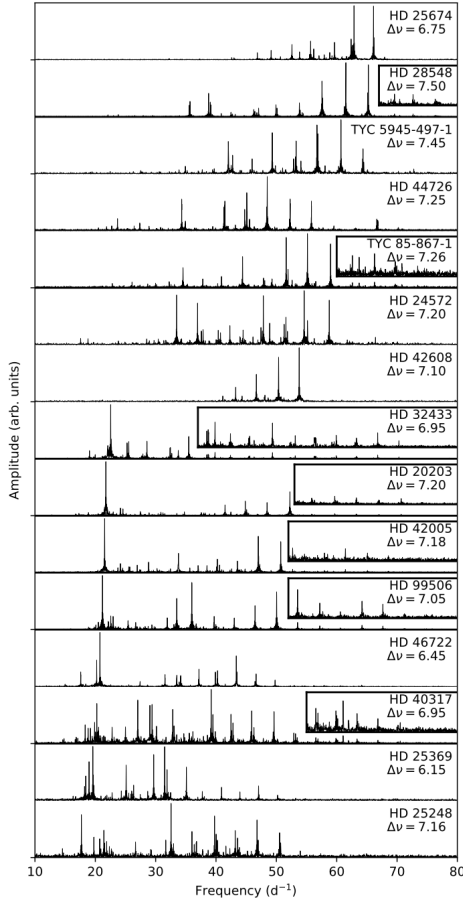


- SLF
- EB
- PQ
- NOTA

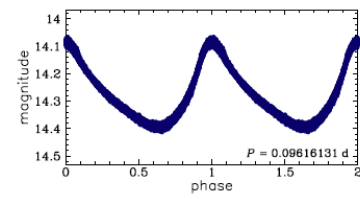
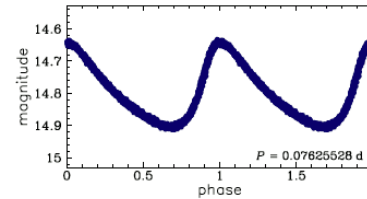
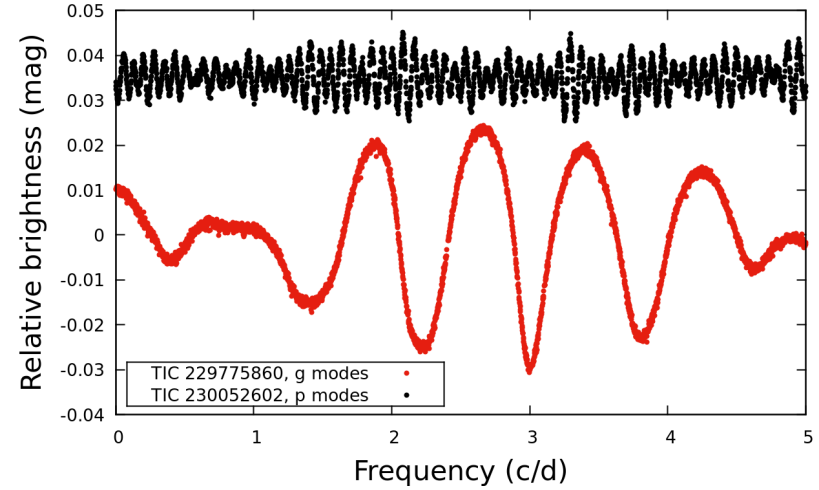


# Středně hmotné hvězdy

Cca 1.2-3 Msun  
GDOR (p~hodiny-dny);  
DSCT (p~minuty až hodiny)

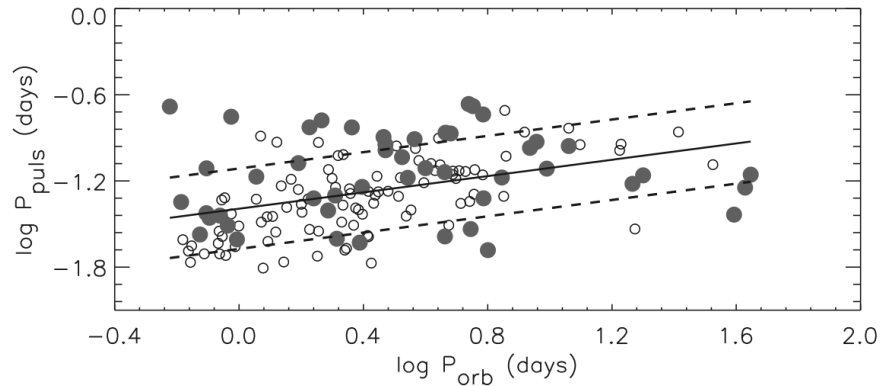
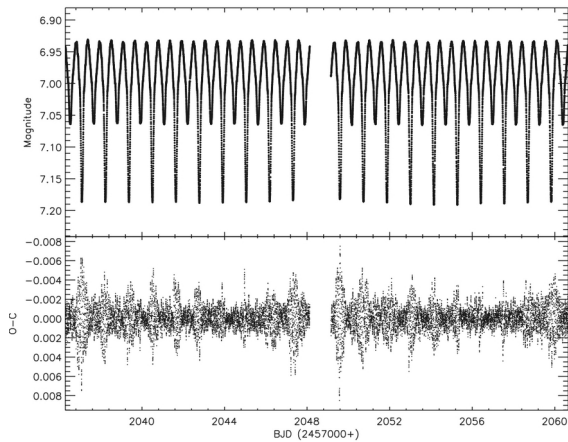


Bedding et al. 2020, Natur,  
581, 147 - V některých  
případech není záklopkový  
mechanismus příčinou  
pulzací DSCT hvězd  
(oscilace slunečního typu)



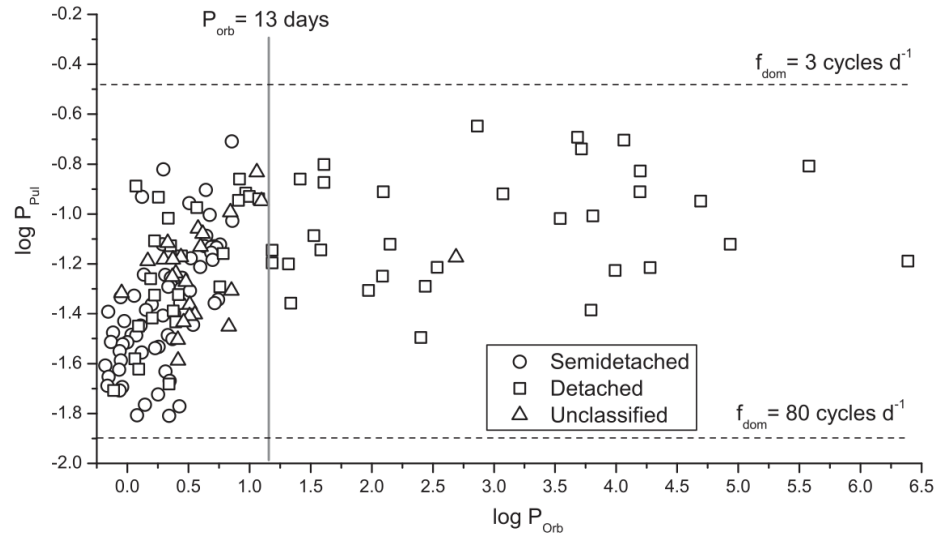
High-Amplitude DSCT stars - radiálně pulzující  
DSCTs - podobné křivky jako DCEPs a RRLs

# Středně hmotné hvězdy



Alicavus et al. 2023, MNRAS, 524, 619 - Jižní TESS EBs s DSCT komponentou

DSCT and GDOR pulzátoři jsou běžné ve dvojhvězdách

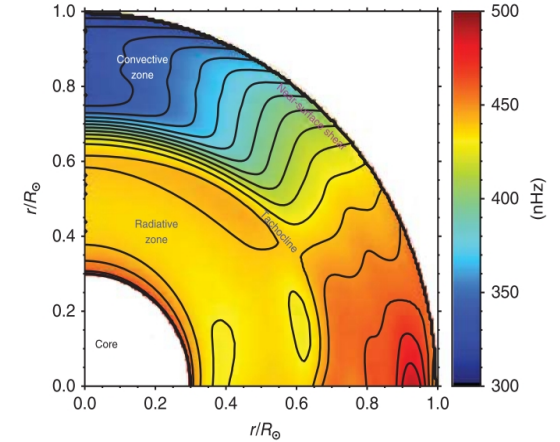
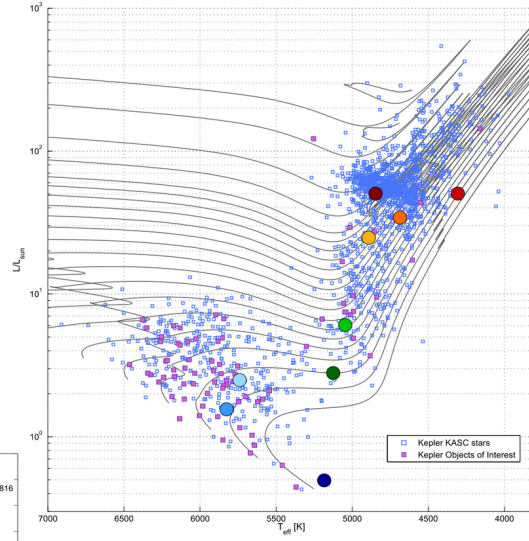
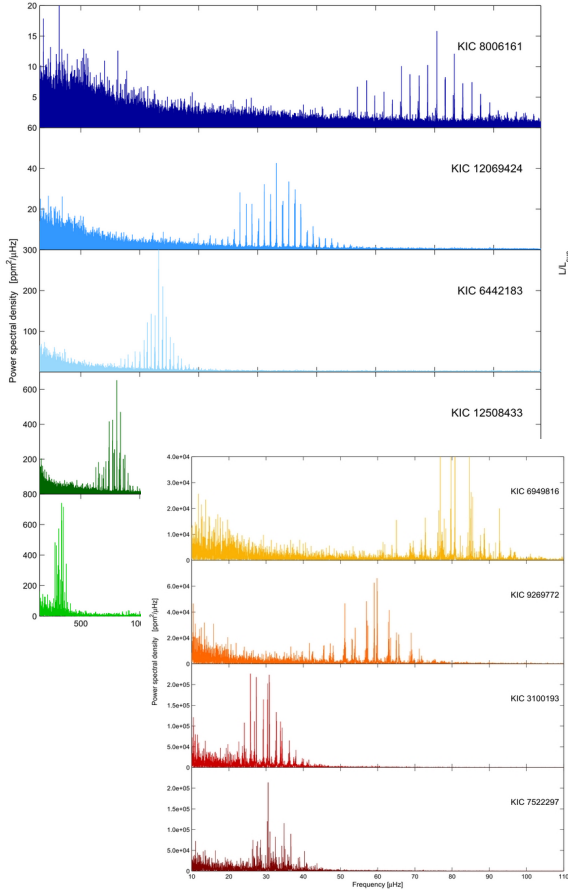


Liakos&Niarchos 2017, MNRAS, 465, 1181 - 13-d limit pro  $P_{\text{orb}}$  vs  $P_{\text{puls}}$  korelaci

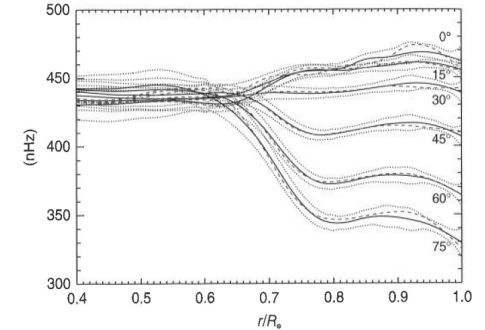
# Oscilace slunečního typu

Chaplin&Miglio 2013, ARA&A, 51, 353

Využitím tzv. škálovacích relací možno zjistit parametry hvězd, které vykazují oscilace slunečního typu



Slunce nerotuje jako tuhé těleso!



$$\left(\frac{g}{g_{\odot}}\right) \simeq \left(\frac{\nu_{\max}}{\nu_{\max,\odot}}\right) \left(\frac{T_{\text{eff}}}{T_{\text{eff},\odot}}\right)^{0.5}$$

$$\left(\frac{R}{R_{\odot}}\right) \simeq \left(\frac{\nu_{\max}}{\nu_{\max,\odot}}\right) \left(\frac{\langle\Delta\nu_{nl}\rangle}{\langle\Delta\nu_{nl}\rangle_{\odot}}\right)^{-2} \left(\frac{T_{\text{eff}}}{T_{\text{eff},\odot}}\right)^{0.5}$$

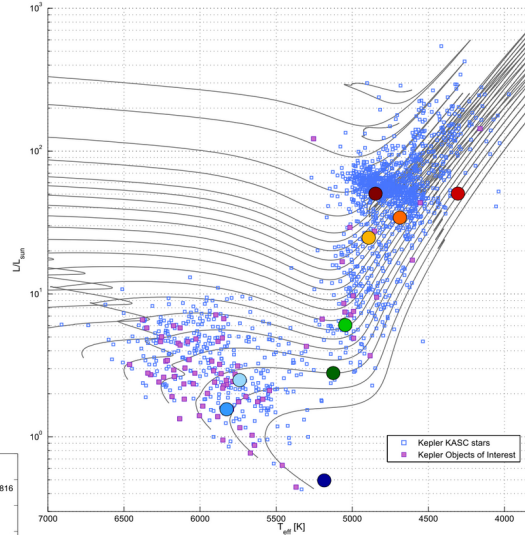
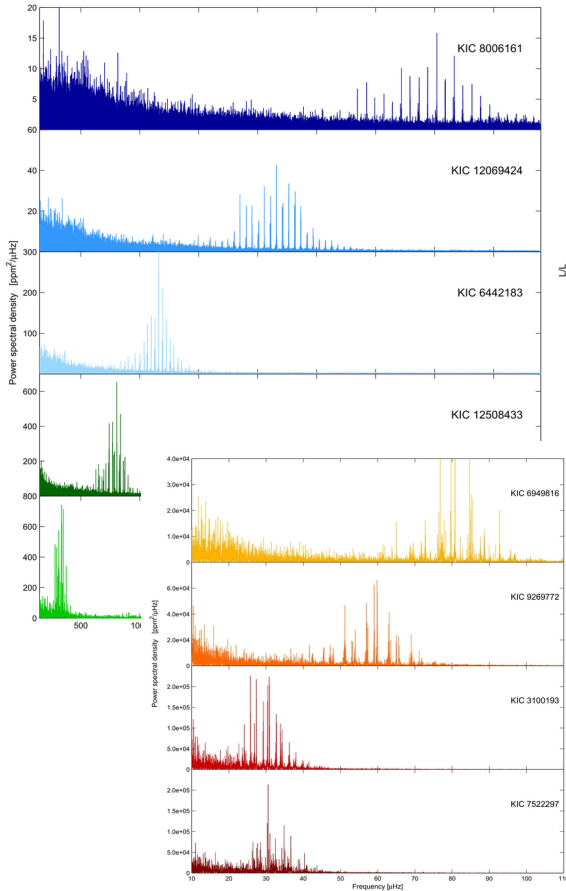
$$\left(\frac{M}{M_{\odot}}\right) \simeq \left(\frac{\nu_{\max}}{\nu_{\max,\odot}}\right)^3 \left(\frac{\langle\Delta\nu_{nl}\rangle}{\langle\Delta\nu_{nl}\rangle_{\odot}}\right)^{-4} \left(\frac{T_{\text{eff}}}{T_{\text{eff},\odot}}\right)^{1.5}$$

$$\left(\frac{\rho}{\rho_{\odot}}\right) \simeq \left(\frac{\langle\Delta\nu_{nl}\rangle}{\langle\Delta\nu_{nl}\rangle_{\odot}}\right)^2$$

# Oscilace slunečního typu

Chaplin&Miglio 2013, ARA&A, 51, 353

Využitím tzv. škálovacích relací možno zjistit parametry hvězd, které vykazují oscilace slunečního typu



$$\left(\frac{g}{g_{\odot}}\right) \approx \left(\frac{\nu_{\max}}{\nu_{\max,\odot}}\right) \left(\frac{T_{\text{eff}}}{T_{\text{eff},\odot}}\right)^{0.5}$$

$$\left(\frac{R}{R_{\odot}}\right) \approx \left(\frac{\nu_{\max}}{\nu_{\max,\odot}}\right) \left(\frac{\langle\Delta\nu_{nl}\rangle}{\langle\Delta\nu_{nl}\rangle_{\odot}}\right)^{-2} \left(\frac{T_{\text{eff}}}{T_{\text{eff},\odot}}\right)^{0.5}$$

$$\left(\frac{M}{M_{\odot}}\right) \approx \left(\frac{\nu_{\max}}{\nu_{\max,\odot}}\right)^3 \left(\frac{\langle\Delta\nu_{nl}\rangle}{\langle\Delta\nu_{nl}\rangle_{\odot}}\right)^{-4} \left(\frac{T_{\text{eff}}}{T_{\text{eff},\odot}}\right)^{1.5}$$

$$\left(\frac{\rho}{\rho_{\odot}}\right) \approx \left(\frac{\langle\Delta\nu_{nl}\rangle}{\langle\Delta\nu_{nl}\rangle_{\odot}}\right)^2$$

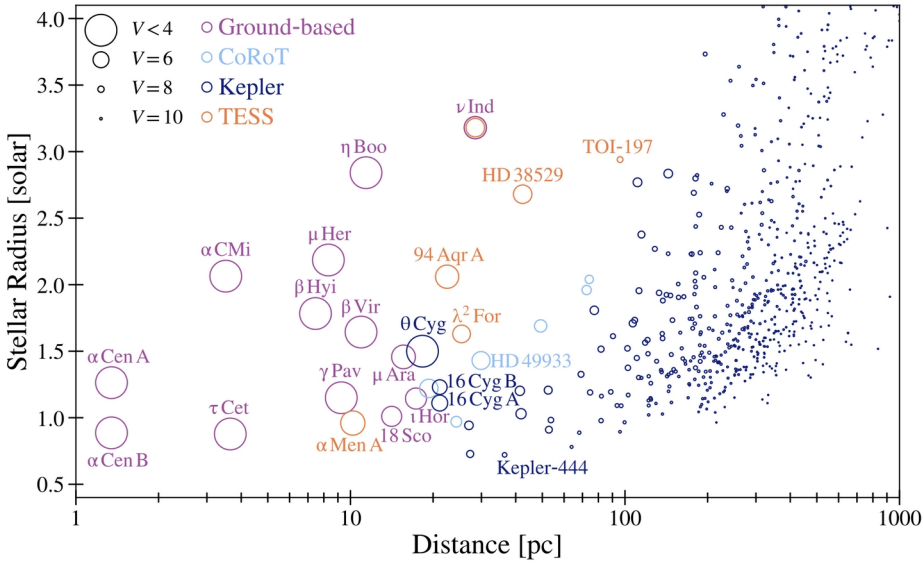
Mathur et al. 2022, A&A, 657, 31

- Detekce oscilací slunečního typu u středně hmotných hvězd hlavní posloupnosti
- Gaia poloměry větší o 4.4 % než poloměry určené z asteroseismologie

KIC	$T_{\text{eff}}$ (K)	$\log g$ (dex)	$M$ ( $M_{\odot}$ )	$R$ ( $R_{\odot}$ )
2010835	$5896 \pm 126$	$4.07 \pm 0.01$	$0.91 \pm 0.11$	$1.46 \pm 0.13$
2578869	$5395 \pm 101$	$3.84 \pm 0.01$	$0.91 \pm 0.09$	$1.89 \pm 0.12$
3102595	$5770 \pm 122$	$3.98 \pm 0.01$	$1.83 \pm 0.13$	$2.30 \pm 0.11$
3124465	$5796 \pm 120$	$3.85 \pm 0.01$	$1.23 \pm 0.09$	$2.18 \pm 0.11$
3219634	$6145 \pm 133$	$3.98 \pm 0.02$	$1.69 \pm 0.15$	$2.19 \pm 0.12$
3238211	$6092 \pm 129$	$3.82 \pm 0.01$	$1.35 \pm 0.10$	$2.38 \pm 0.12$
3241299	$6501 \pm 130$	$4.07 \pm 0.01$	$1.99 \pm 0.18$	$2.16 \pm 0.13$
3425564	$6239 \pm 136$	$3.82 \pm 0.01$	$2.04 \pm 0.54$	$2.92 \pm 0.55$
3633538	$5676 \pm 85$	$4.34 \pm 0.03$	$0.84 \pm 0.13$	$1.03 \pm 0.09$
3750375	$6110 \pm 129$	$3.69 \pm 0.01$	$2.02 \pm 0.59$	$3.35 \pm 0.69$
3761010	$6403 \pm 128$	$4.02 \pm 0.01$	$1.38 \pm 0.09$	$1.92 \pm 0.09$
3936658	$6106 \pm 130$	$3.70 \pm 0.01$	$1.09 \pm 0.33$	$2.44 \pm 0.52$
...				

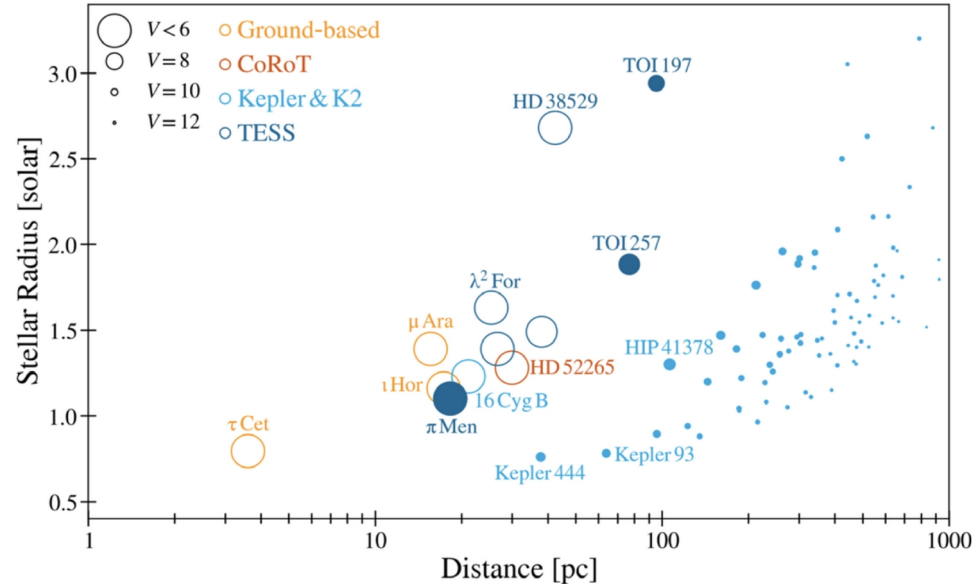
Extrémně přesná měření základních parametrů

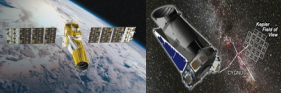
# Oscilace slunečního typu



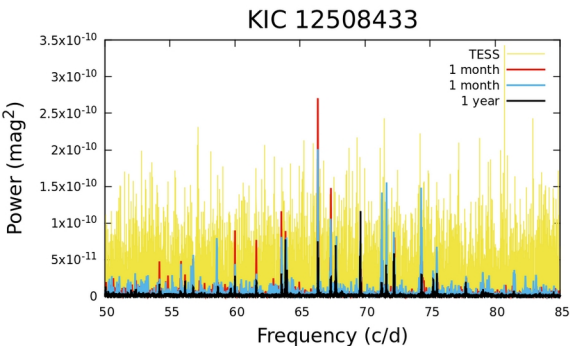
Chontos et al. 2021, ApJ, 922, 229  
600 známých hvězd s oscilacemi slunečního  
typu s určenými parametry

Huber et al. 2022, AJ, 163, 79 - Všechny hvězdy  
vykazující oscilace slunečního typu s  $R < 3.5 R_{\text{sun}}$   
mající exoplanety





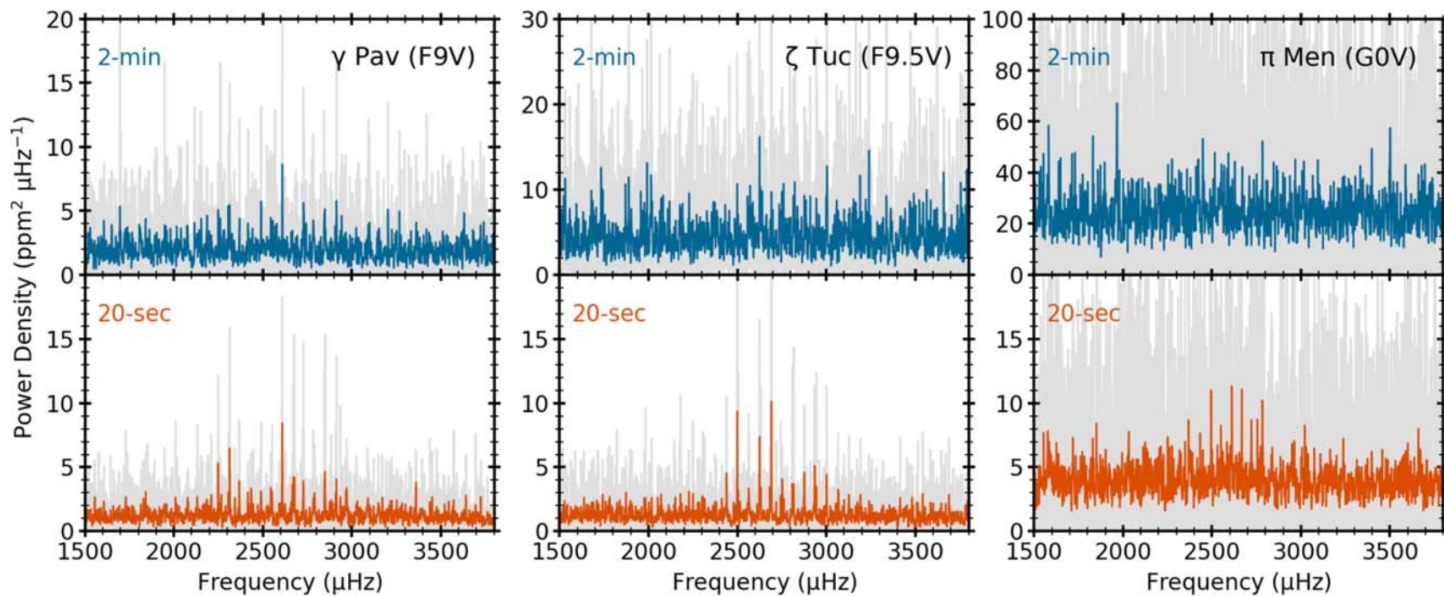
# Data & Fourierovská transformace



- Kvalita, rozsah, kadence dat a jejich nepřerušovanost klíčové
- Dlouhodobé přehlídky a vesmírné mise znamenaly revoluci v našem chápání hvězdných pulzací
- Pozor na kontaminaci blízkými hvězdami

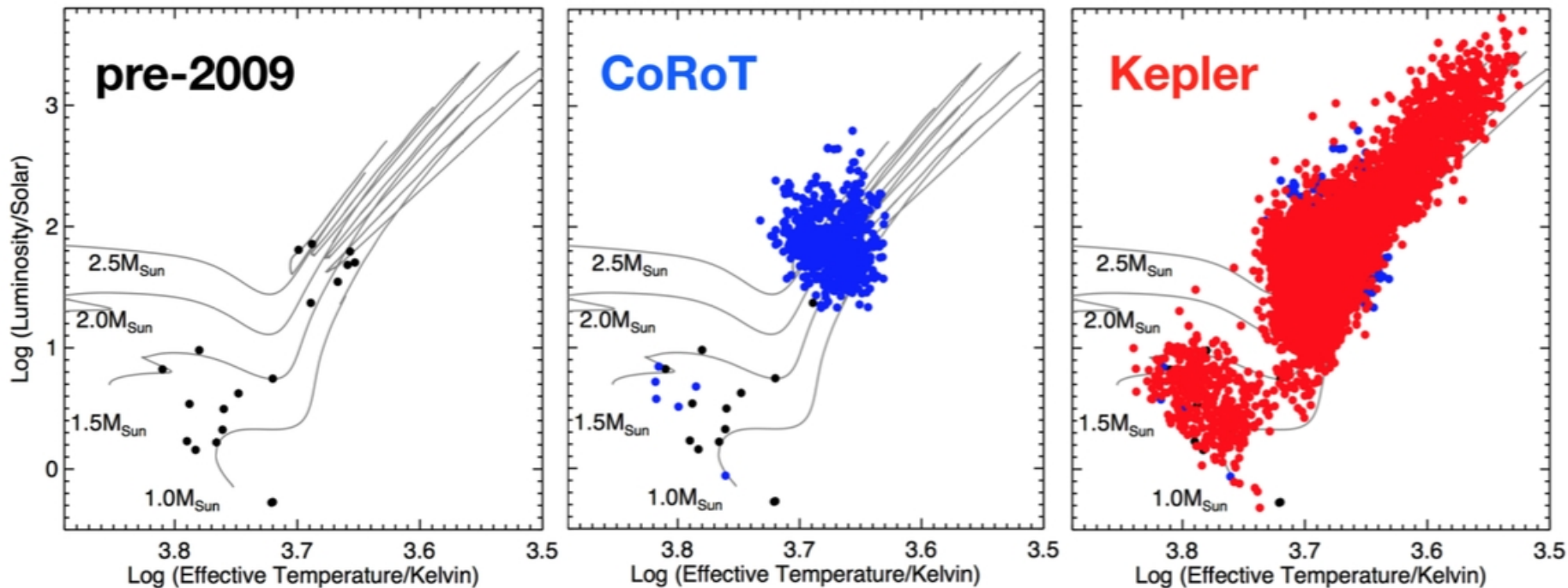
Pozorování z jednoho místa na Zemi nejsou příliš vhodná :-)

Huber et al. 2022, AJ, 163, 79 - TESS data - 120 versus 20 s kadence



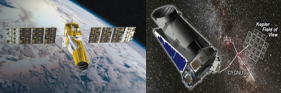


# Data & Fourierovská transformace



Rauer et al. 2023, PLATO red book



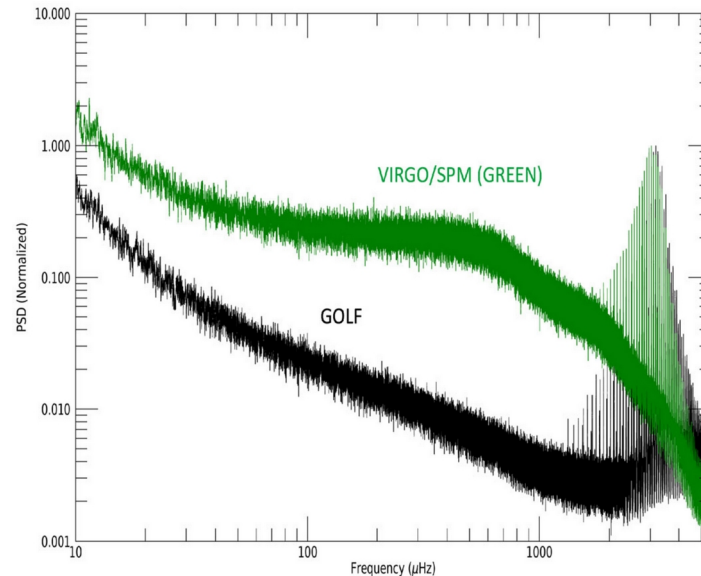
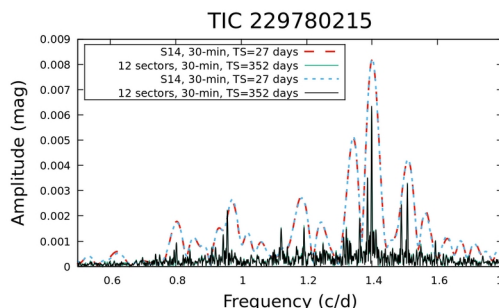
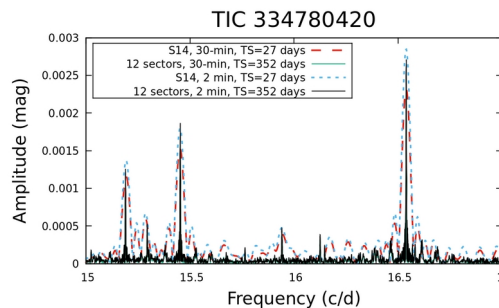
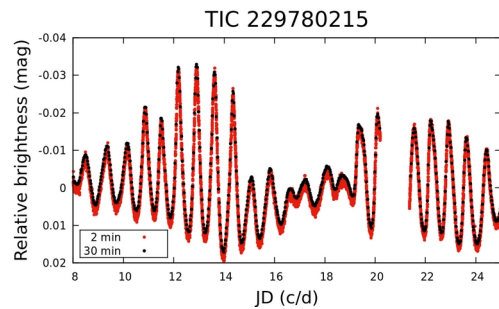
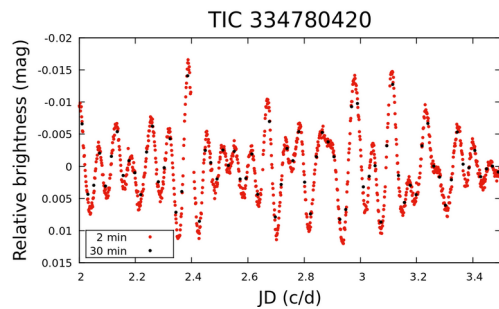


# Data & Fourierovská transformace

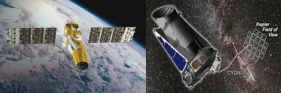


- Kvalita, rozsah, kadence dat a jejich nepřerušovanost klíčové
- Dlouhodobé přehledky a vesmírné mise znamenaly revoluci v našem chápání hvězdných pulzací
- Pozor na kontaminaci blízkými hvězdami

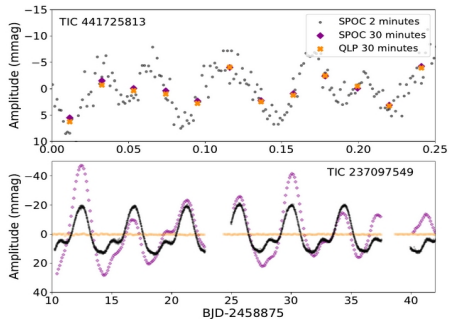
Pozorování z jednoho místa na Zemi nejsou příliš vhodná :-)



RVs (GOLF) versus photometry (VIRGO/SPM)  
Garcia&Ballot, 2019, LRSP, 16, 4

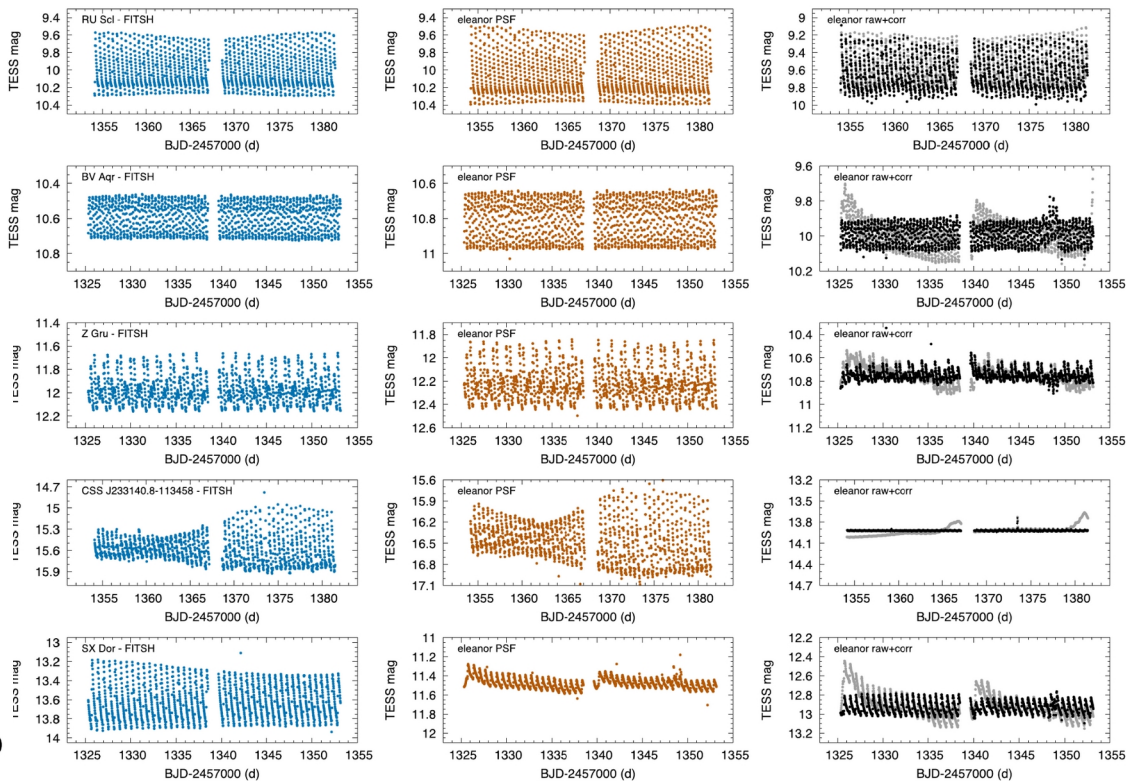


# Data & Fourierovská transformace

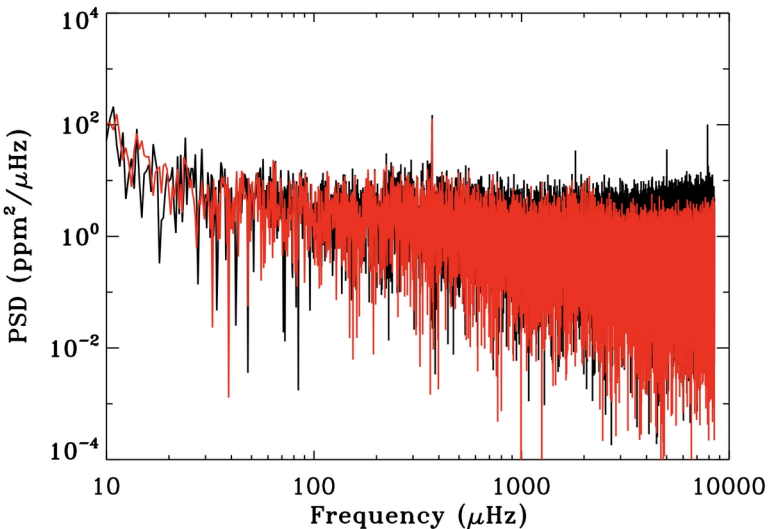


Skarka et al. 2022, A&A, 666, 142

- Různé pipeline produkují různá data!



Molnár et al. 2022, ApJS, 258, 8 - RR Lyrae stars from TESS



Mathur et al. 2022, A&A, 657, 31 - Rozdíl mezi Kepler DR24 a DR25

# Budoucnost

## Vesmírné mise

- Extrémní přesnost
- Velmi dobré kadence
- Nepřerušované datové řady

## Pozemní observatoře

- Spektroskopická pozorování
- Dlouhodobý monitoring
- Barevná fotometrická měření

## Vývoj v teorii

