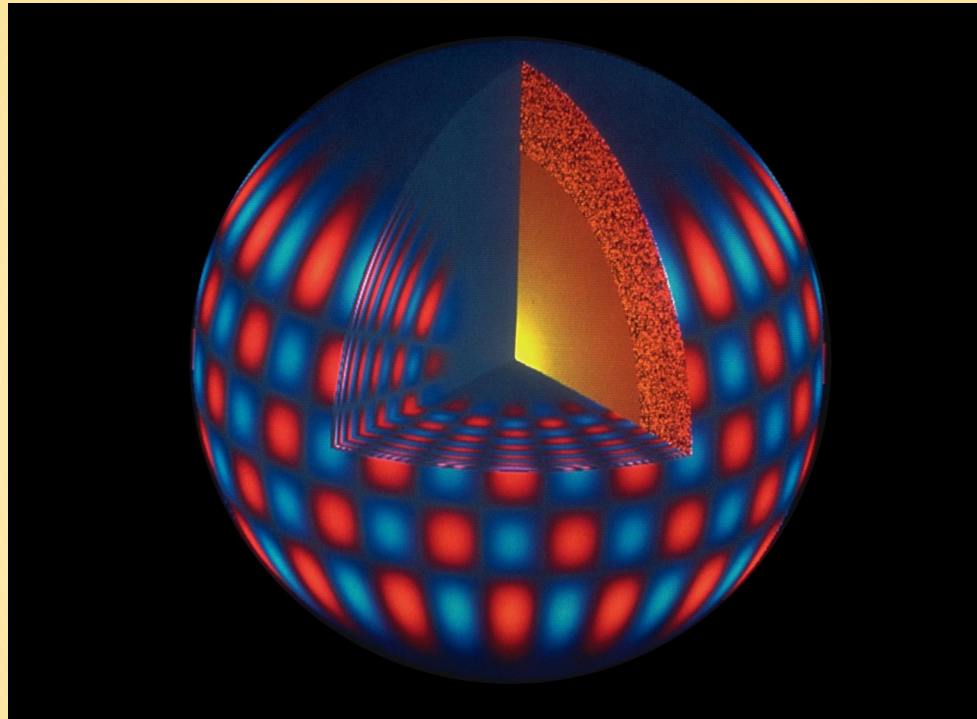


# Hvězdné pulzace



Marek Skarka

skarka@asu.cas.cz

# Sir Arthur Eddington

*(The internal constitutions of the stars, 1926)*



“At first sight it would seem that the deep interior of the Sun and stars is less accessible to scientific investigation than any other region of the Universe.”

# Sir Arthur Eddington

*(The internal constitutions of the stars, 1926)*

“At first sight it would seem that the deep interior of the Sun and stars is less accessible to scientific investigation than any other region of the Universe.”



“Our telescopes may probe farther and farther into the depths of space; but how can we ever obtain certain knowledge of that which is hidden behind substantial barriers?”

# Sir Arthur Eddington

*(The internal constitutions of the stars, 1926)*

“At first sight it would seem that the deep interior of the Sun and stars is less accessible to scientific investigation than any other region of the Universe. ”



“Our telescopes may probe farther and farther into the depths of space; but how can we ever obtain certain knowledge of that which is hidden behind substantial barriers?”

“What appliance can pierce through the outer layers of a star and test the conditions within?”

## **Hvězdné pulzace**

Změny rozměru a/nebo tvaru hvězdy v důsledku procesů uvnitř hvězdy. To má za následek změny jasnosti hvězdy

# Proč studovat hvězdné pulzace?

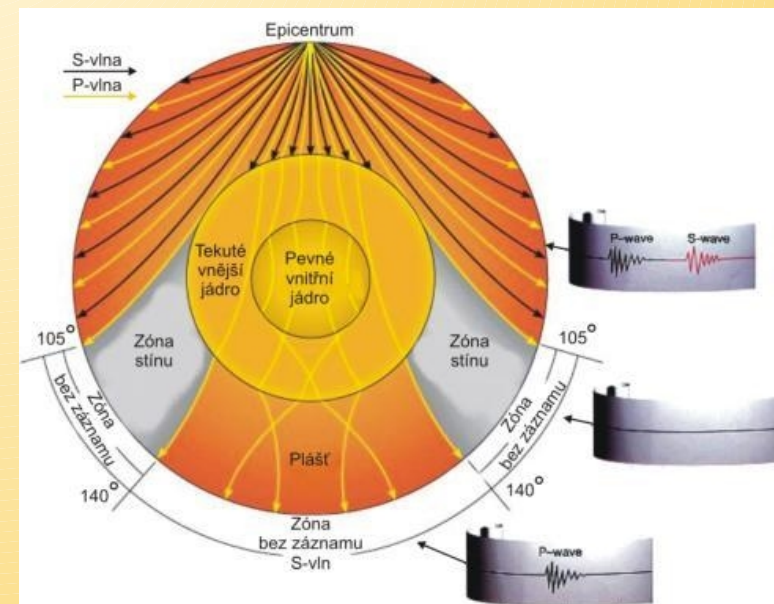
Studium změn jasnosti a spektra způsobených pulzacemi je jedinou možností, jak se podívat dovnitř hvězdy

Co můžeme zjistit:

- Vnitřní rotace
- Rozhraní vrstev a vnitřní stavba
- Chemické složení
- Průběh teploty



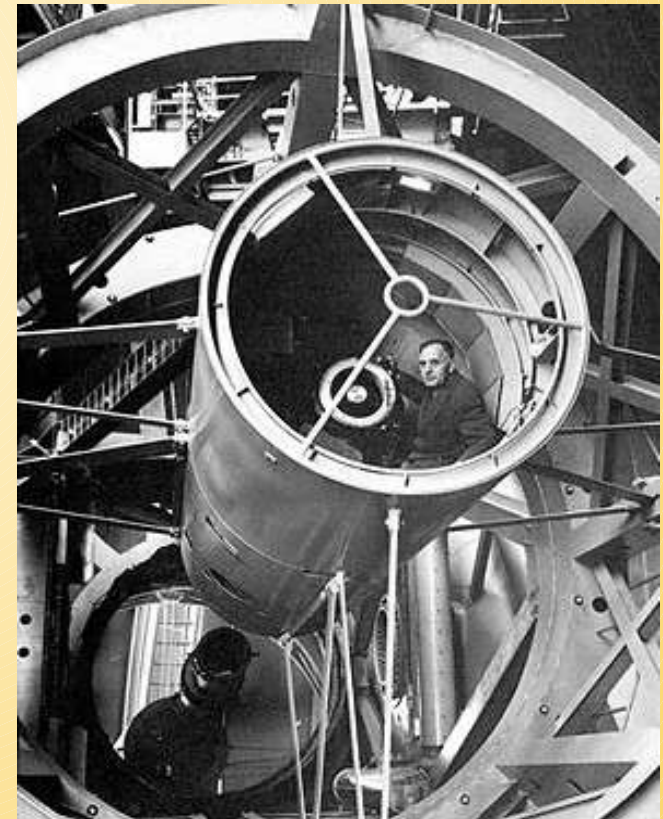
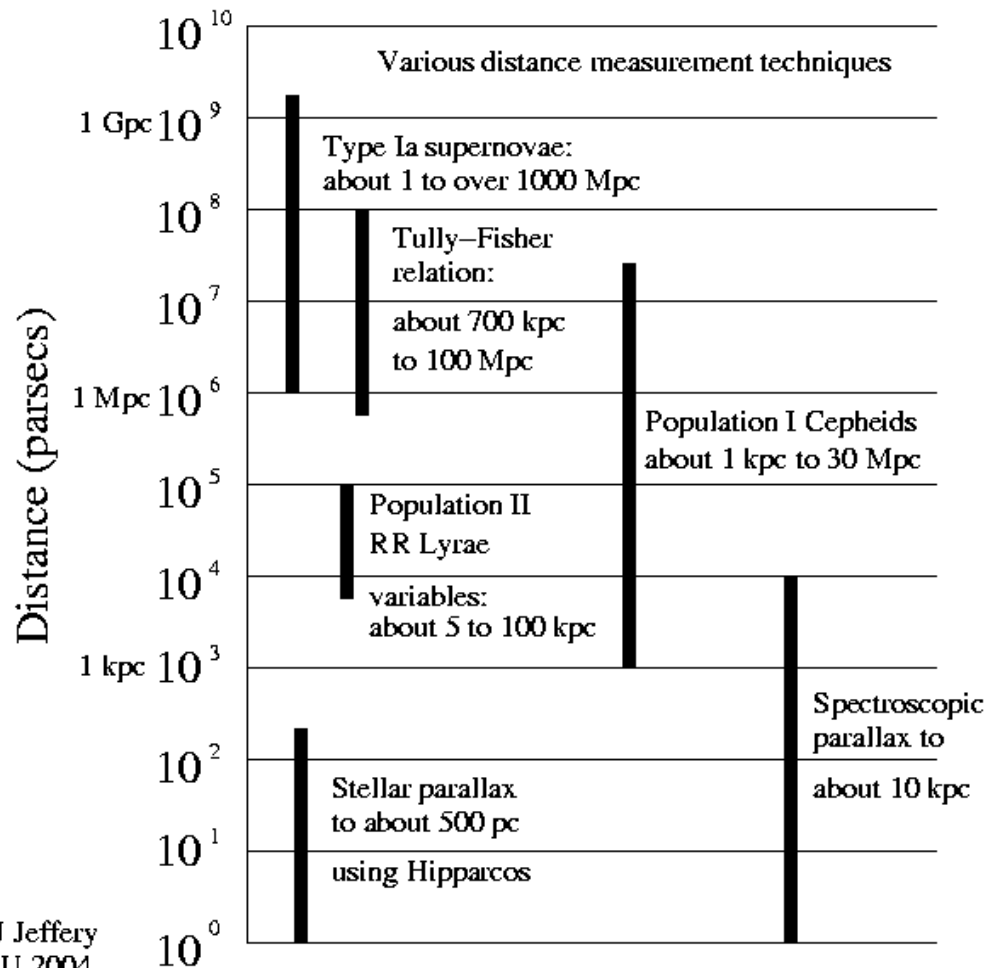
**Každá hvězda pulzuje!**



# Proč studovat hvězdné pulzace?

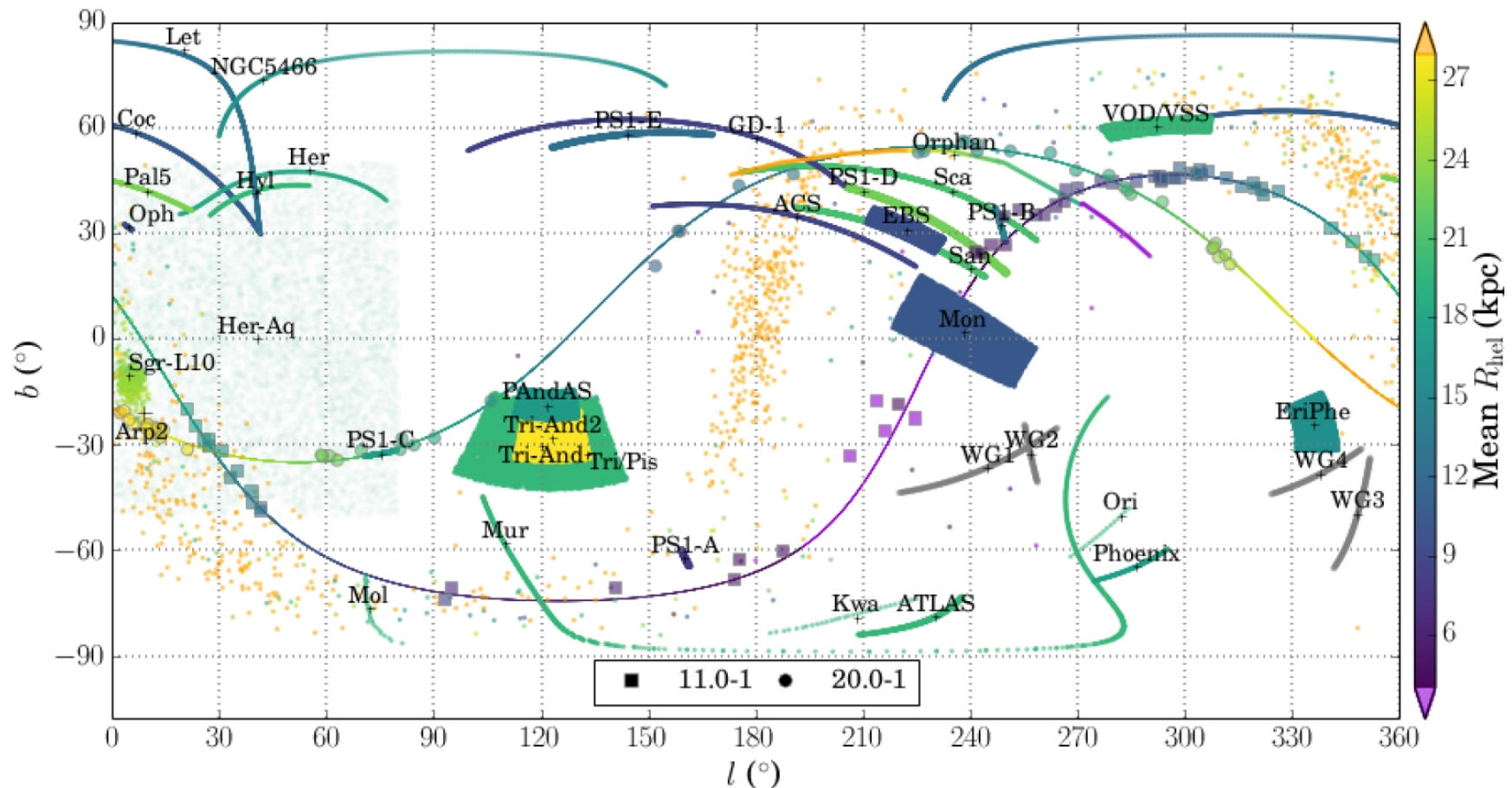
**Pulzující hvězdy jsou vhodné k určování vzdáleností, galaktické archeologii a mapování**

A Cartoon of the Distance Ladder



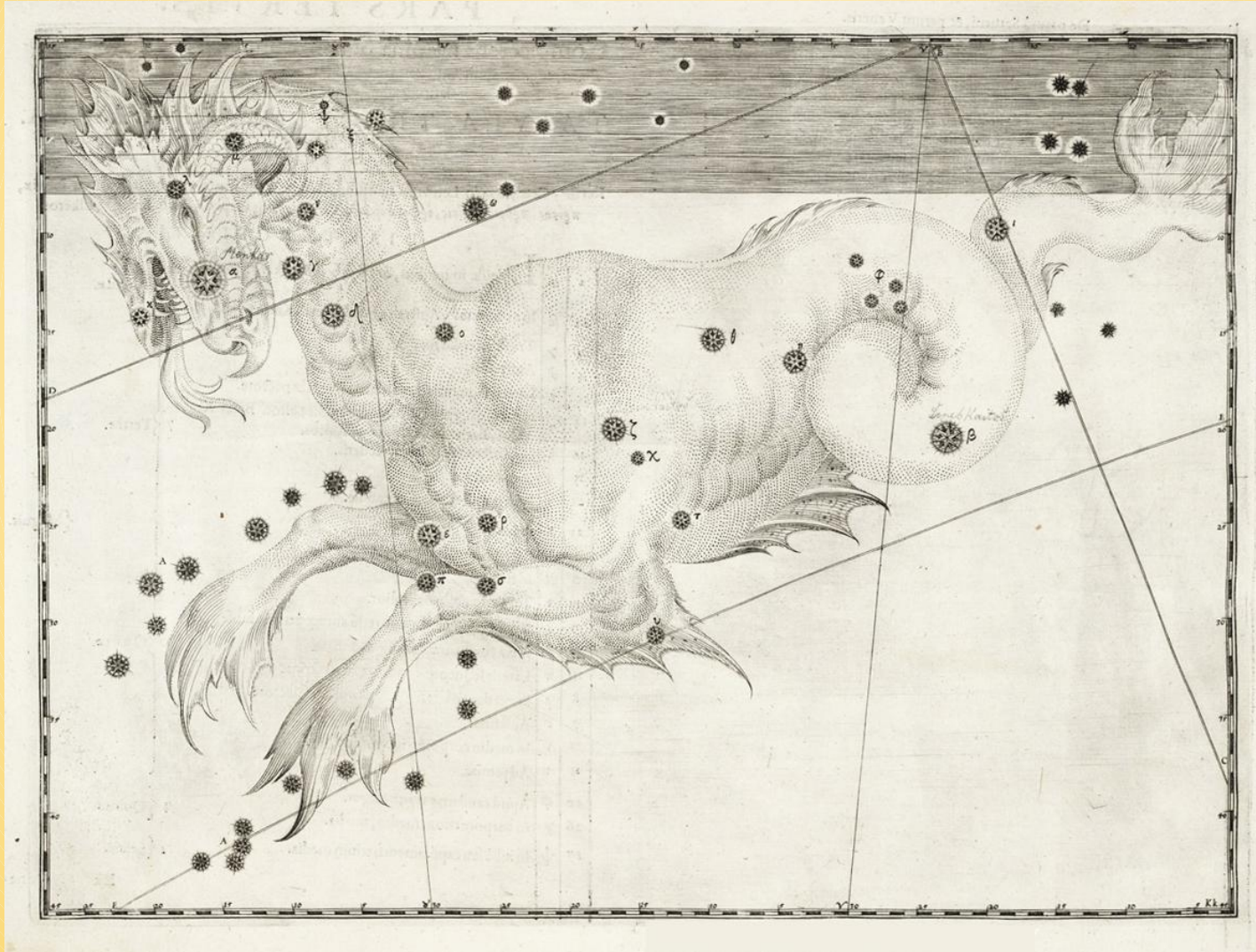
# Proč studovat hvězdné pulzace?

**Pulzující hvězdy jsou vhodné k určování vzdáleností, galaktické archeologii a mapování**



# Pulzující hvězdy v kontextu dějin

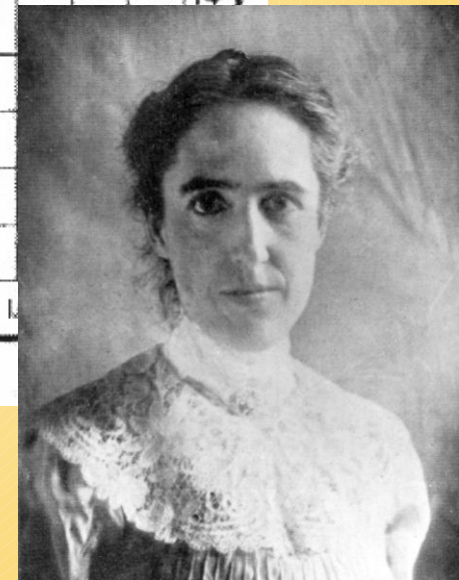
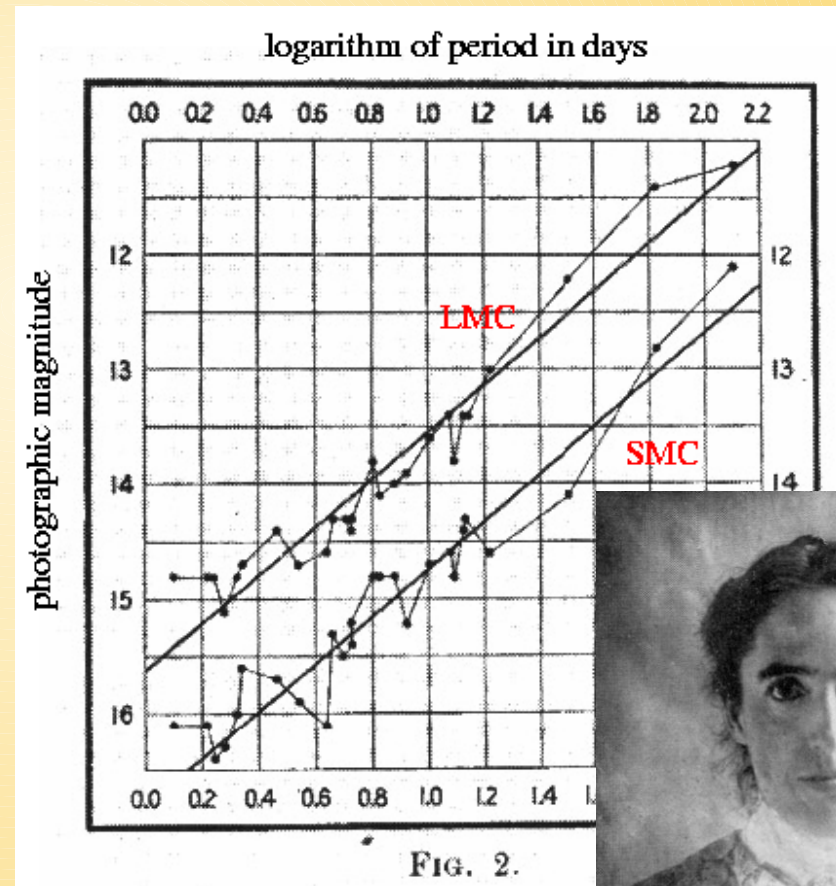
- První objevená periodicky proměnná hvězda byla pulzující (Mira, D. Fabricius, 1596) => konec aristotelovského náhledu na svět





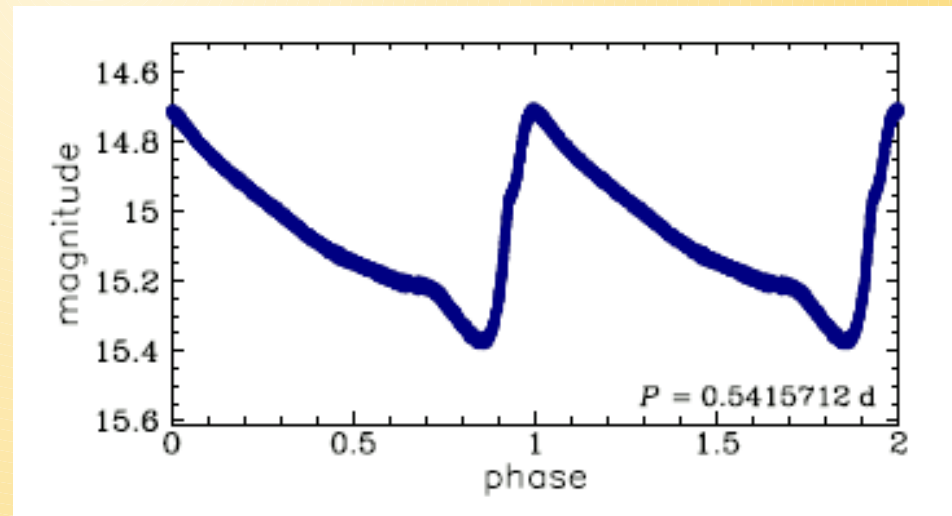
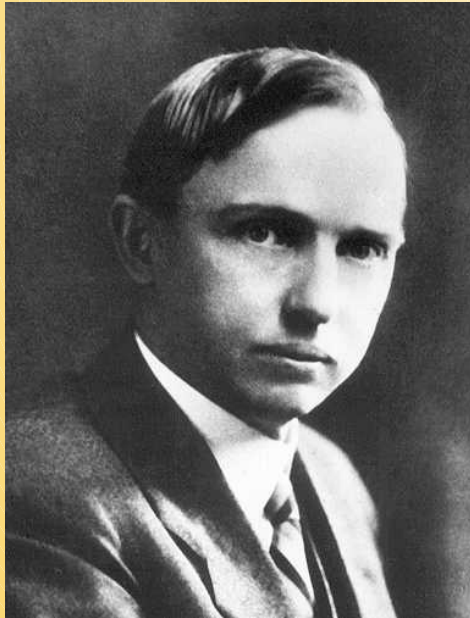
# Pulzující hvězdy v kontextu dějin

- 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)



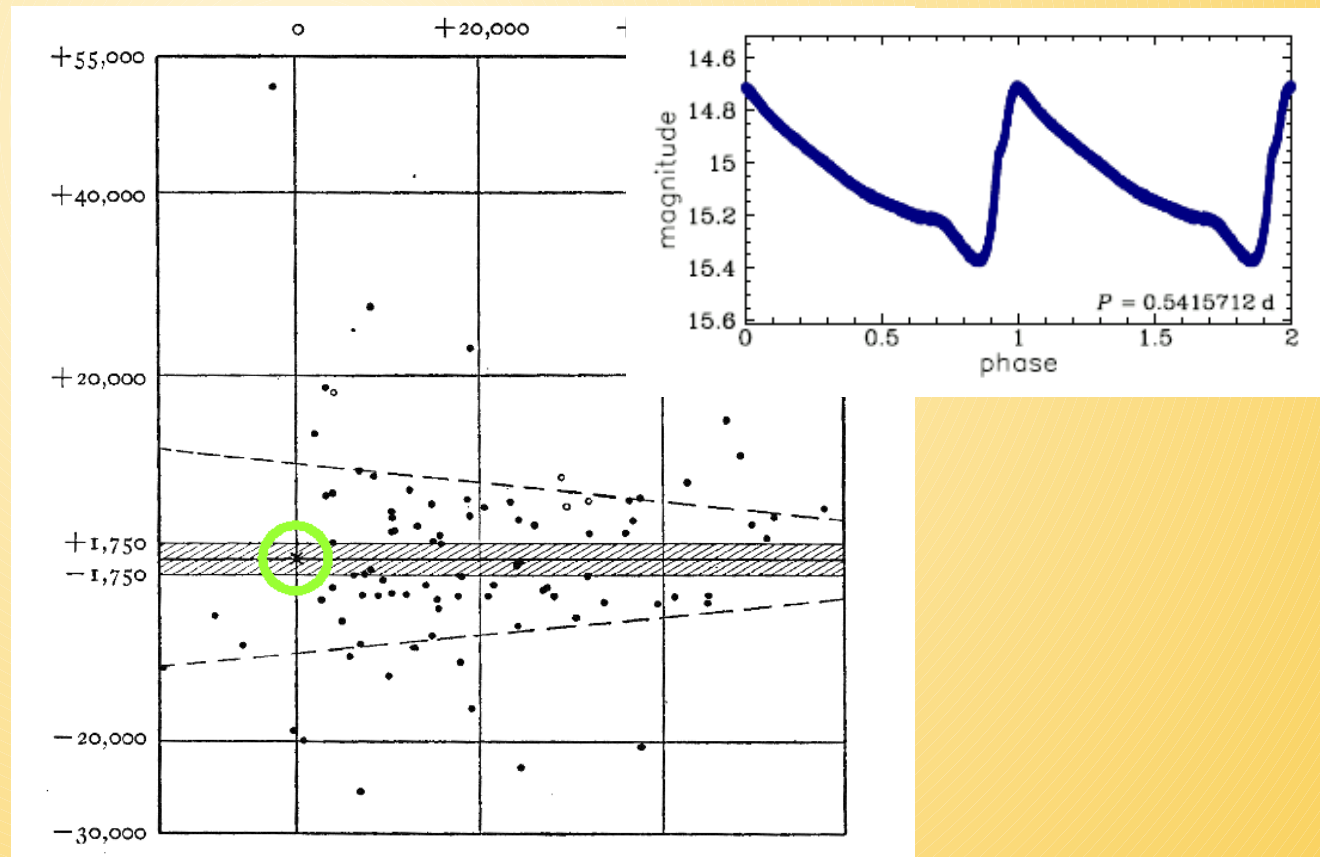
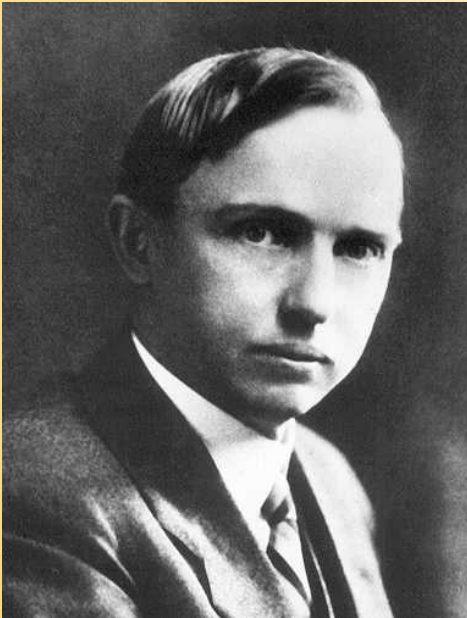
# Pulzující hvězdy v kontextu dějin

- 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)



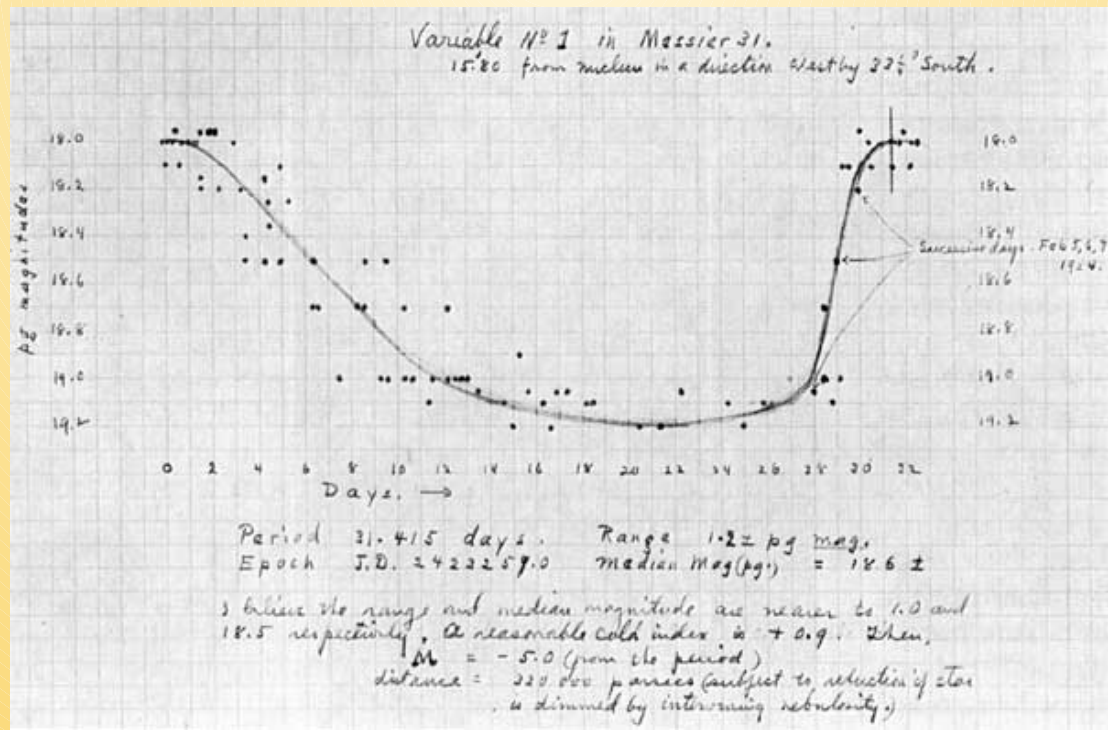
# Pulzující hvězdy v kontextu dějin

- 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)



# 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)



# 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

# Jak hvězdy pulzují

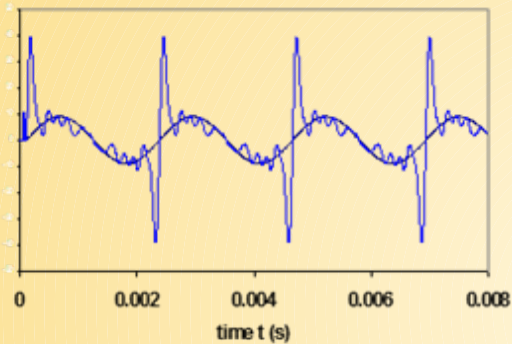
- Vlastní módy pulzací (pulzace na vlastních frekvencích)



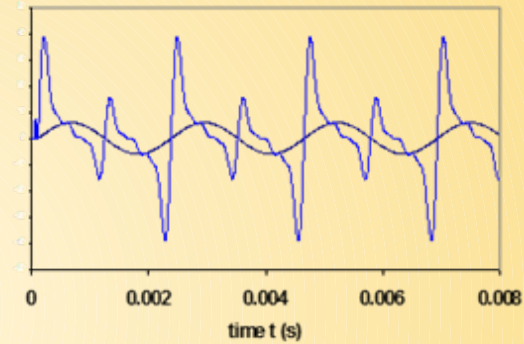
# Jak hvězdy pulzují

- Vlastní módy pulzací (pulzace na vlastních frekvencích)

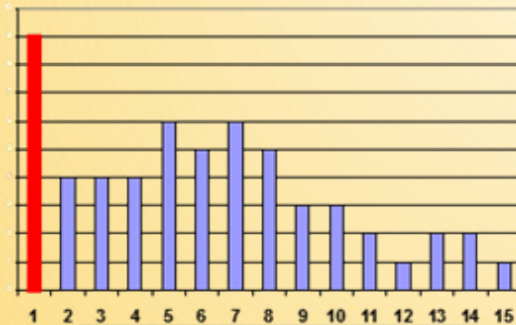
violin recording



viola recording

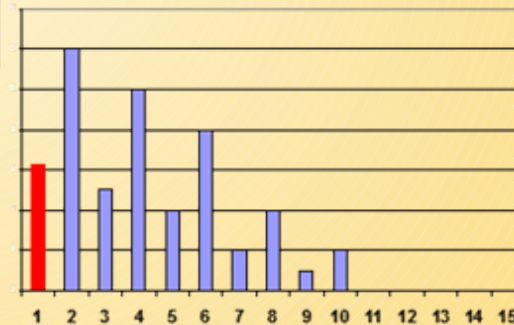


violin spectrum



harmonics ( $f_1 = 440$  Hz)

viola spectrum

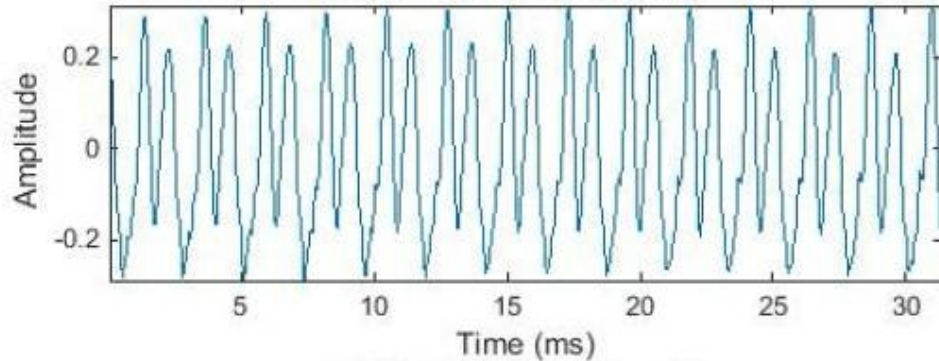


harmonics ( $f_1 = 440$  Hz)

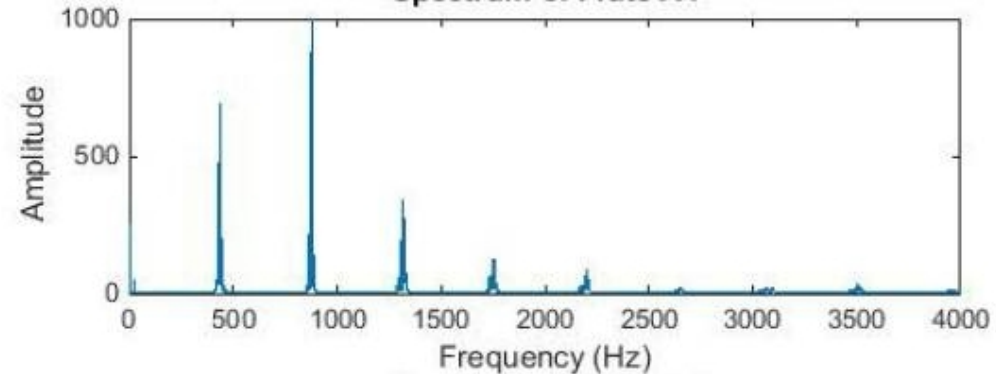
# Jak hvězdy pulzují

- Vlastní módy pulzací (pulzace na vlastních frekvencích)

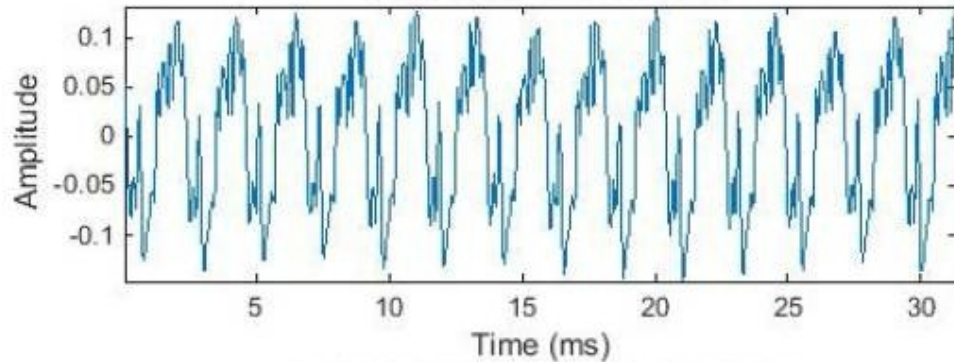
Flute A4 in Time Domain



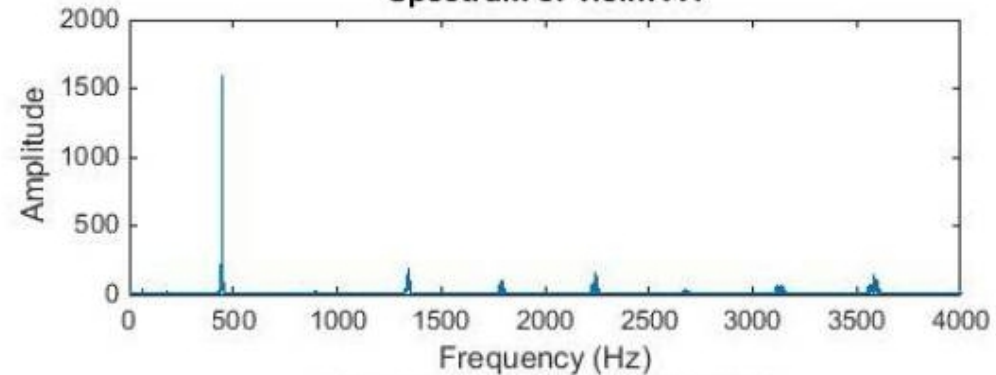
Spectrum of Flute A4



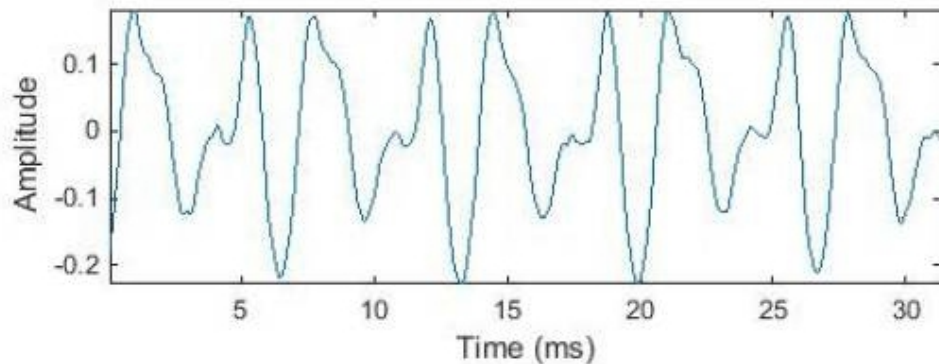
Violin A4 in Time Domain



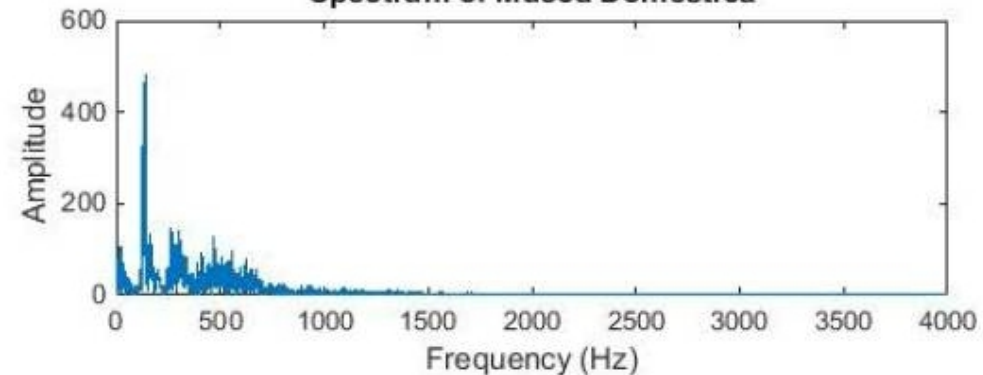
Spectrum of violin A4



Musca Domestica in Time Domain



Spectrum of Musca Domestica

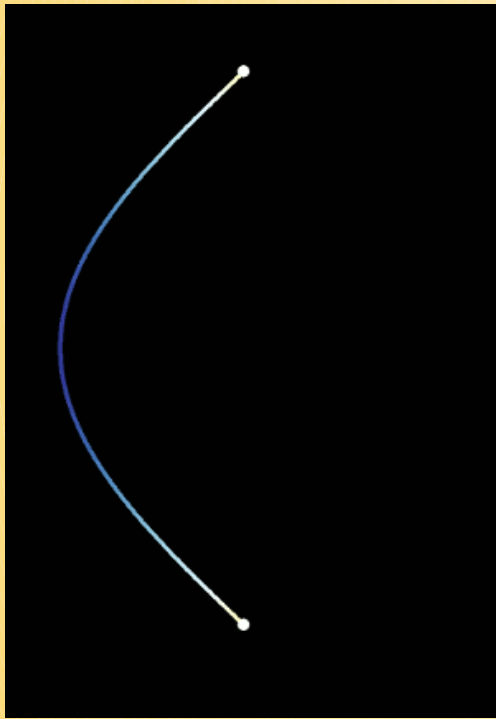




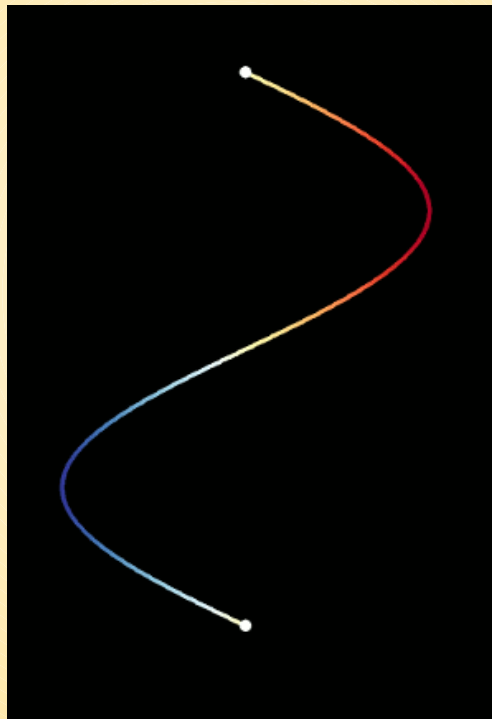
# Jak hvězdy pulzují

- Vlastní módy pulzací (pulzace na vlastních frekvencích)

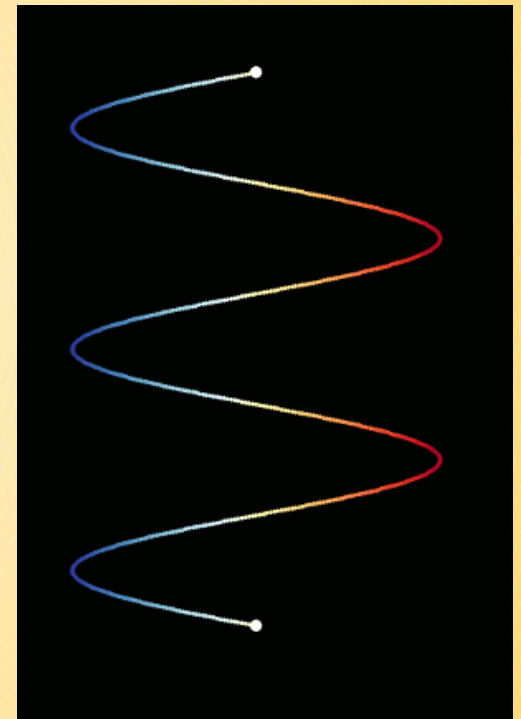
1D oscilace – struna, píšťala. Pulzace popsány jedním číslem popisující počet uzlů



0



1

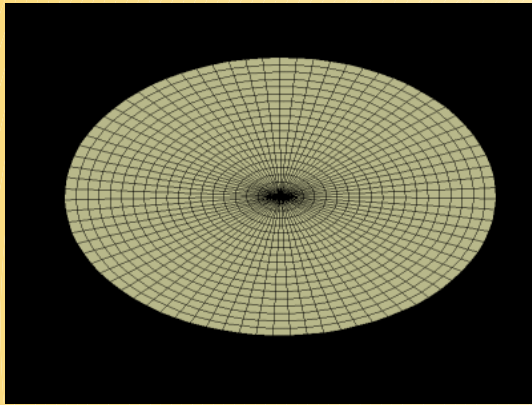


4

# Jak hvězdy pulzují

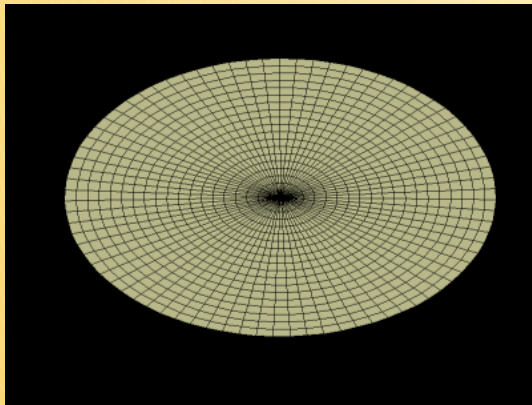
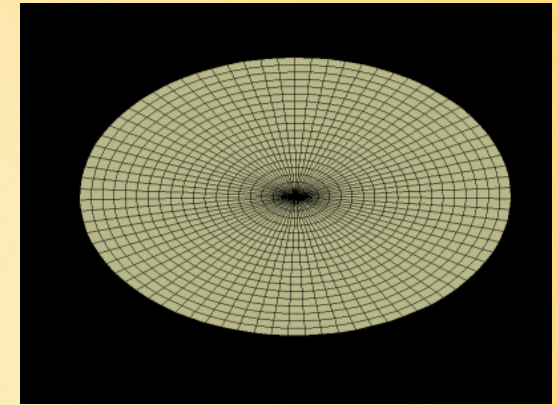
- Vlastní módy pulzací (pulzace na vlastních frekvencích)

2D oscilace – blána na bubnu, dvě čísla nutná k popisu pulzací



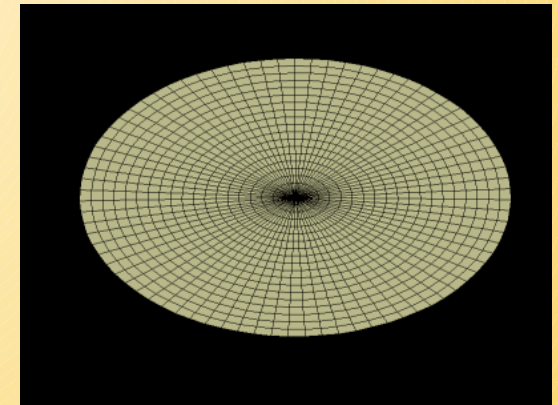
0,0

1,2



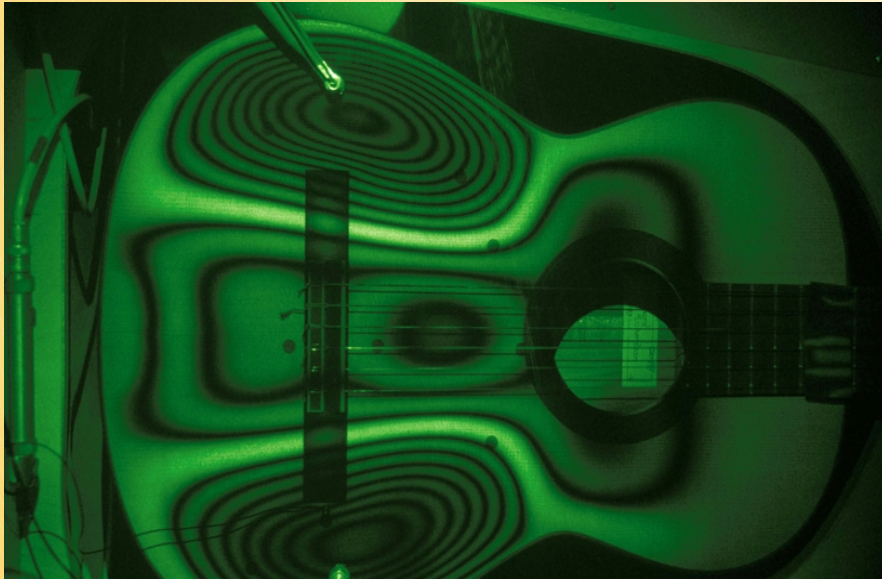
5,0

4,2



# Jak hvězdy pulzují

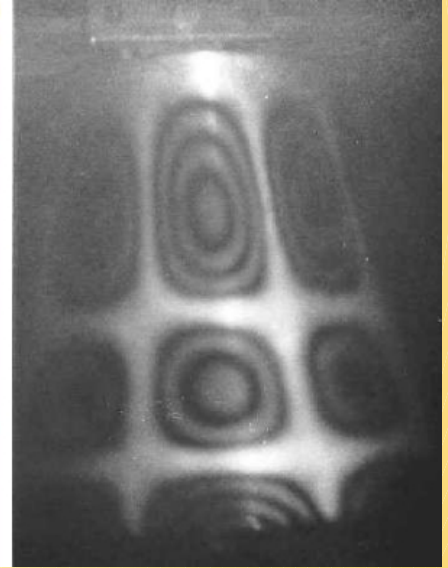
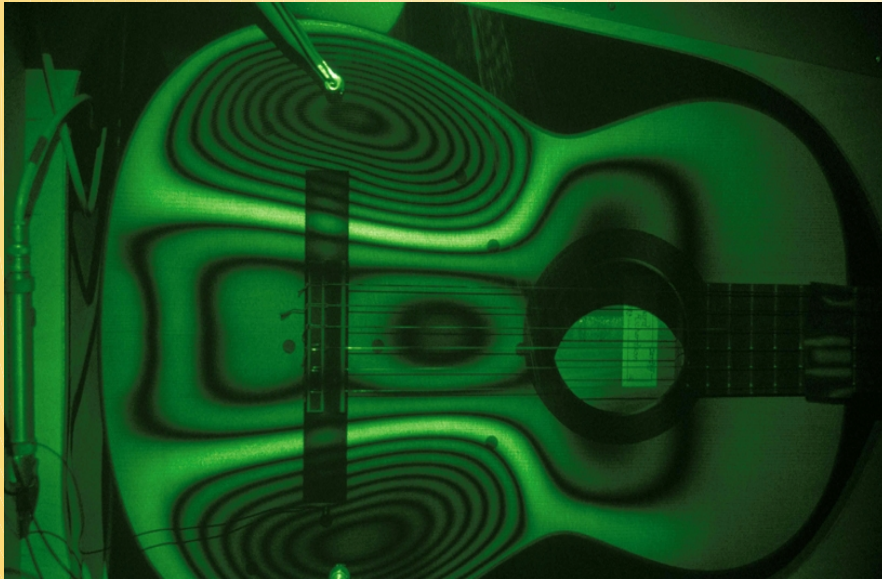
- Vlastní módy pulzací (pulzace na vlastních frekvencích)  
2D oscilace – blána na bubnu, dvě čísla nutná k popisu pulzací



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

# Jak hvězdy pulzují

- Vlastní módy pulzací (pulzace na vlastních frekvencích)
  - 2D oscilace – blána na bubnu, dvě čísla nutná k popisu pulzací

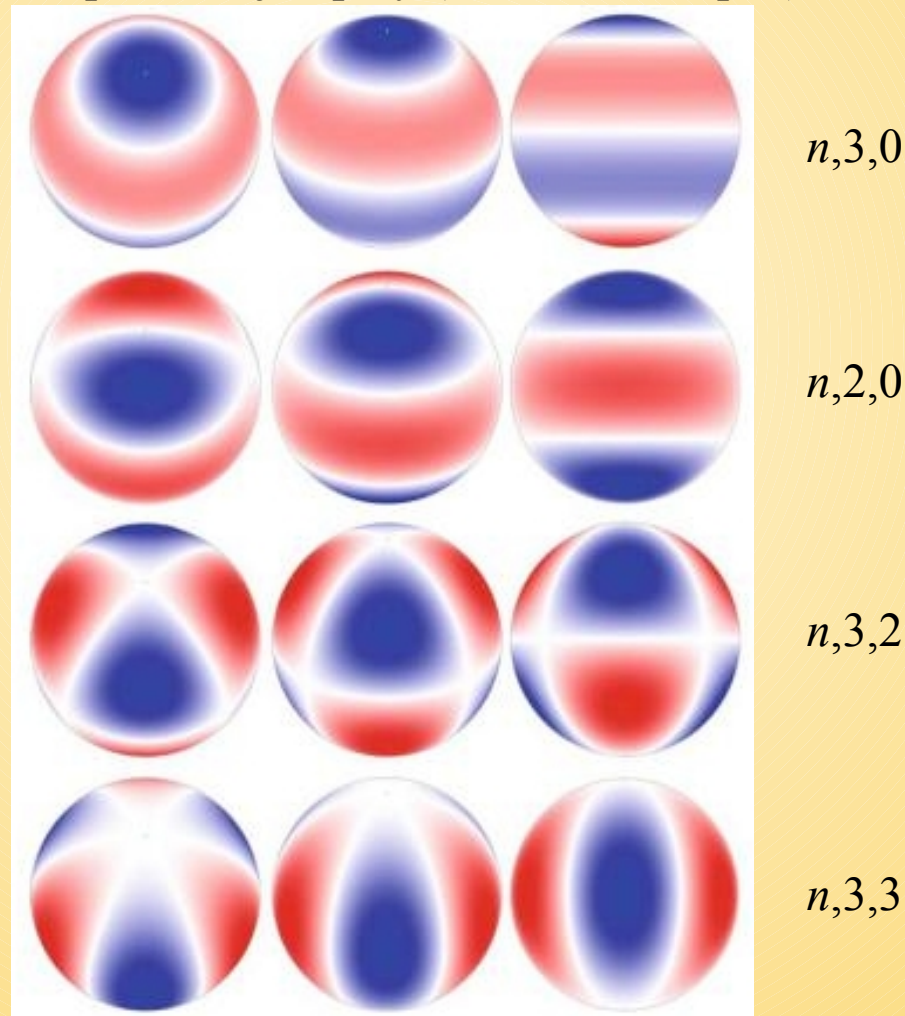


Mauro 2017, An overview on Asteroseismology, Proceedings of Science

# Jak hvězdy pulzují

3D oscilátory – HVĚZDY – k popisu pulzací nutná 3 čísla:

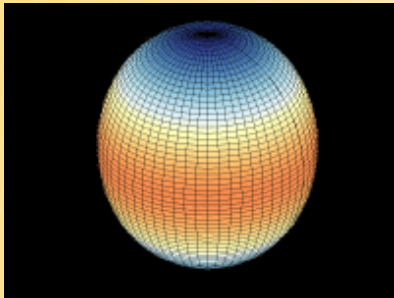
- $n$  – počet uzlových sfér; definuje mód radiálních pulzací
- $l$  – počet všech uzlových kružnic na povrchu hvězdy (sférický stupeň)
- $m$  – počet uzlových kružnic procházející póly (azimutální stupeň)



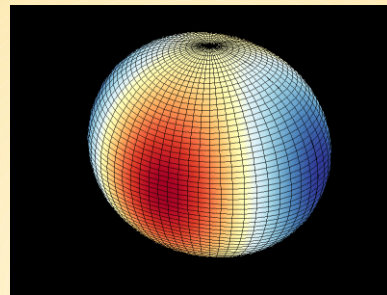
# Jak hvězdy pulzují

3D oscilátory – HVĚZDY – k popisu pulzací nutná 3 čísla:

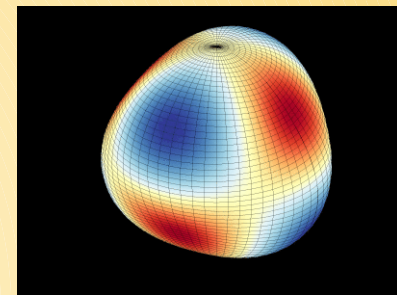
- $n$  – počet uzlových sfér; definuje mód radiálních pulzací
- $l$  – počet všech uzlových kružnic na povrchu hvězdy (sférický stupeň)
- $m$  – počet uzlových kružnic procházející póly (azimutální stupeň)



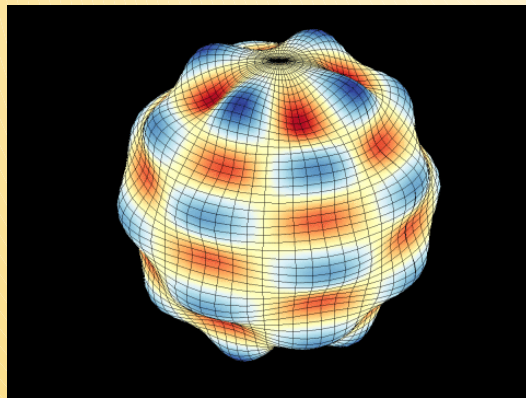
$n, 2, 0$



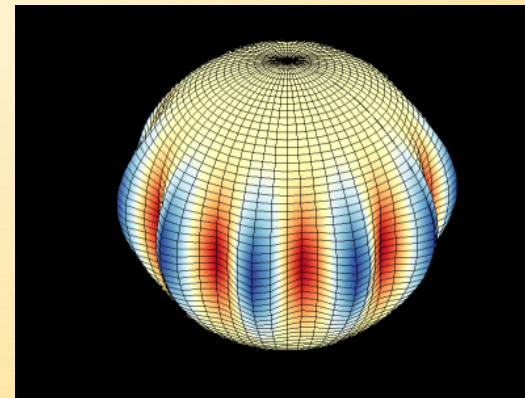
$n, 2, 2$



$n, 3, 2$



$n, 10, 4$



$n, 10, 10$

# Jak hvězdy pulzují

Rovnice kontinuity

Rovnice přenosu záření

Zákon zachování energie

Zákon zachování hybnosti



Rovnice popisující hvězdné pulzace

# Jak hvězdy pulzují

Rovnice popisující hvězdné pulzace



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

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

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

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

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



# Jak hvězdy pulzují

- Tlakové módy (p-módy, zvukové vlny); vysoké frekvence ( $>5$  c/d), v celé hvězdě;  $\nu^2 > L_l^2, N^2$
- Gravitační módy (g-módy); nízké frekvence, vnitřní části hvězdy;  $\nu^2 < L_l^2, N^2$

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

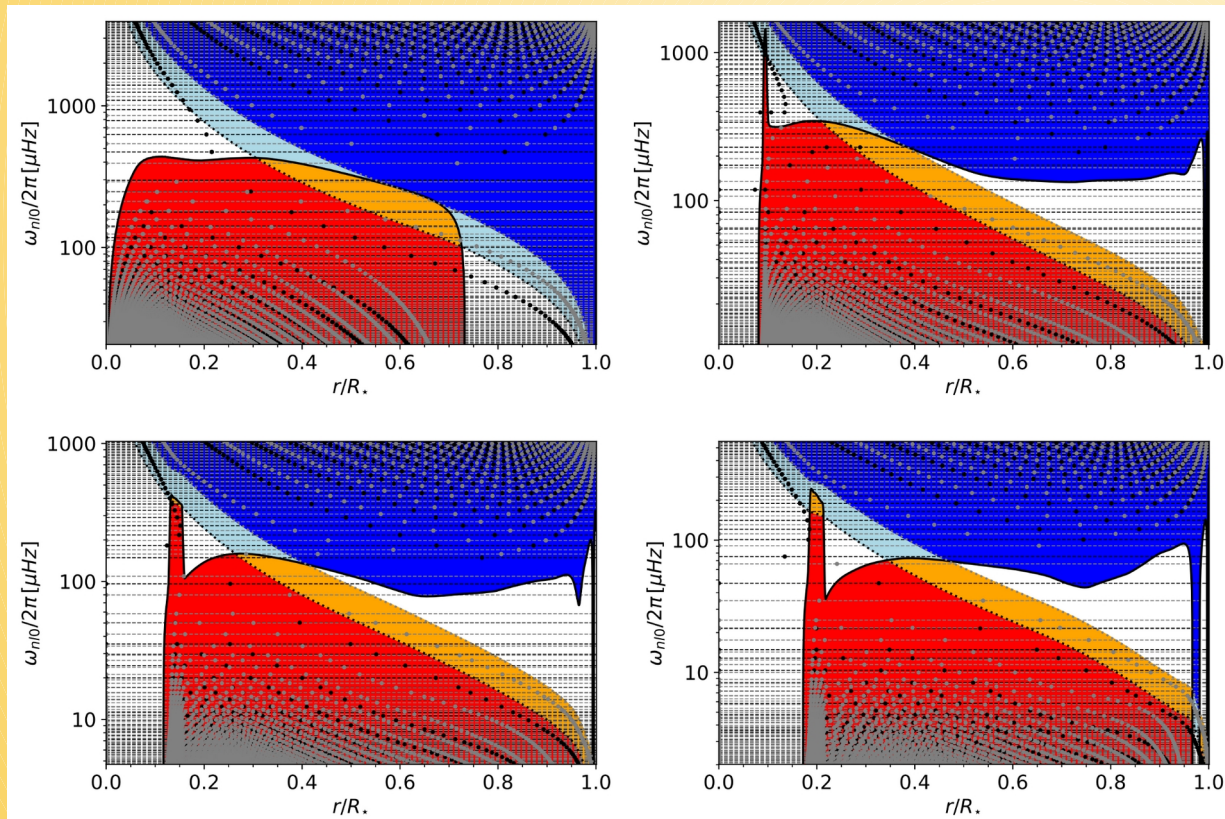
$$k_r = \frac{1}{\nu^2 c_0^2} (L_l^2 - \nu^2) (\nu^2 - N^2)$$

Brunt-Väisälä frequency

$$N^2 = g_0 \left[ \frac{1}{\Gamma_{1,0}} \frac{d \ln p_0}{dr} - \frac{d \ln \rho_0}{dr} \right]$$

Lamb frequency

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

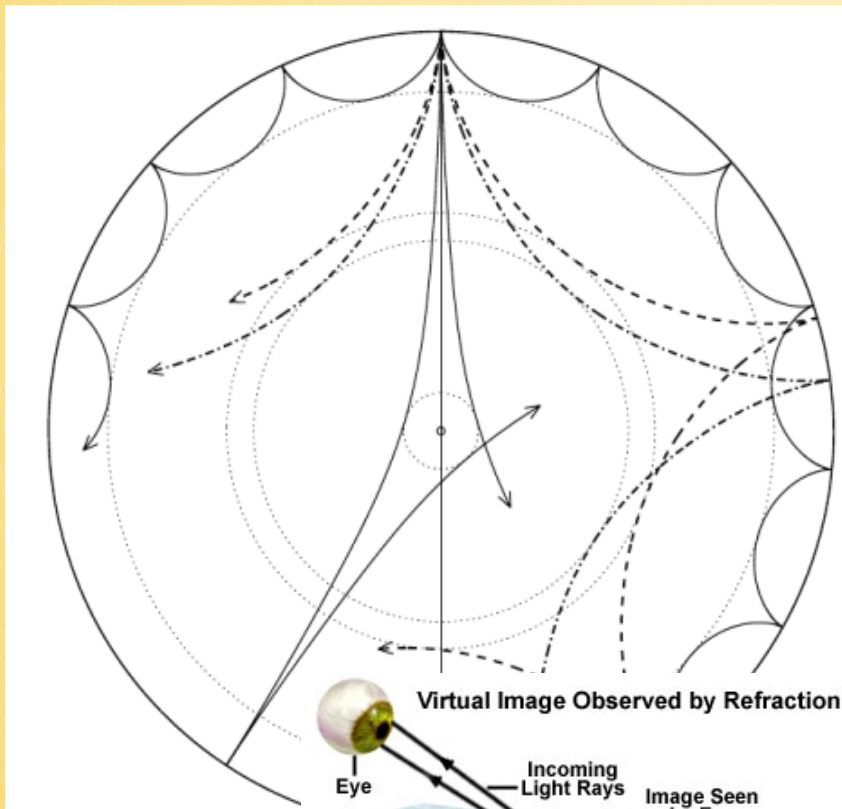


Modrá: p-módy, červená: g-módy. Shora vlevo pro hmotnosti 1, 1.7, 5, a 15  $M_{\text{Slunce}}$

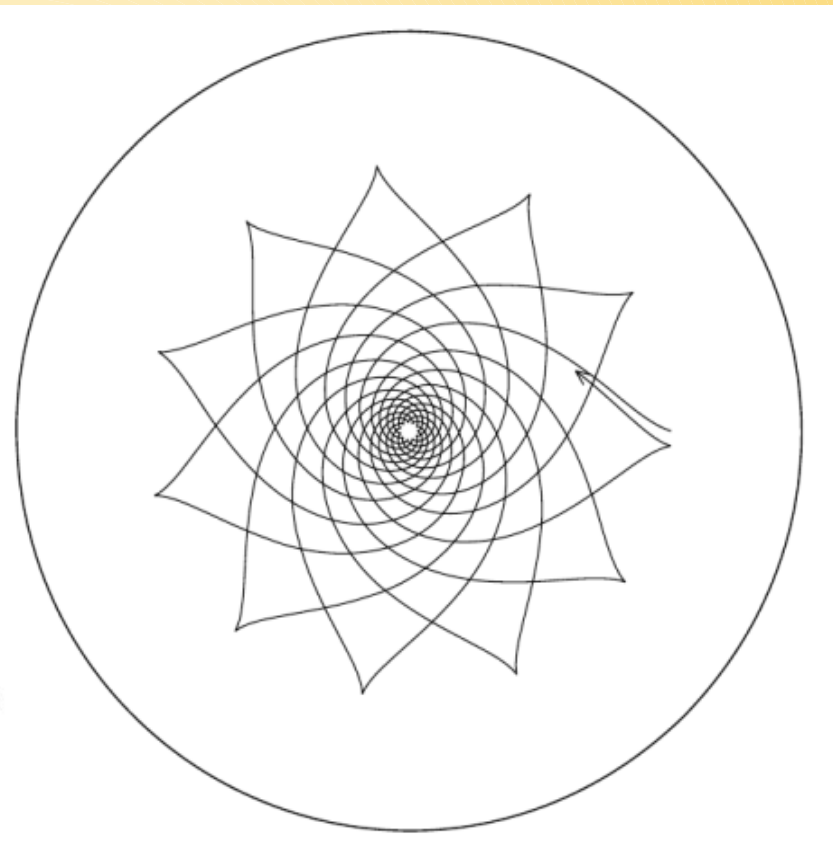
# Jak hvězdy pulzují

- Tlakové módy (p-módy, zvukové vlny); vysoké frekvence ( $>5$  c/d), v celé hvězdě;  $v^2 > L_r^2, N^2$
- Gravitační módy (g-módy); nízké frekvence, vnitřní části hvězdy;  $v^2 < L_r^2, N^2$

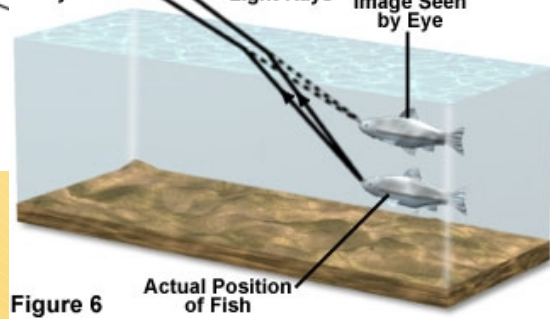
p-módy



g-módy



$$c = \sqrt{\frac{\gamma p}{\rho}} = \sqrt{\frac{\gamma k T}{\mu m_u}}$$



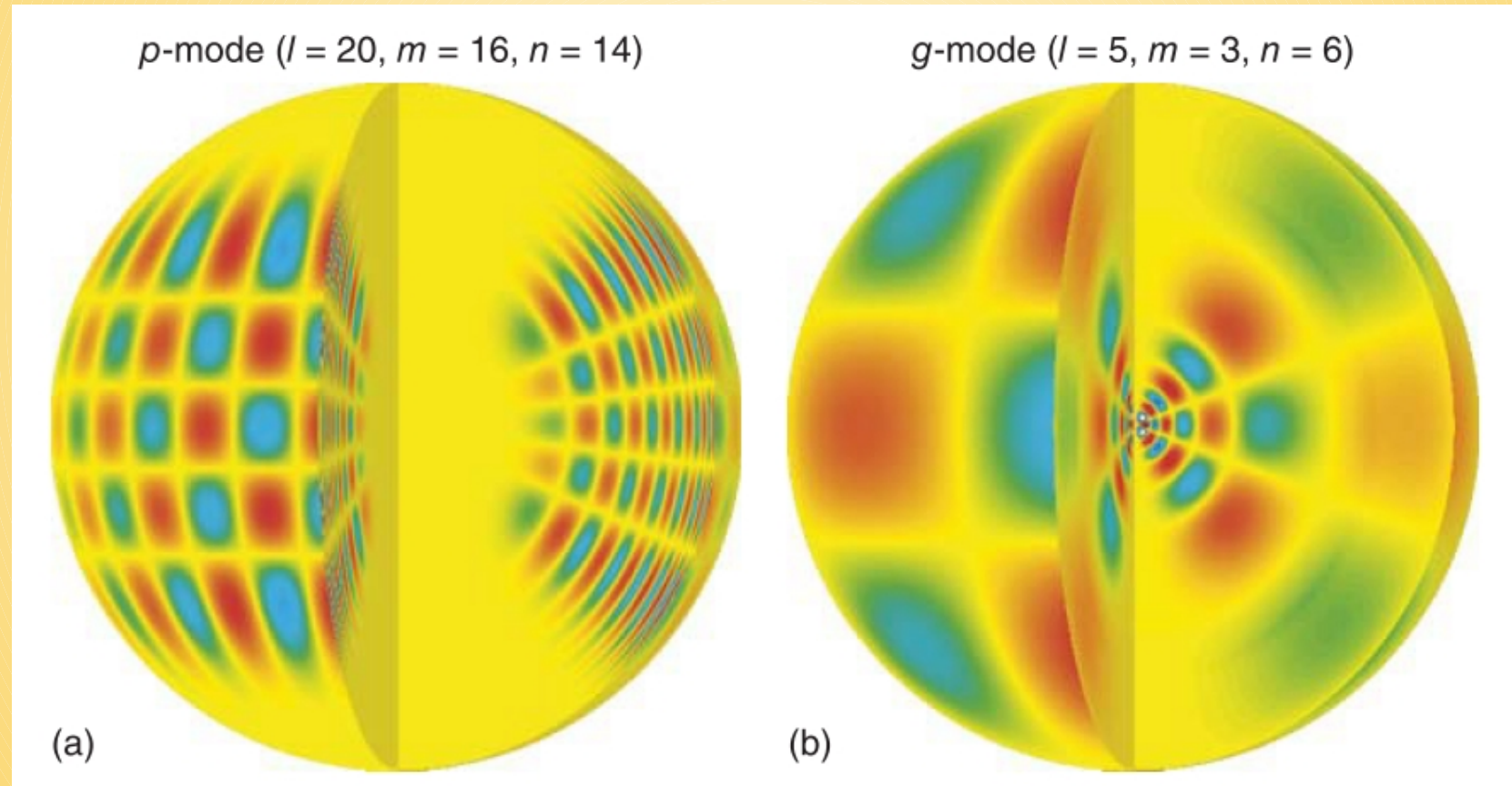
Chistensen-Dalsgaard (2014), <http://astro.phys.au.dk/~jcd/>

# Jak hvězdy pulzují

- Tlakové módy (p-módy, zvukové vlny); vysoké frekvence ( $>5$  c/d), v celé hvězdě;  $v^2 > L_r^2, N^2$
- Gravitační módy (g-módy); nízké frekvence, vnitřní části hvězdy;  $v^2 < L_r^2, N^2$

p-módy

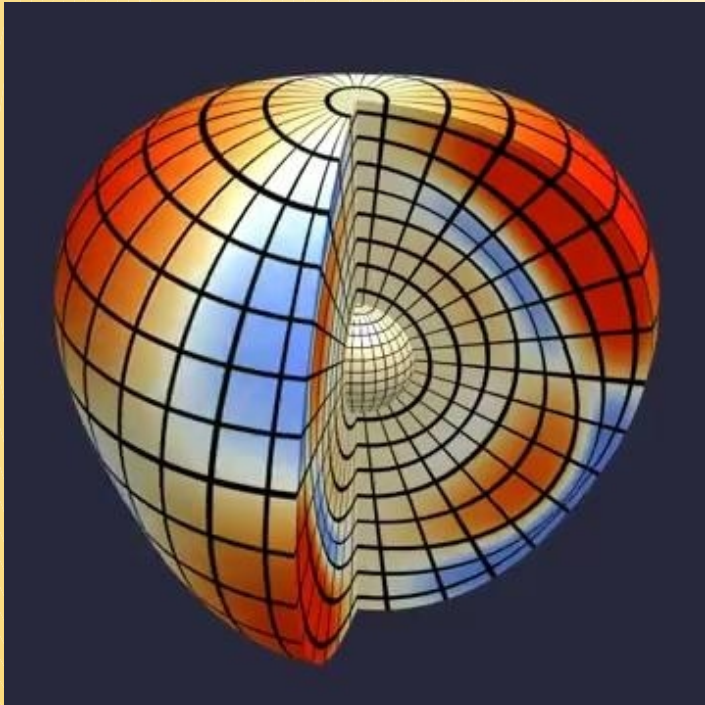
g-módy



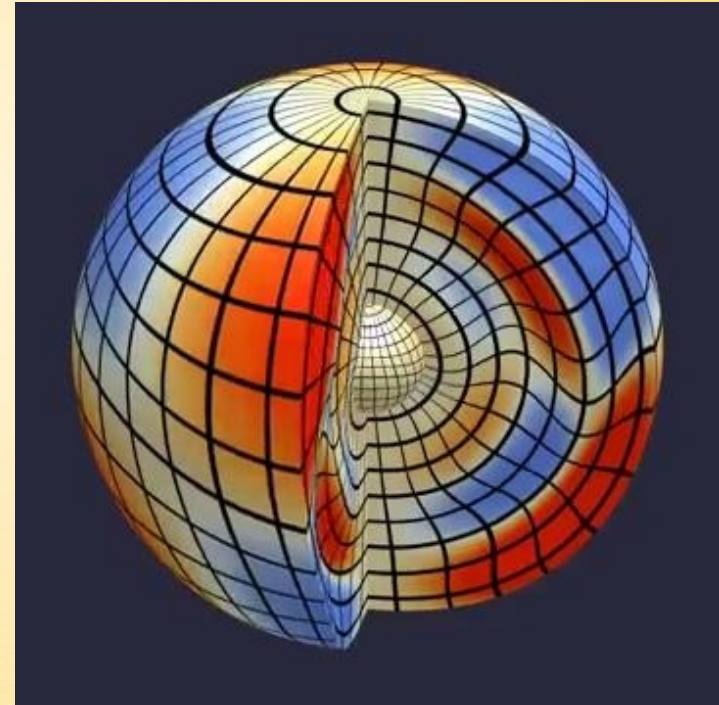
# Jak hvězdy pulzují

- Tlakové módy (p-módy, zvukové vlny); vysoké frekvence ( $>5$  c/d), v celé hvězdě;  $v^2 > L_r^2, N^2$
- Gravitační módy (g-módy); nízké frekvence, vnitřní části hvězdy;  $v^2 < L_r^2, N^2$

p-módy



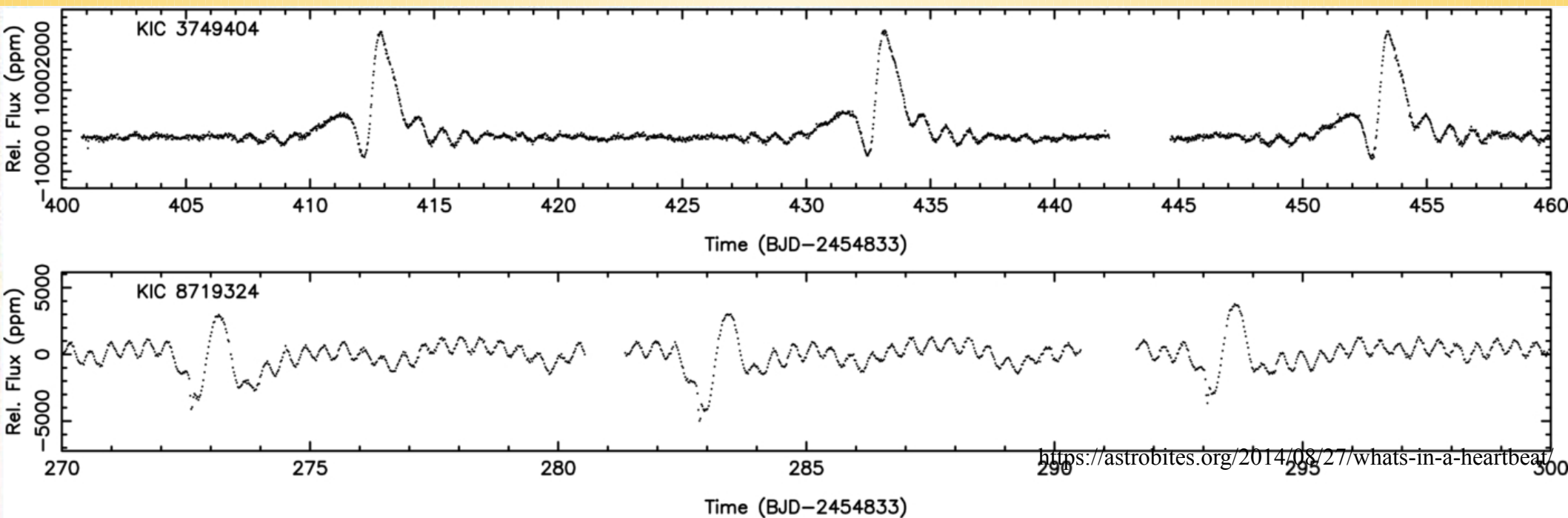
g-módy



# Proč hvězdy pulzují

# Proč hvězdy pulzují

- Díky pohybu hmoty uvnitř hvězdy (konvekce) – stochasticky vybuzené kmitání
- Vnitřní “motor”
  - Časově proměnná produkce energie ( $\epsilon$  mechanismus)
  - Proměnná opacita ( $\kappa$  mechanismus)
  - Proměnná schopnost absorbovat energii ( $\gamma$  mechanismus)
  - modulace toku energie na hranici konvektivní zóny
- Generování pulzací v dvojhvězdách se silně eliptickými drahami

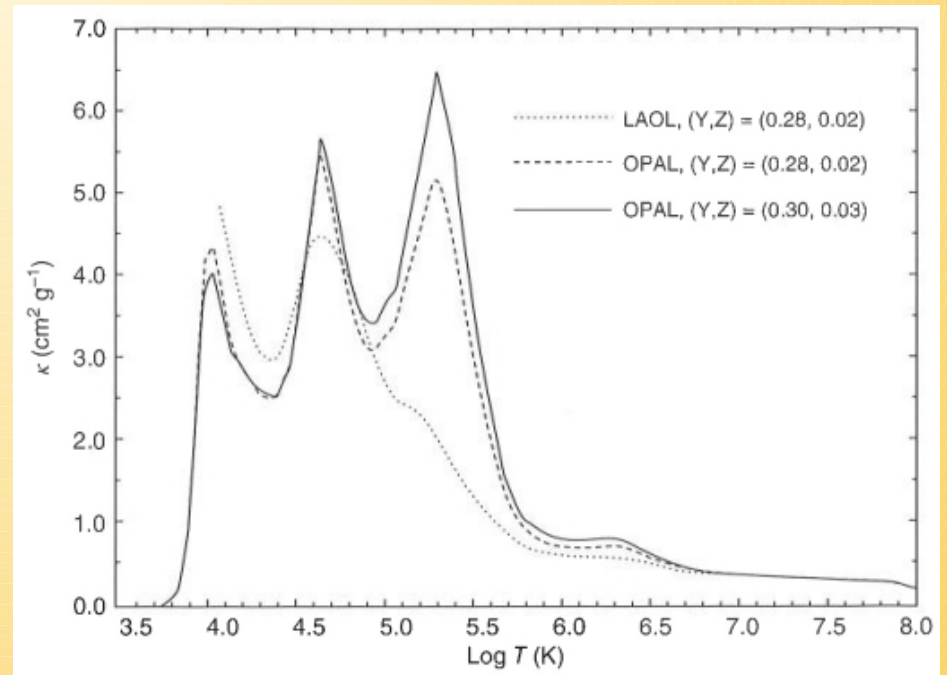
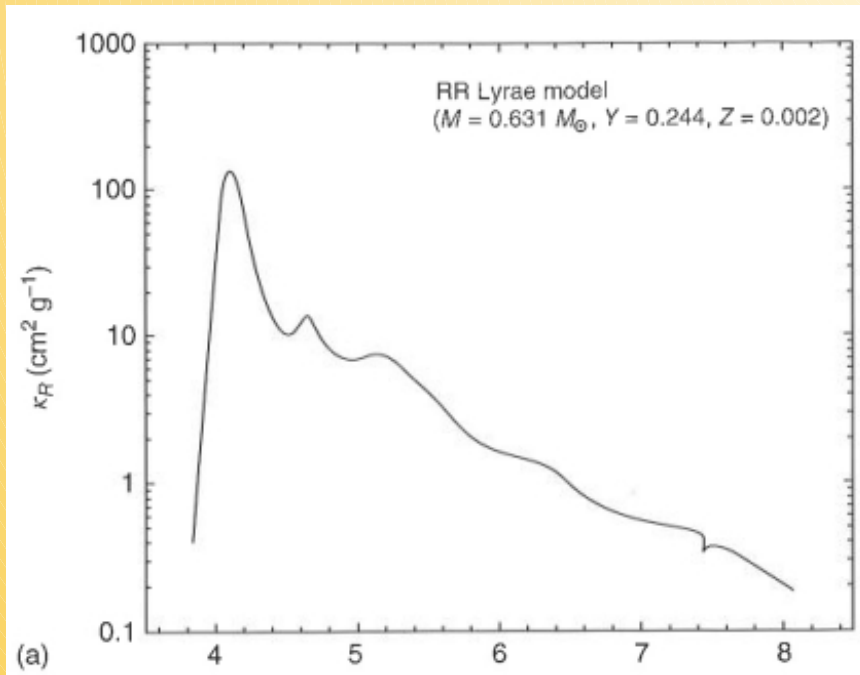


# Radiální pulzace

$\kappa$ -mechanismus v He II vrstvě (HII, Fe vrstvách, teploty 10000, 40000, 200000 K)



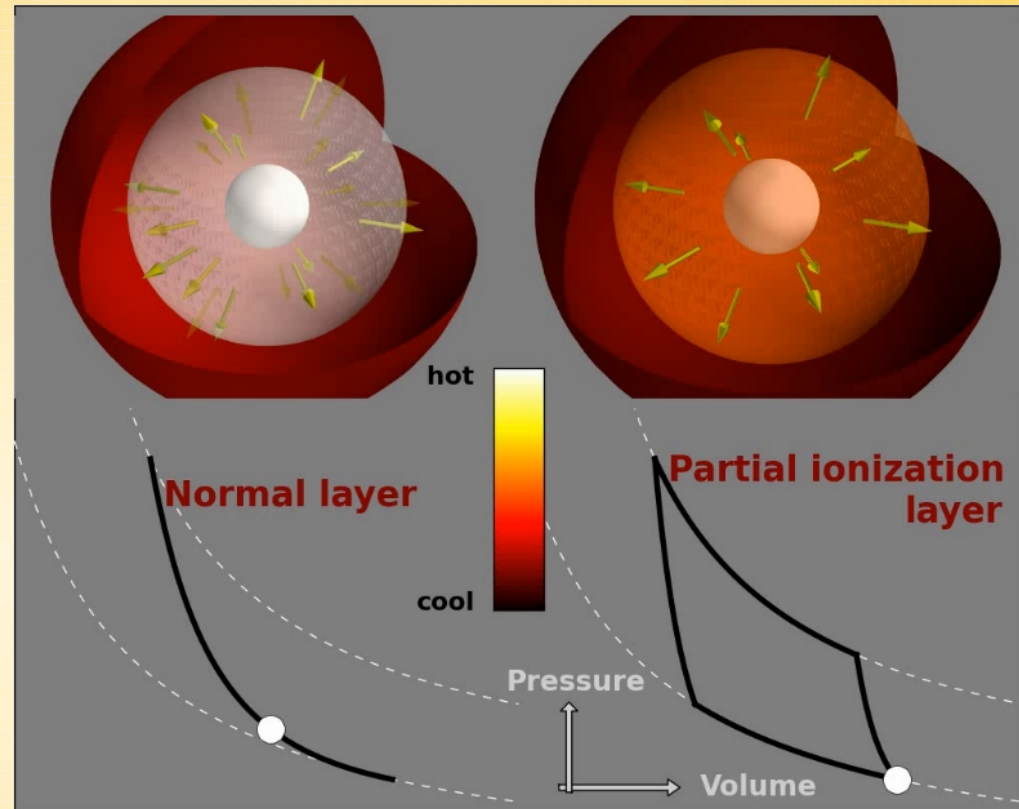
$$\kappa \sim \rho T^{-\frac{7}{2}}$$



# Radiální pulzace

$\kappa$ -mechanismus v He II vrstvě (HII, Fe vrstvách)

- 1 Záření ionizuje He II, opacita vzrůstá, což dále napomáhá další absorpci energie
- 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



Podpořeno  $\gamma$  mechanismem - chladnější vrstva má vyšší tepelnou kapacitu a je tak schopna pojmout více tepla

$$W = \oint \frac{\delta Q \delta T(t)}{T_0} > 0$$

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

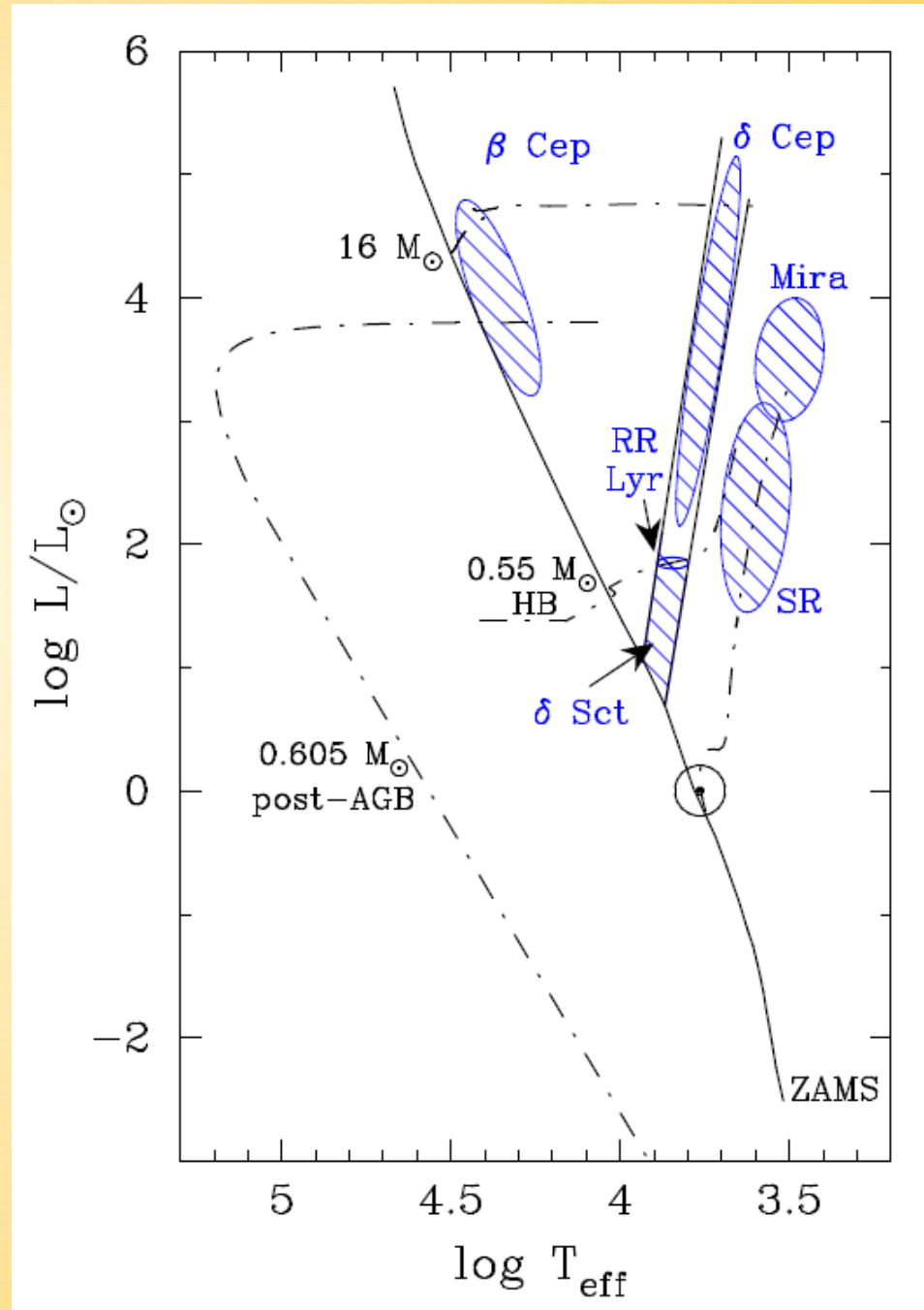


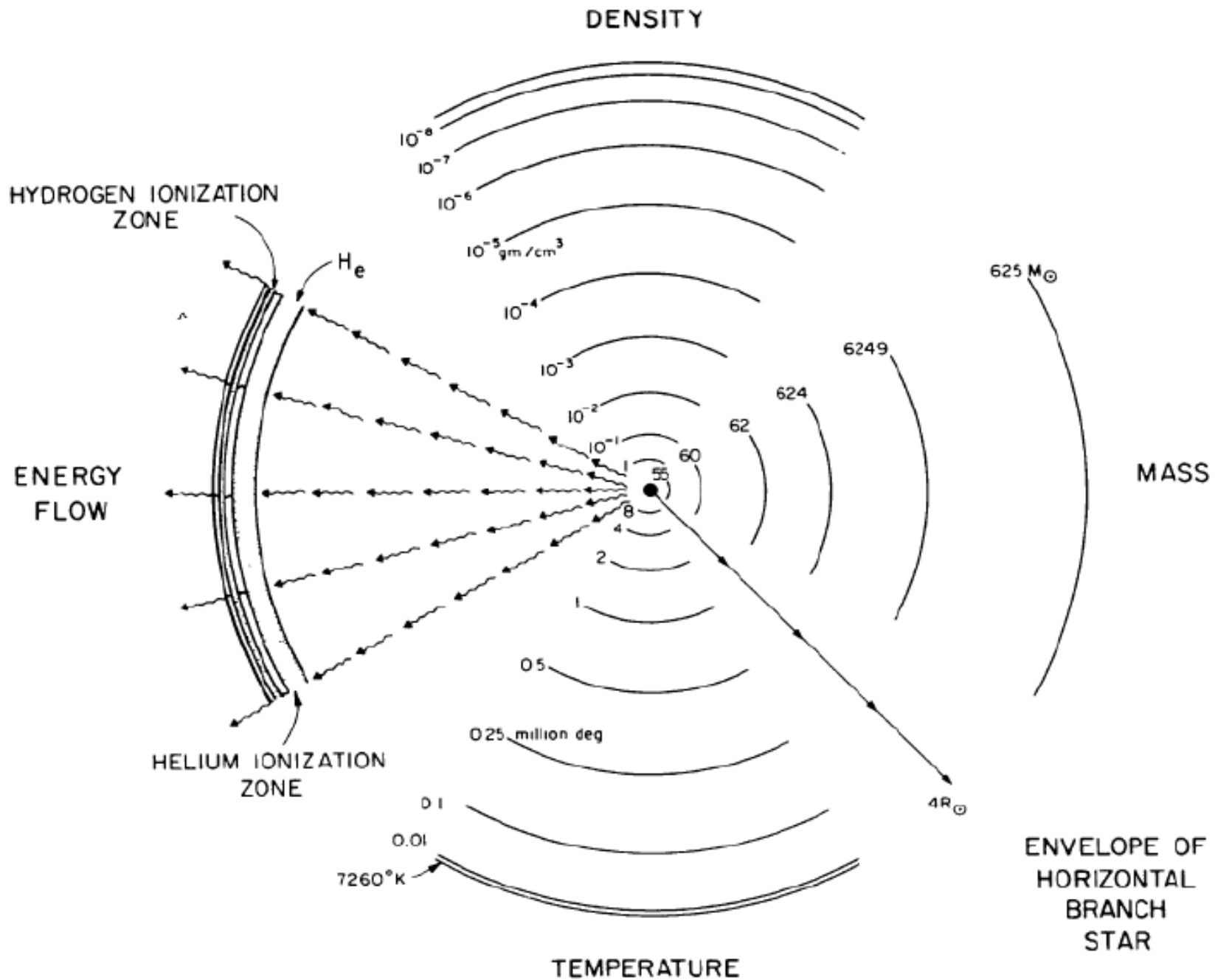
# Proč hvězdy pulzují

$\kappa$ -mechanismus v He II vrstvě (HII, Fe vrstvách)

- 1 Záření ionizuje He II, opacita vzrůstá, což dále napomáhá další absorpci energie
- 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

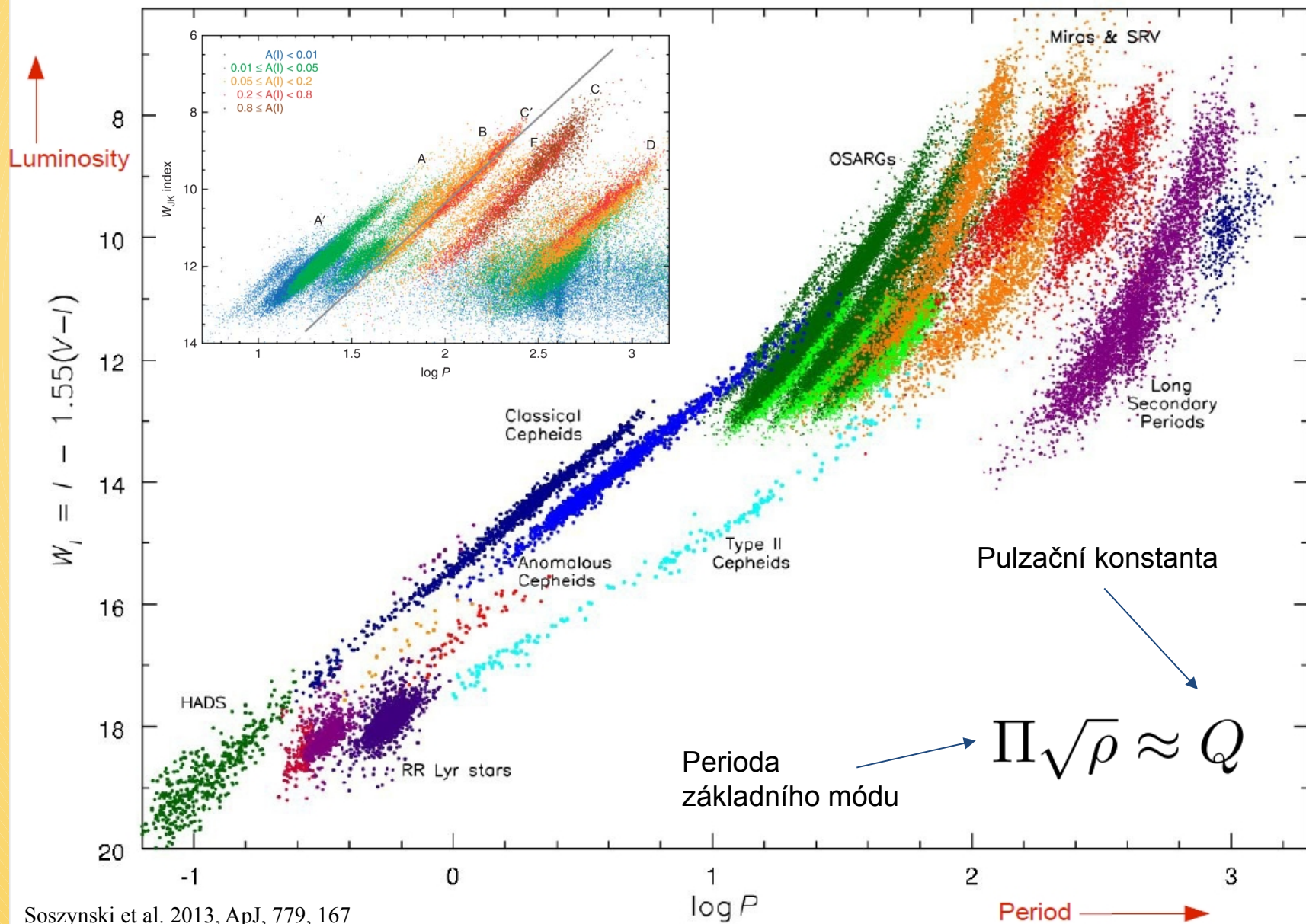
$$W = \oint \frac{\delta Q \delta T(t)}{T_0} > 0$$





# Vztah perioda-zářivý výkon

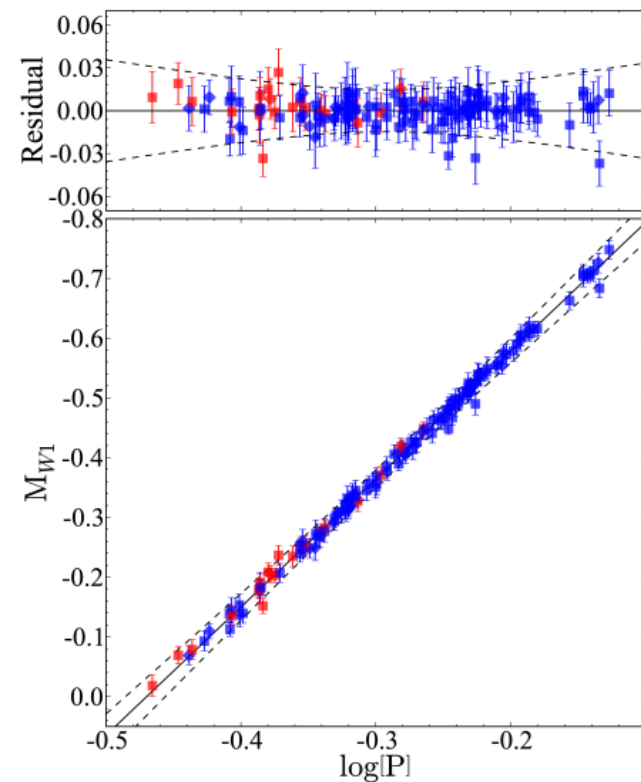
- Čím větší je hvězda, tím delší je perioda základního módu radiálních pulzací
- => vztah perioda-zářivý výkon => indikátor vzdálenosti



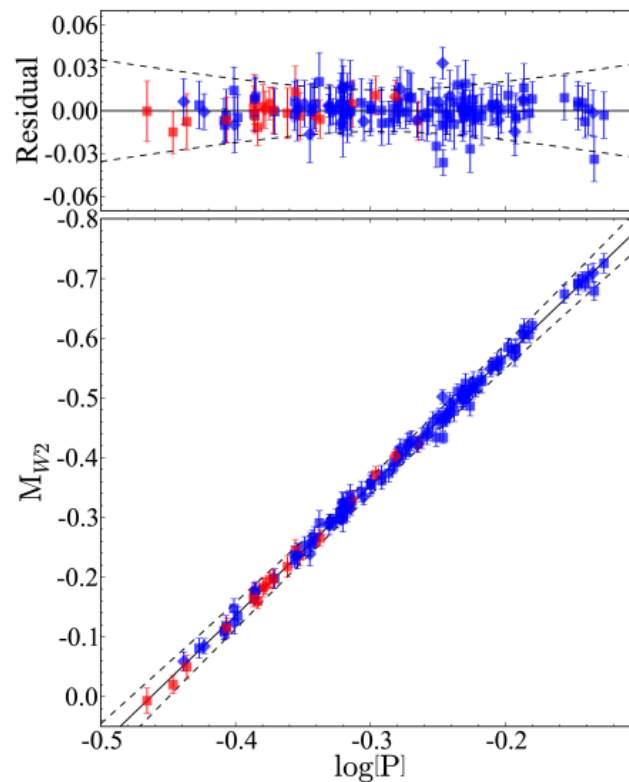
# Vztah perioda-zářivý výkon

- Čím větší je hvězda, tím delší je perioda základního módu radiálních pulzací
- => vztah perioda-zářivý výkon => indikátor vzdálenosti

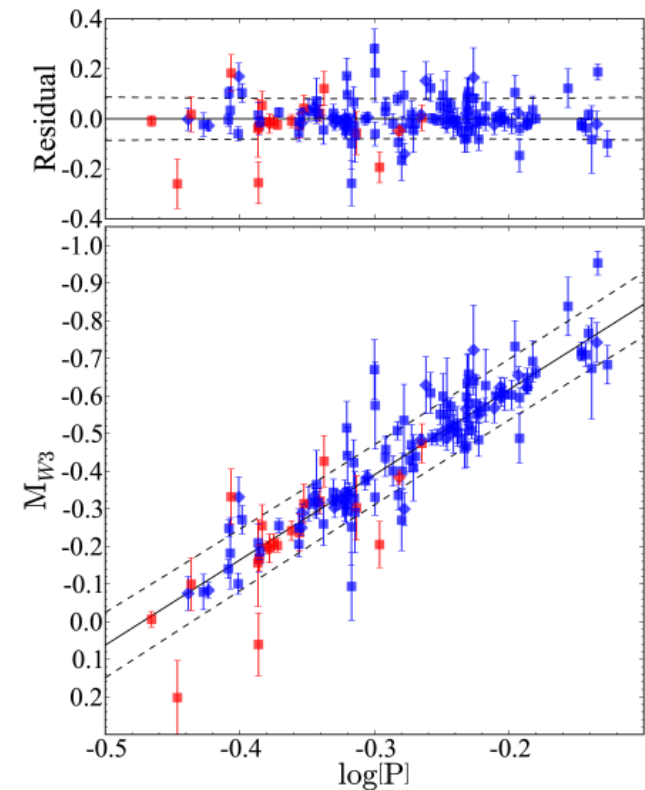
W1 Period-Luminosity Relation Fit



W2 Period-Luminosity Relation Fit

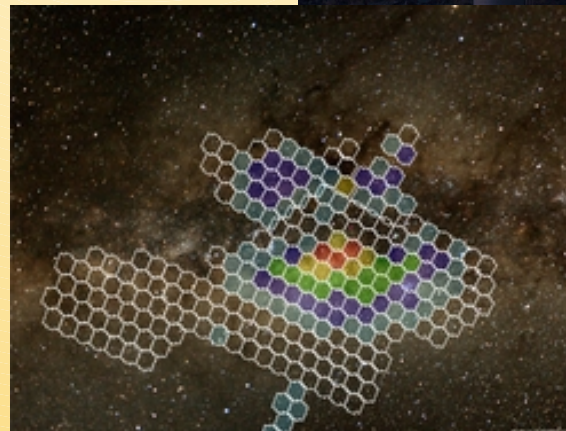
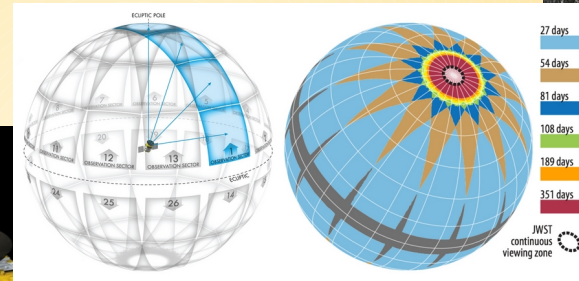
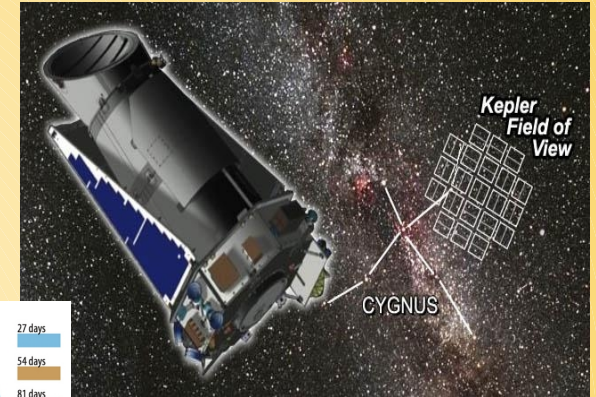


W3 Period-Luminosity Relation Fit



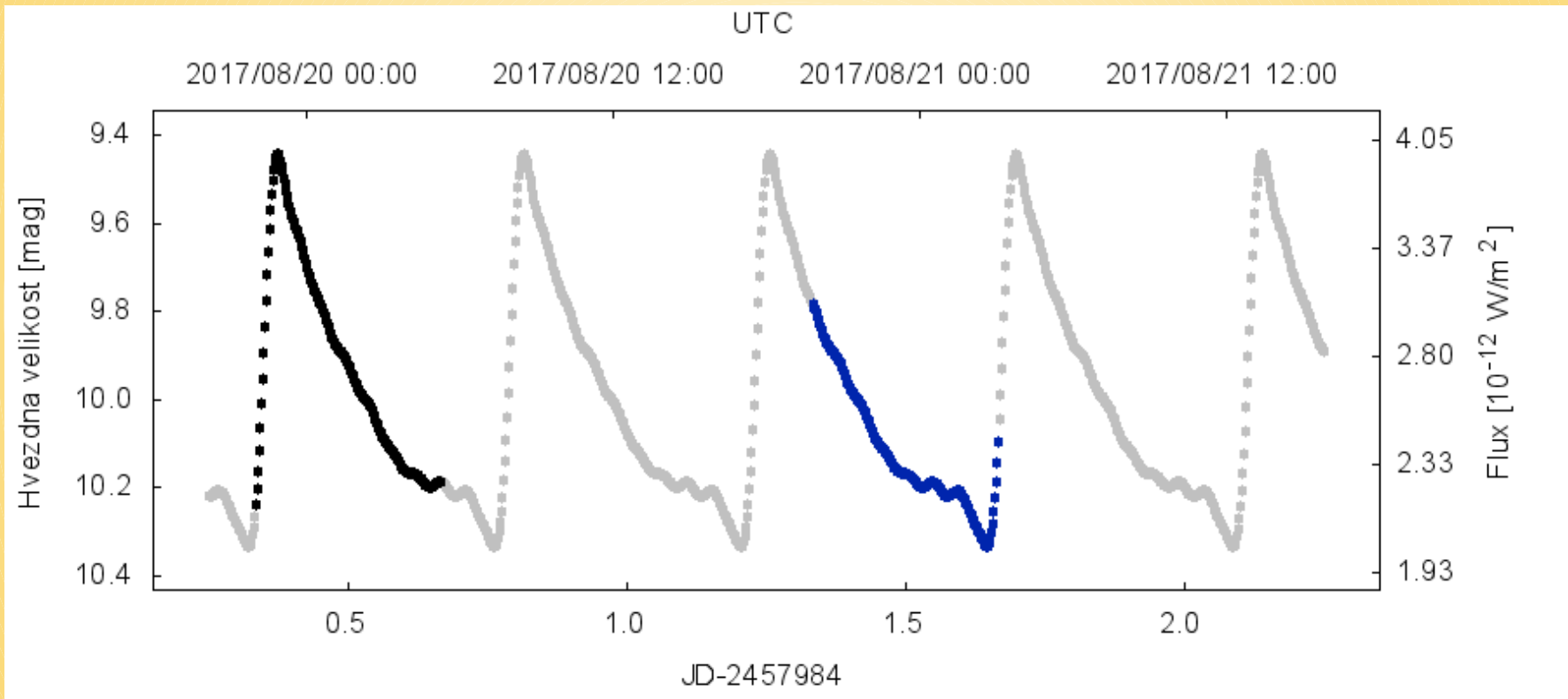
# Jak pulzující hvězdy zkoumáme

- **Fotometrie** – změna jasnosti v čase – světelná křivka



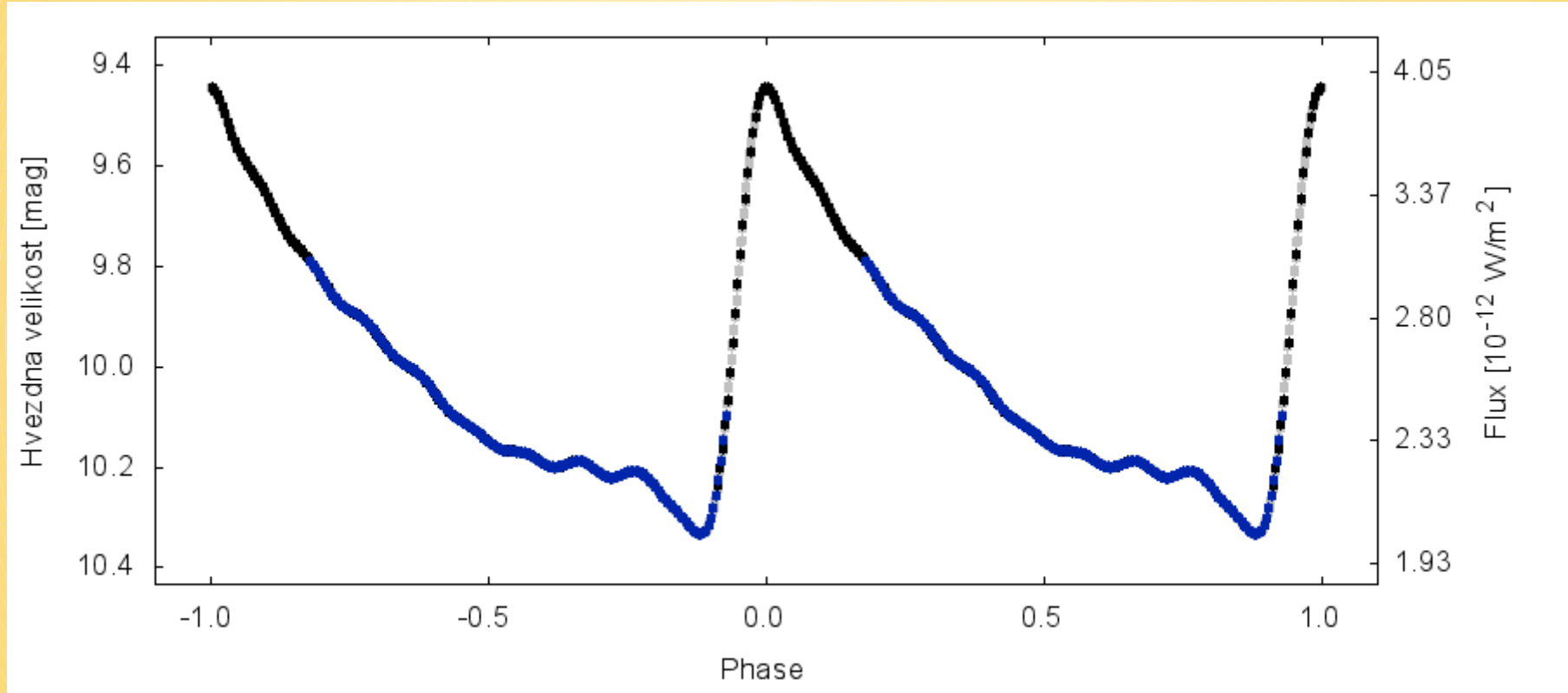
# Jak pulzující hvězdy zkoumáme

- **Fotometrie** – změna jasnosti v čase – světelná křivka



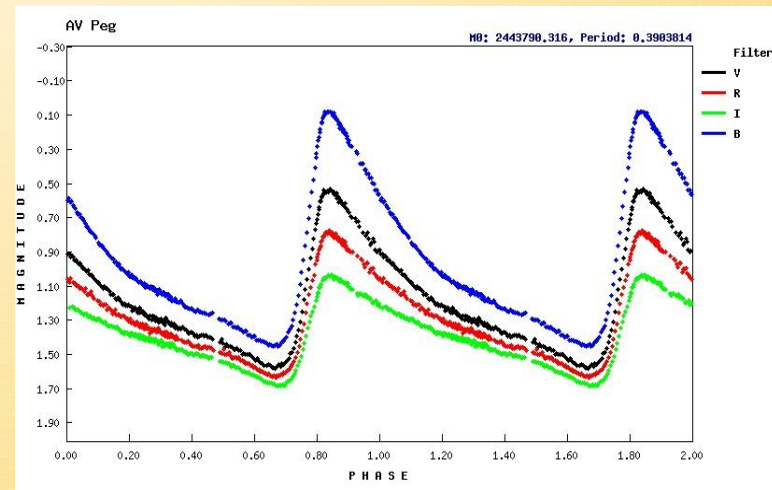
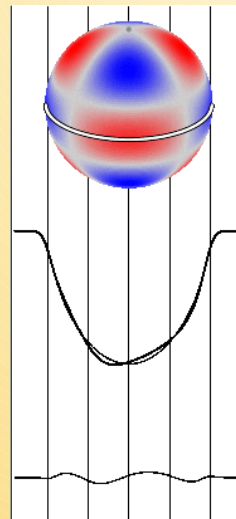
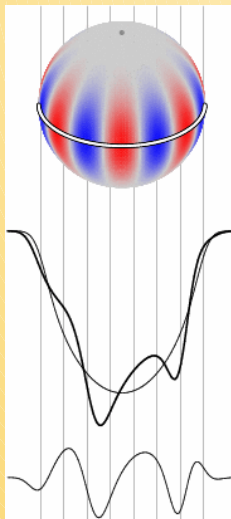
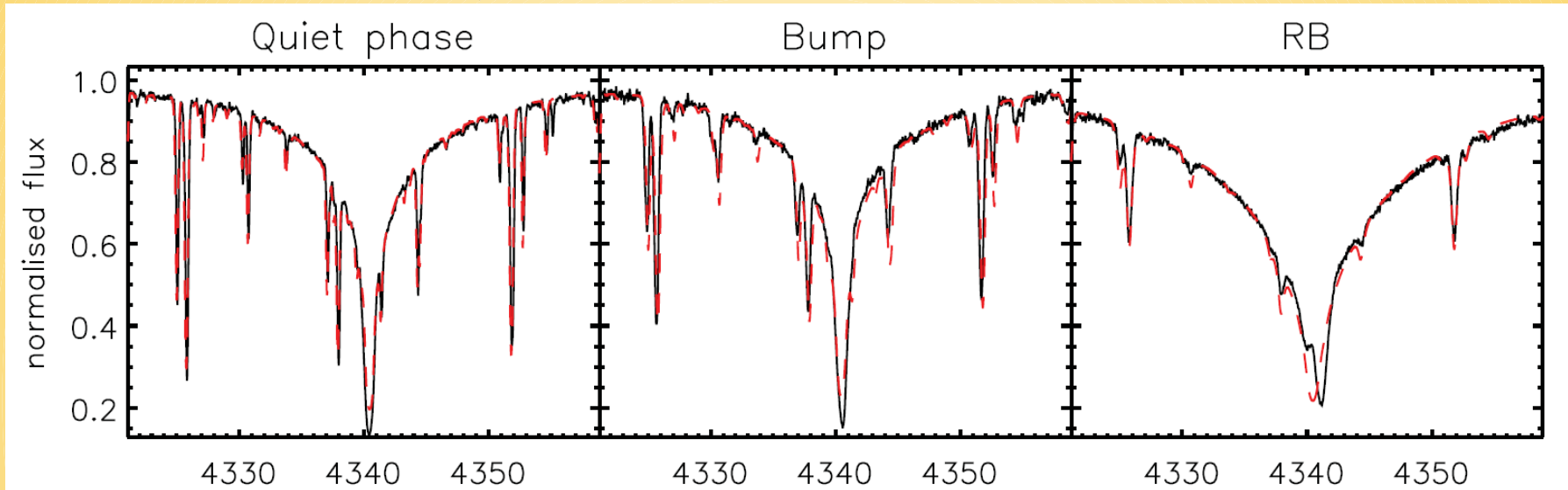
# Jak pulzující hvězdy zkoumáme

- **Fotometrie** – změna jasnosti v čase – světelná křivka



# Jak pulzující hvězdy zkoumáme

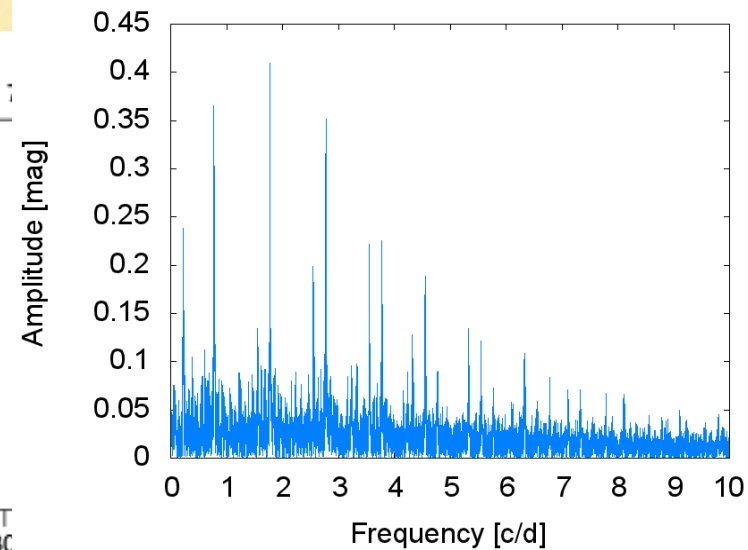
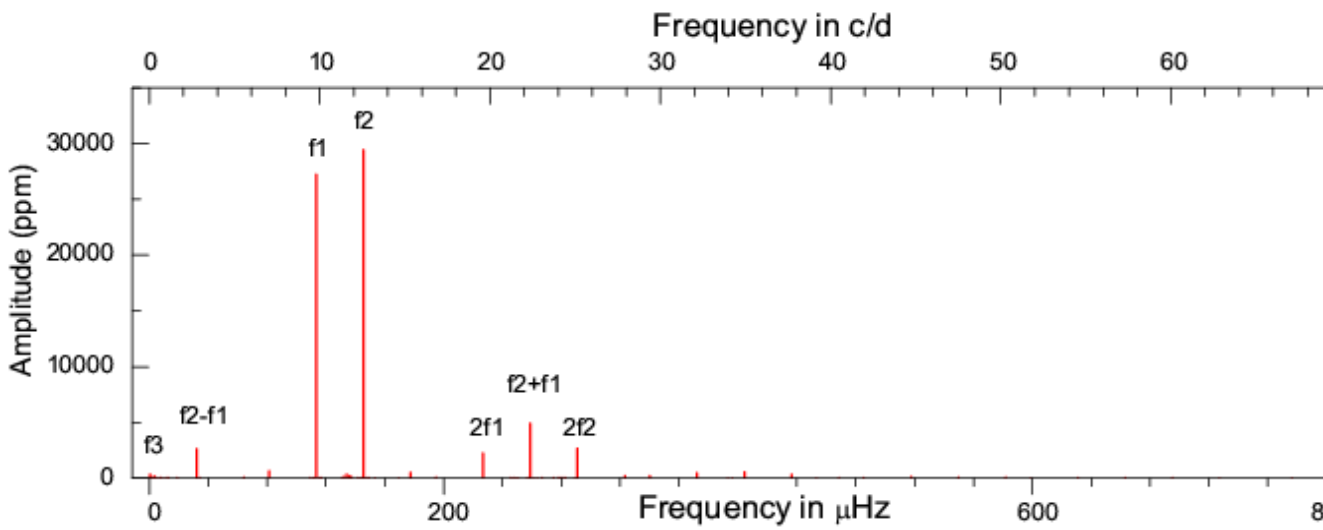
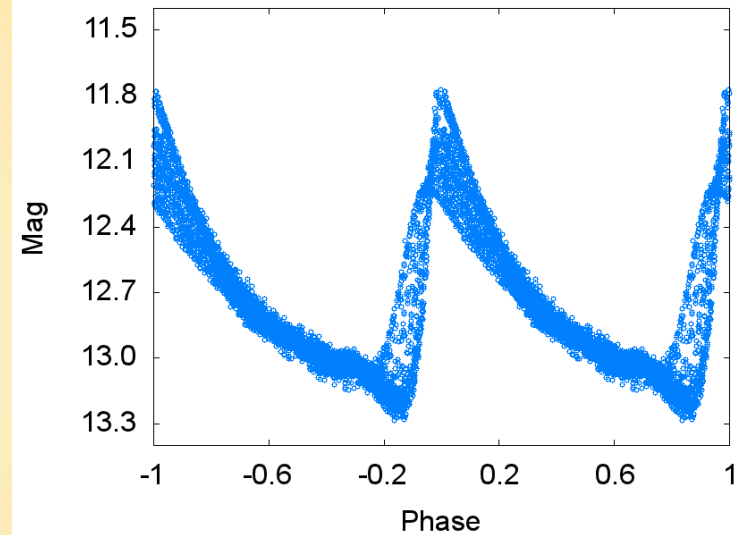
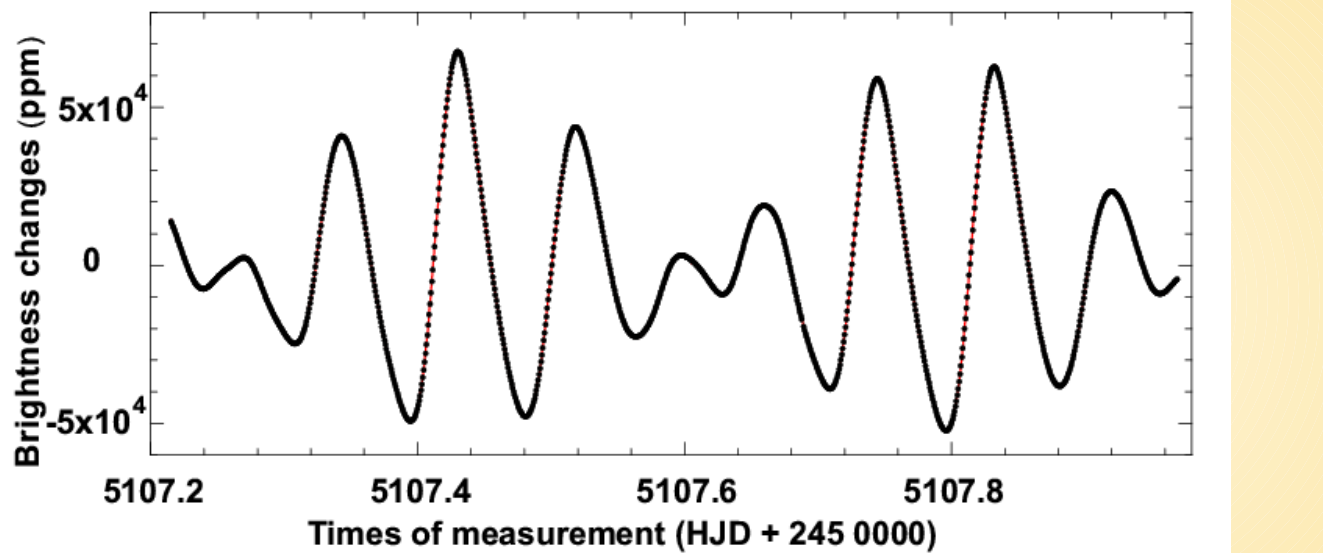
- **Fotometrie** – změna jasnosti v čase – světelná křivka
- **Spektroskopie** – změny tvaru a velikosti spektrálních čar



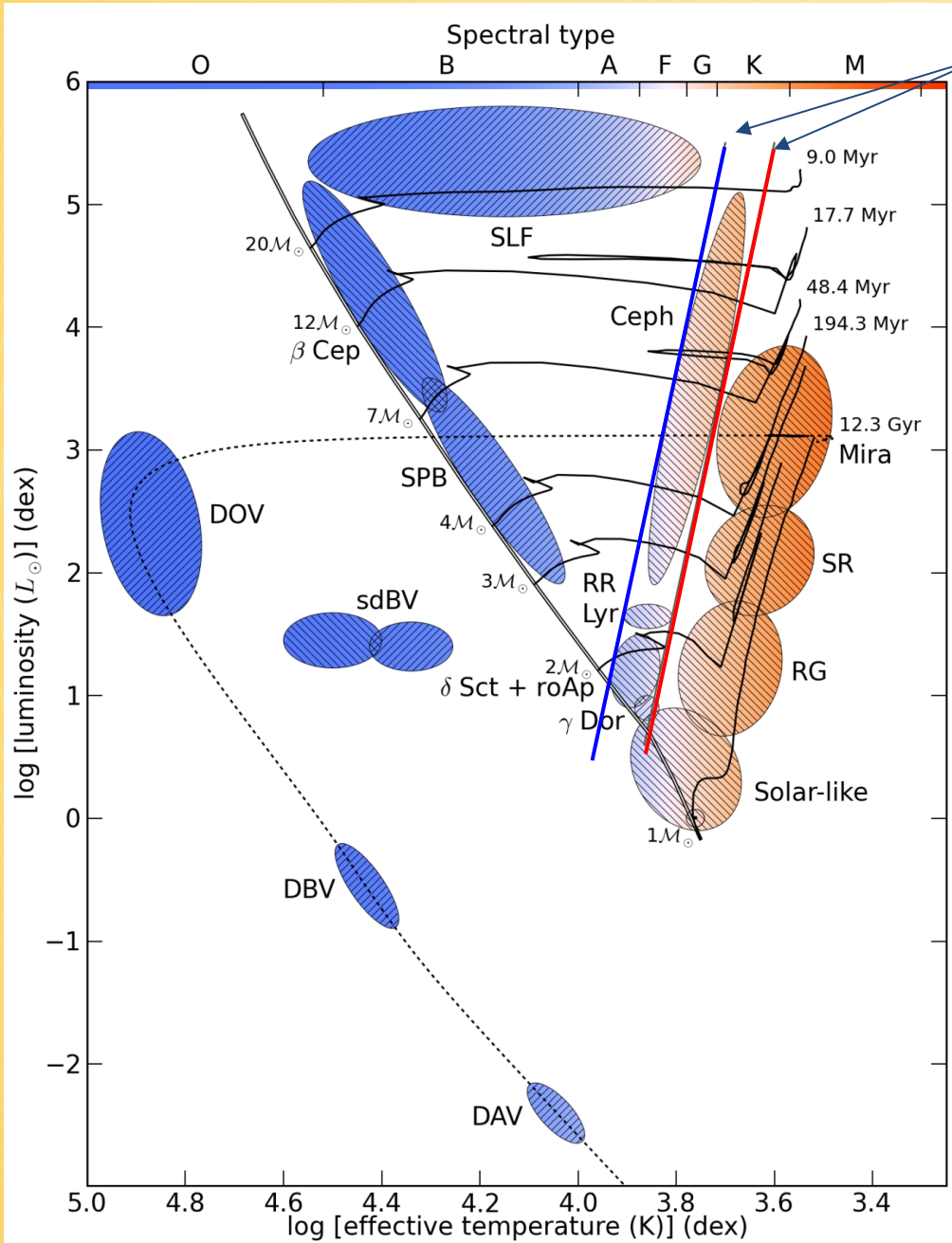


# Jak pulzující hvězdy zkoumáme

- **Fotometrie** – změna jasnosti v čase – světelná křivka
- **Spektroskopie** – změny tvaru a velikosti spektrálních čar
- **Fourierovská analýza** – popis časově závislé proměnné pomocí goniometrických funkcí



# Typy pulzujících hvězd



## 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 a má malou výchylku

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.

# Typy pulzujících hvězd

<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>	3 to 10 min	< 8 ppm
		<i>p</i>	few hrs to few days	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> )	< 0.1 mag
			few days( <i>g</i> )	< 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>	1 to 8 h	< 5 mmag
		<i>p</i>	1 to 8 h	< 5 mmag
		<i>g</i>	8 h to 5 d	< 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	F	$\sim$ 0.5 d	< 1.5 mag
	RRc	FO	$\sim$ 0.3 d	< 0.5 mag
	RRd	F+FO	0.3 to 0.5 d	< 0.2 mag
Type II Cepheid	W Vir	F	0.8 to 35 d	< 1 mag
	BL Her	F	1 to 8d	< 1 mag
RV Tauri	RVa,RVb	F?	30 to 150 d	< 3 mag
Type I Cepheid	Classical Cepheids	F	1 to 135 d	< 2 mag
	s-Cepheid	FO	< 20d	< 0.1 mag
Mira	SRa, SRb	$l = 0$	> 80 d	< 8 mag
	SRc	$l = 0$	> 80d	< 1 mag
	SRd	$l = 0$	< 80d	< 1 mag

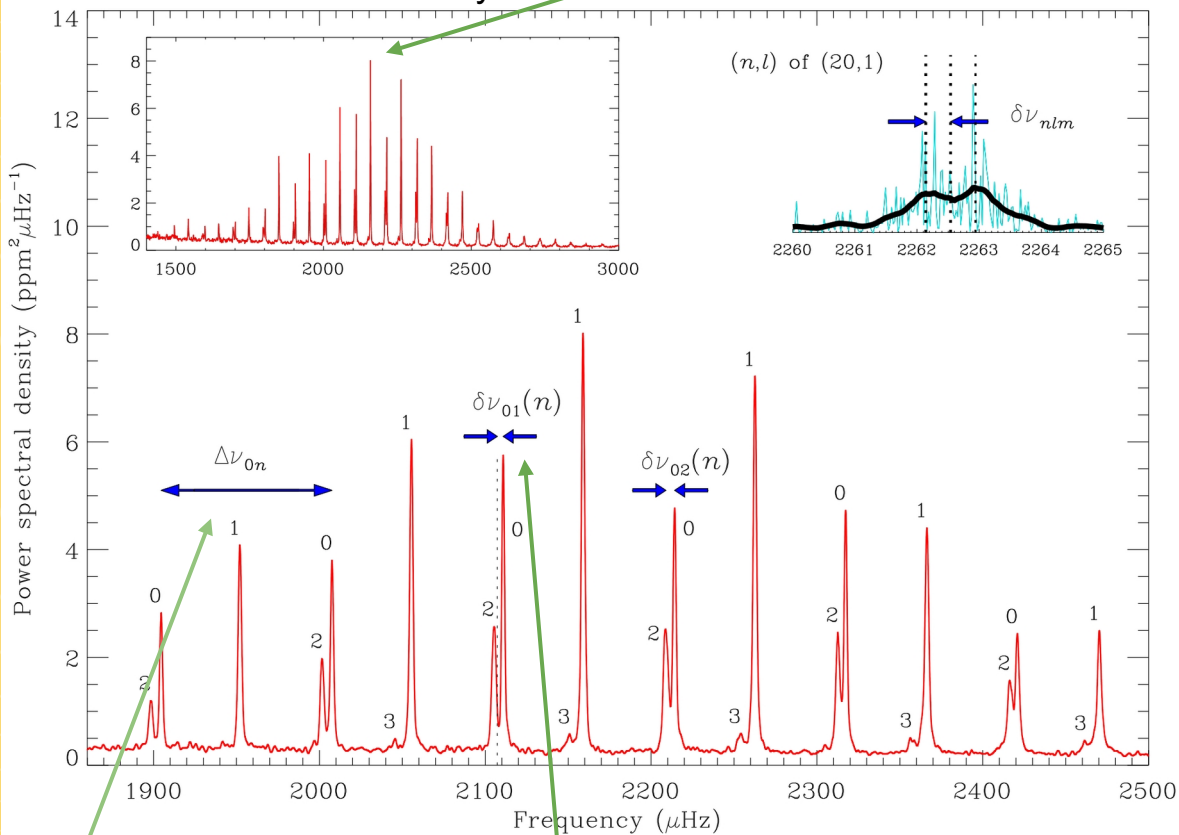
Joshi&Joshi 2015,  
ApA, 36, 33

# Pulzátory na hlavní posloupnosti

● Hvězdy hlavní posloupnosti - sluneční oscilace (p-módy)

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

citlivé na gravitační zrychlení

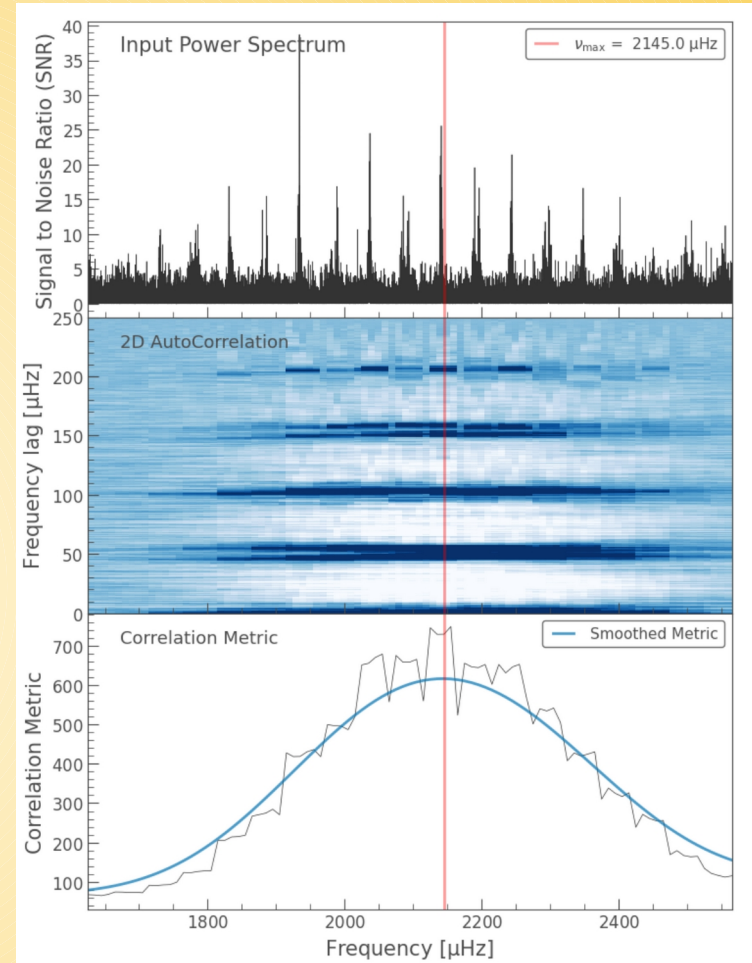


citlivé na poloměr

citlivé na rotaci vnitřních částí

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

Možnost zjistit velikost, hmotnost a věk hvězdy!!!



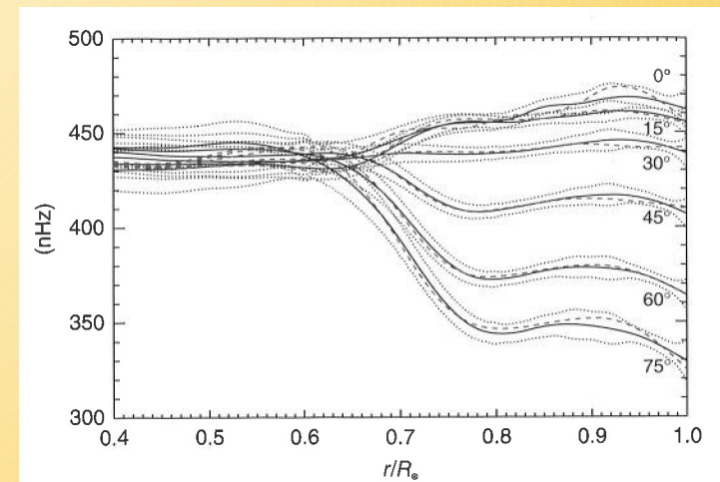
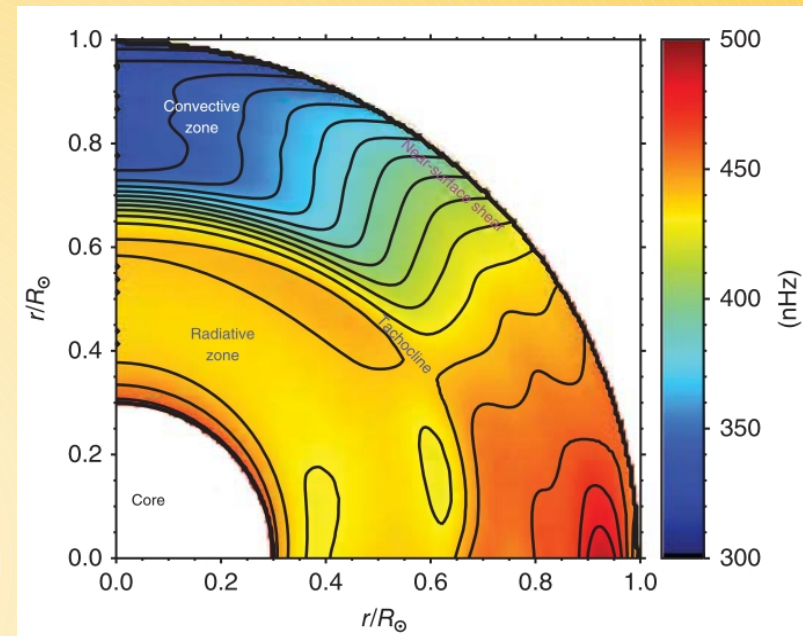
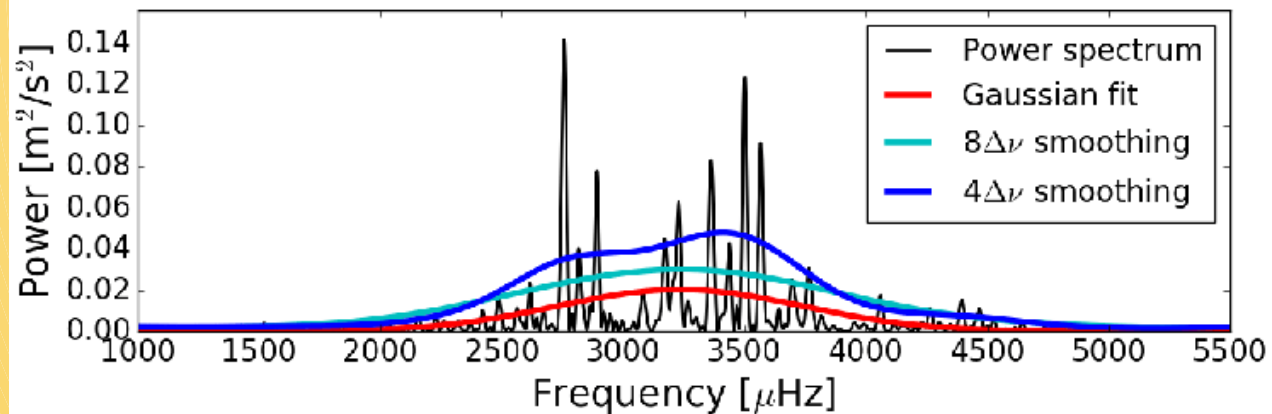
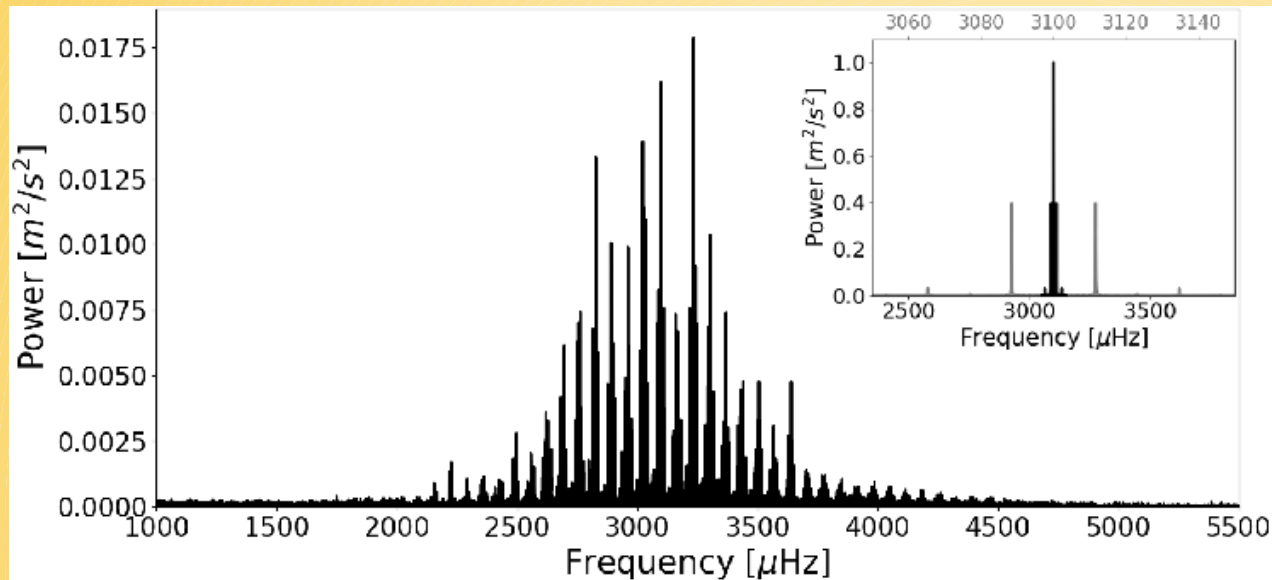
$$\left(\frac{R}{R_{\odot}}\right) \simeq \left(\frac{\nu_{\max}}{\nu_{\max,\odot}}\right) \left(\frac{\langle\Delta\nu_{nl}\rangle}{\langle\Delta\nu_{nl}\rangle_{\odot}}\right)^{-2} \left(\frac{T_{\text{eff}}}{T_{\text{eff},\odot}}\right)^{0.5},$$

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

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

# Sluneční oscilace

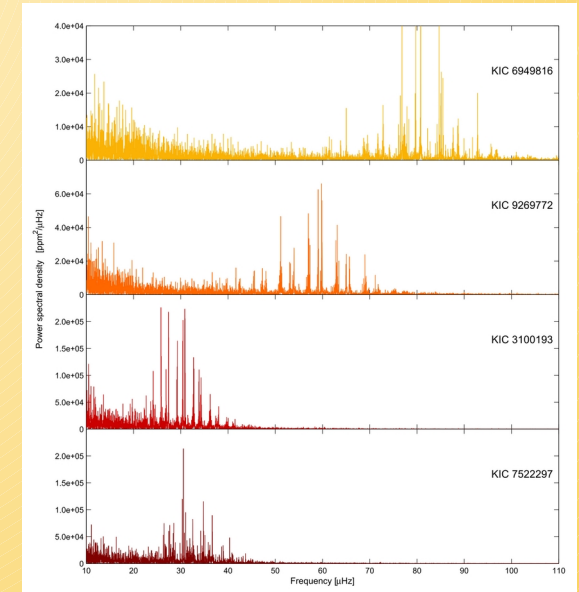
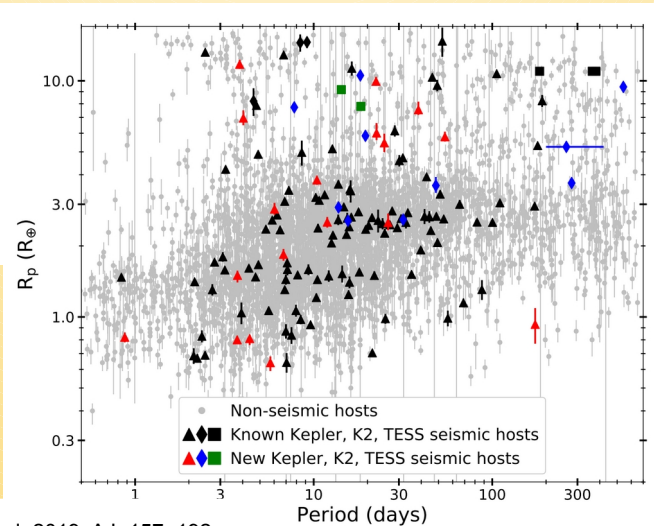
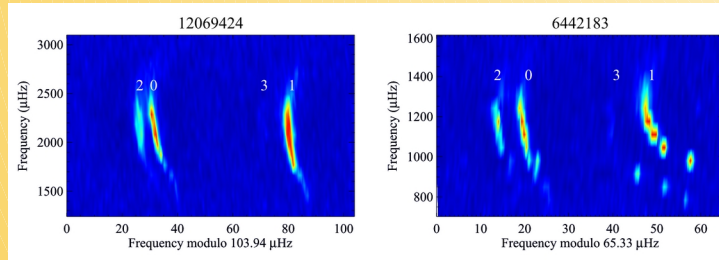
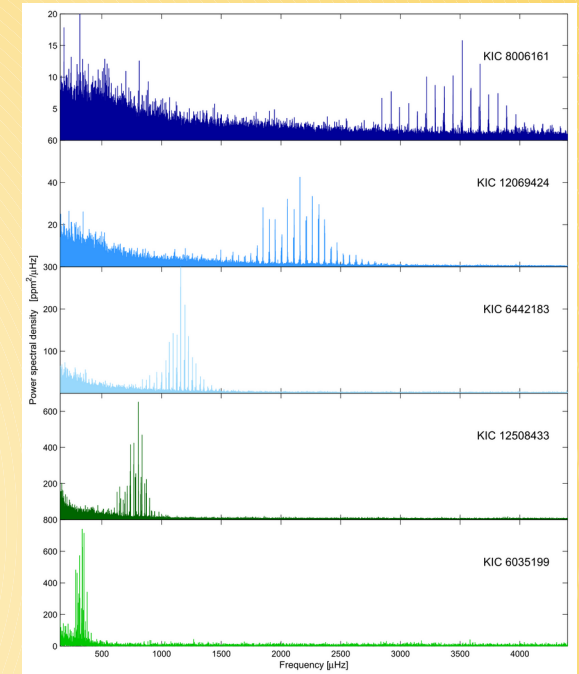
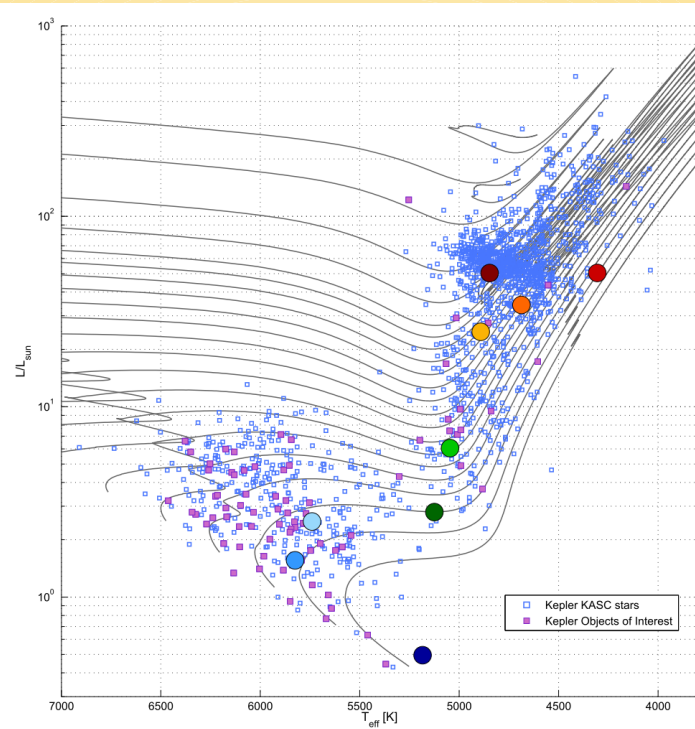
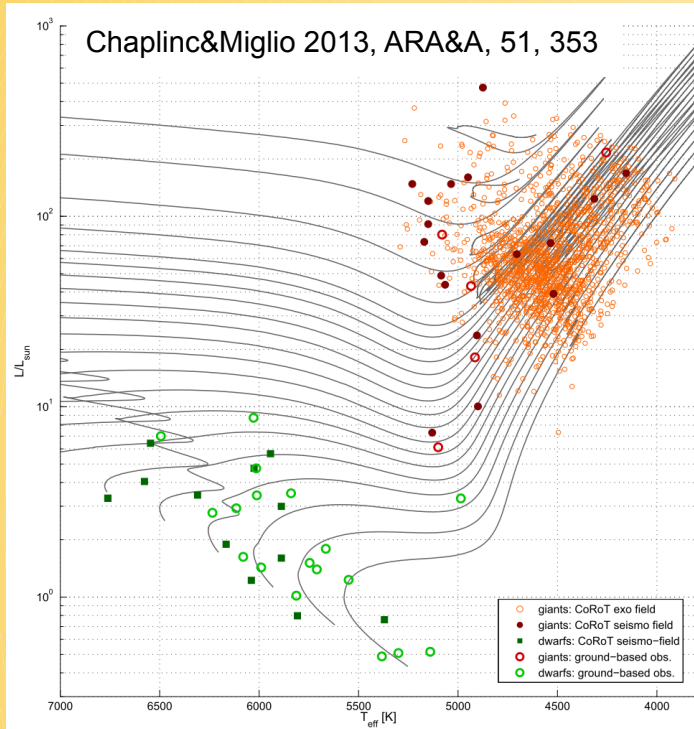
- 5-min oscilace, >10 miliónů módů



Andersen et al. 2019, A&A, 623, L9  
Power spektrum radiálních rychlostí  
(57 dní vs 1 den dole)

# Pulzátory na hlavní posloupnosti

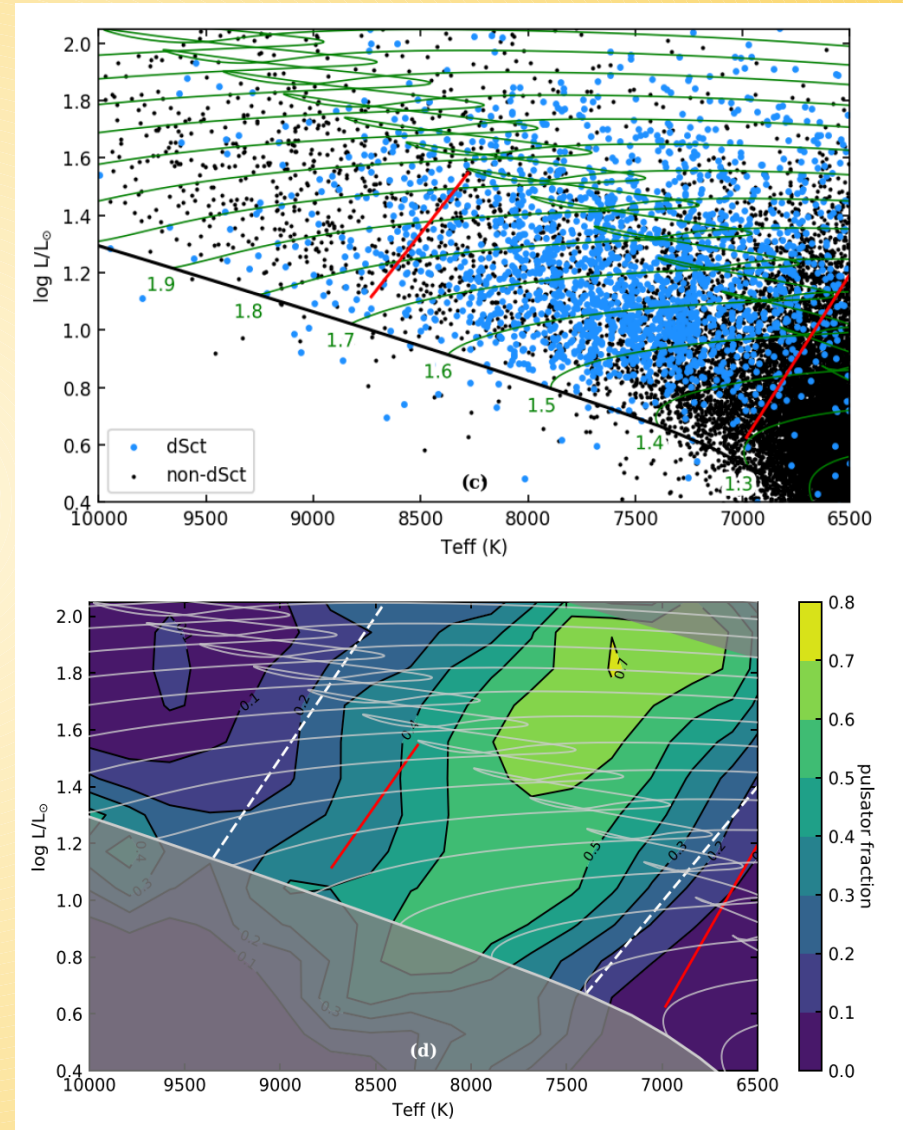
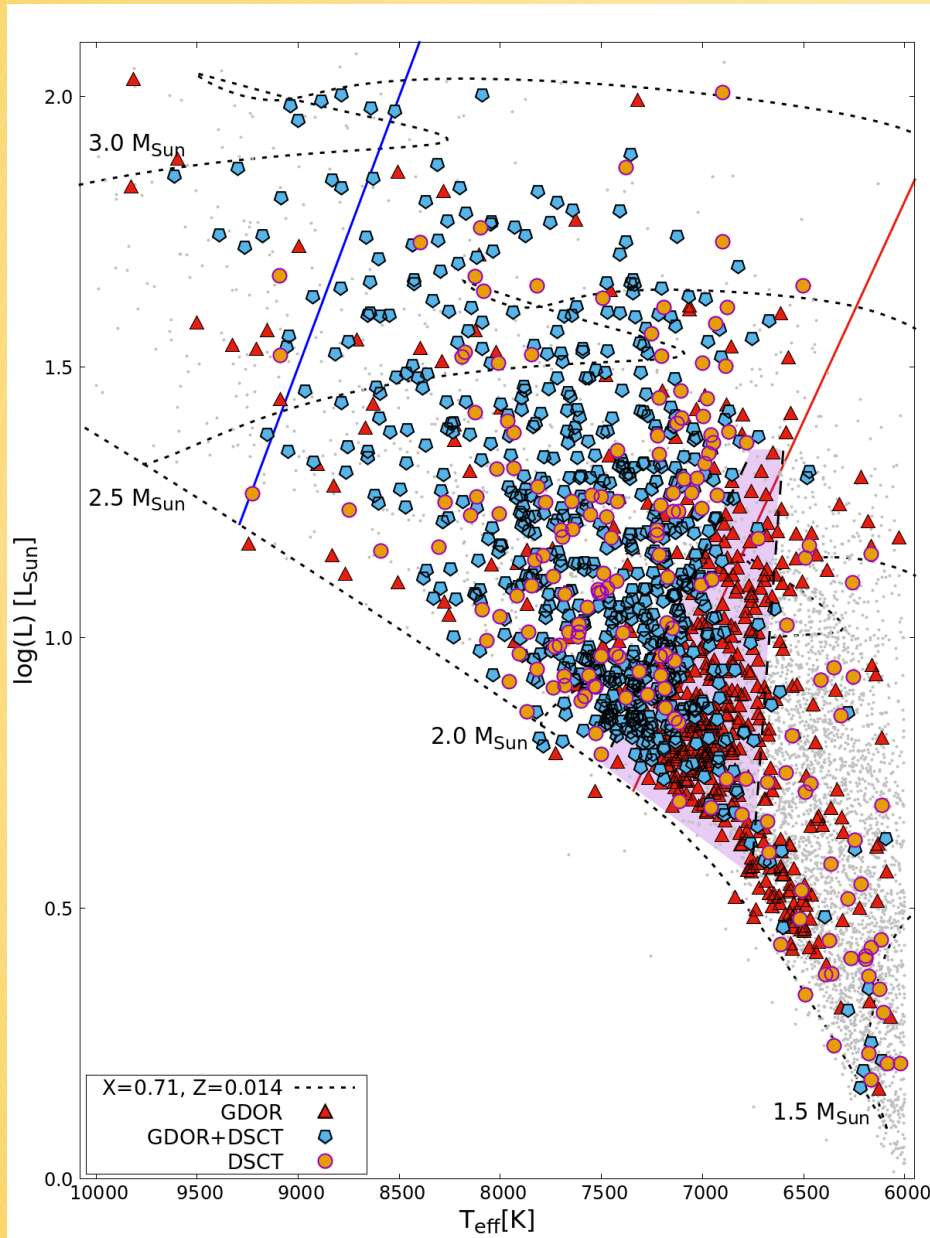
● Hvězdy hlavní posloupnosti - sluneční oscilace (p-módy) - aplikace i na obry



Asteroseismologie je extrémně důležitá při určování vlastností mateřských hvězd exoplanet

# Pulzátory na hlavní posloupnosti

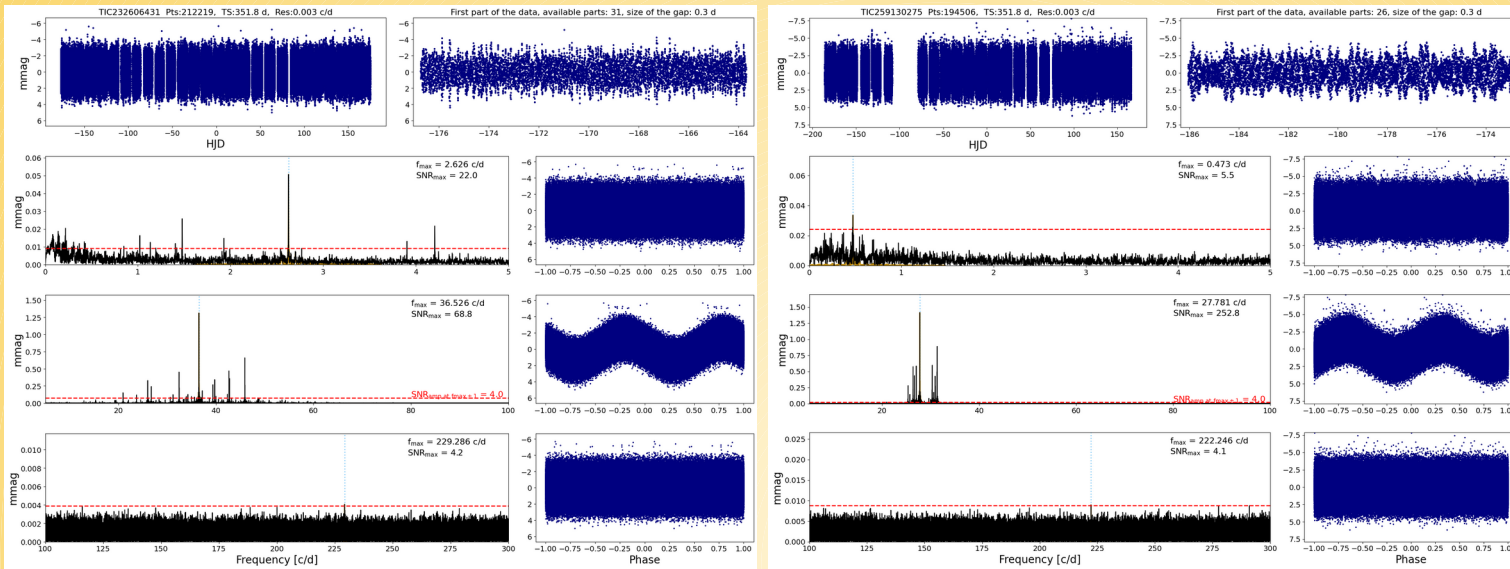
Hvězdy typu Delta Sct a gamma Dor ( $1.3-2.5 M_{\text{Sun}}$ )



Murphy et al. (2019), MNRAS, 485, 2380

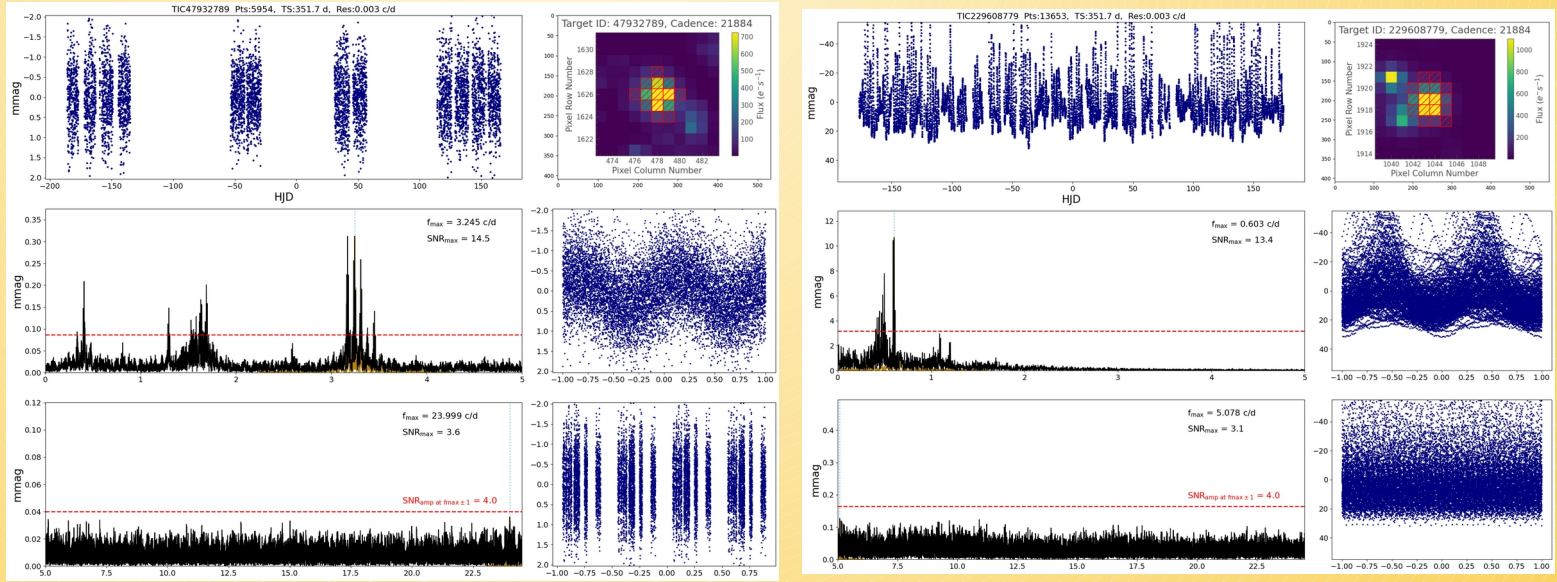
# Pulzátory na hlavní posloupnosti

Hvězdy typu Delta Sct a gamma Dor (1.3-2.5  $M_{\text{Slunce}}$ )



DSCT  
- frekvence nad 5 d/c

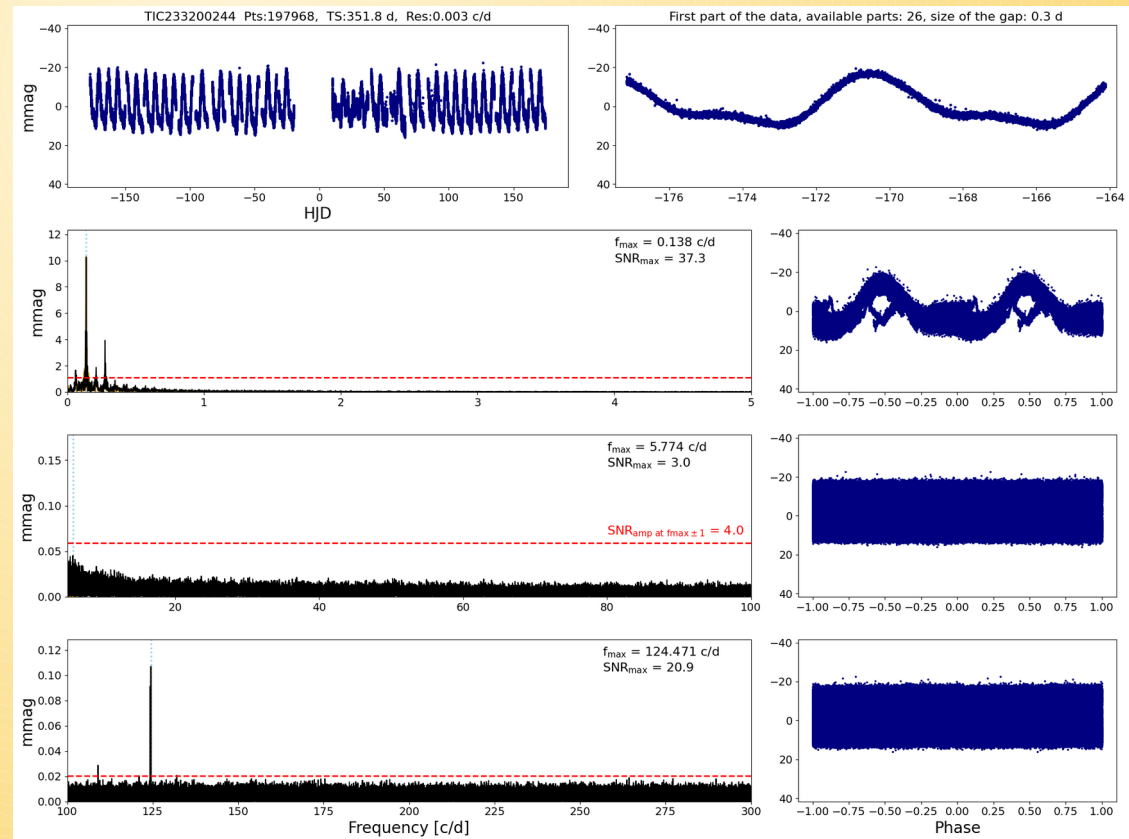
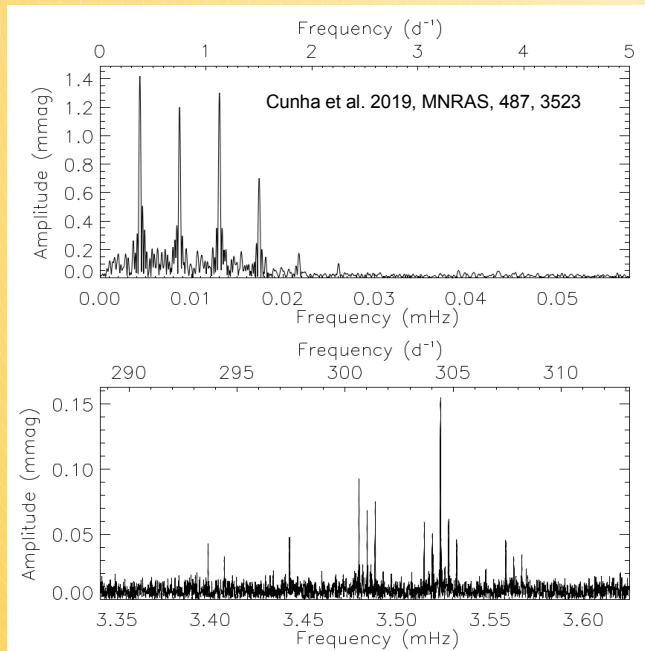
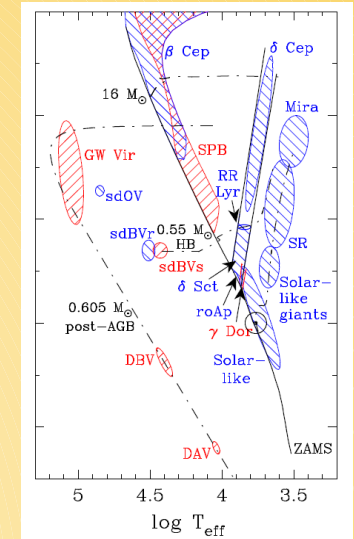
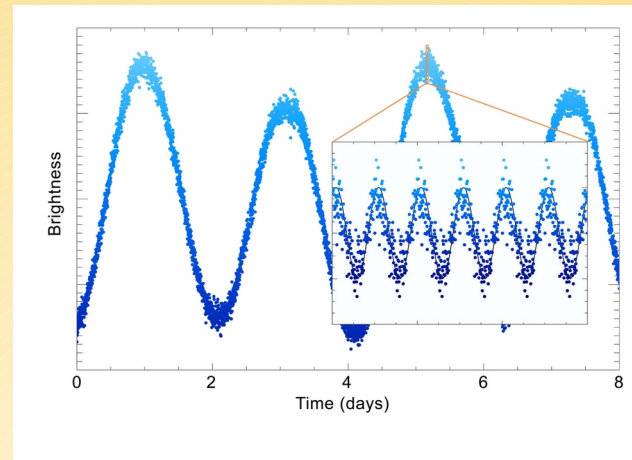
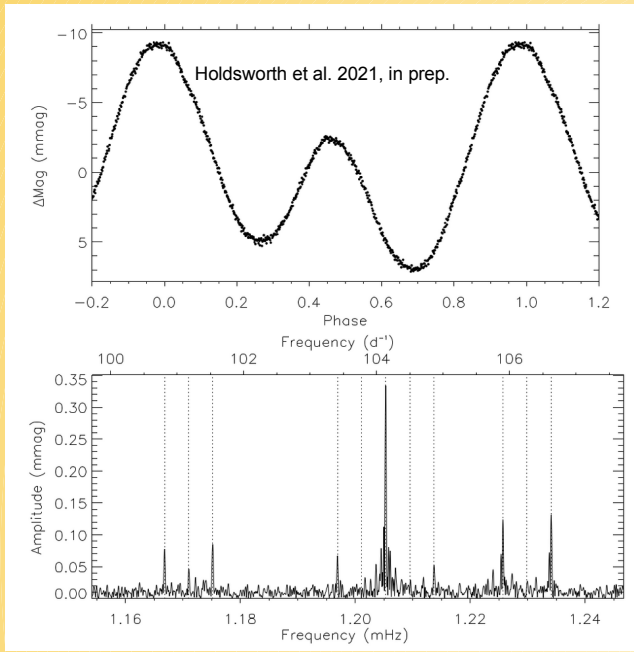
GDOR  
- typické "lesy" píků  
frekvencemi <5 c/d





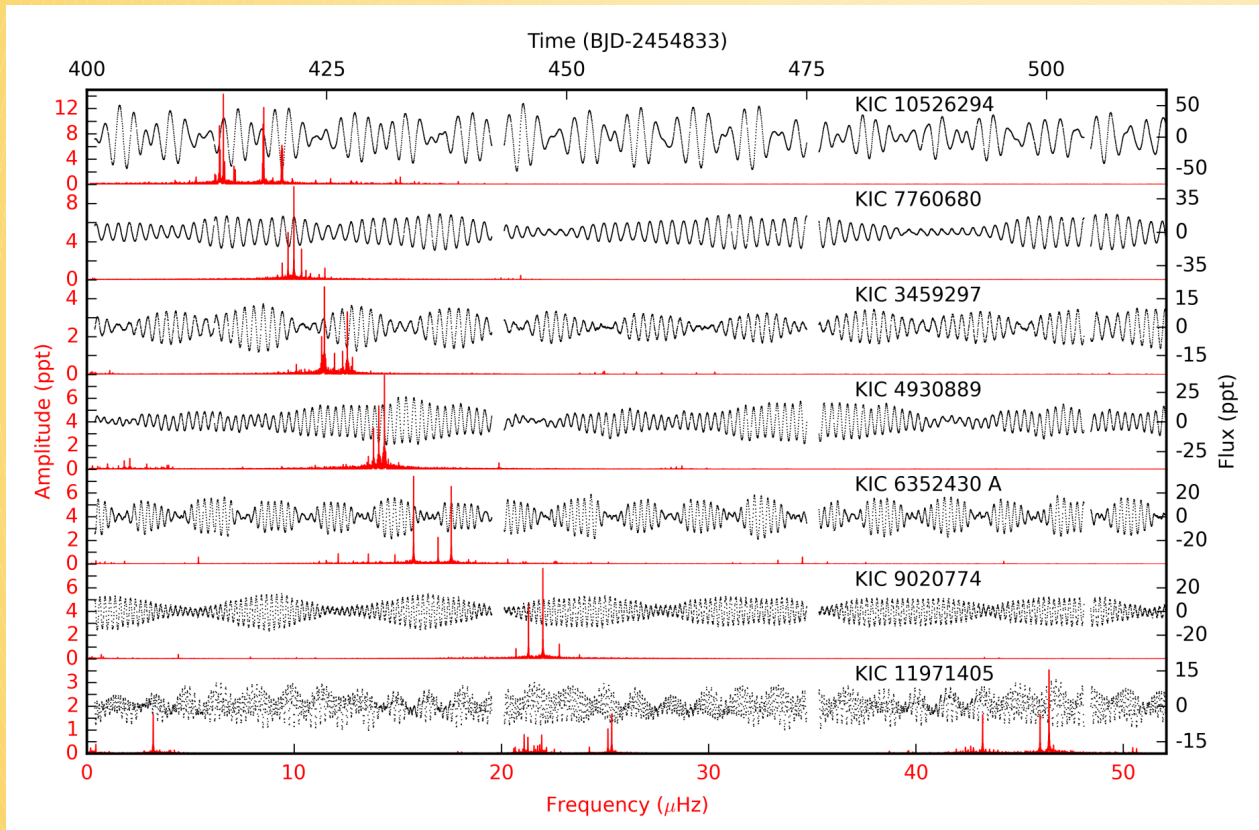
# Pulzátory na hlavní posloupnosti

Rychle oscilující chemicky pekulární hvězdy (roAp) - velmi často i rotační proměnnost

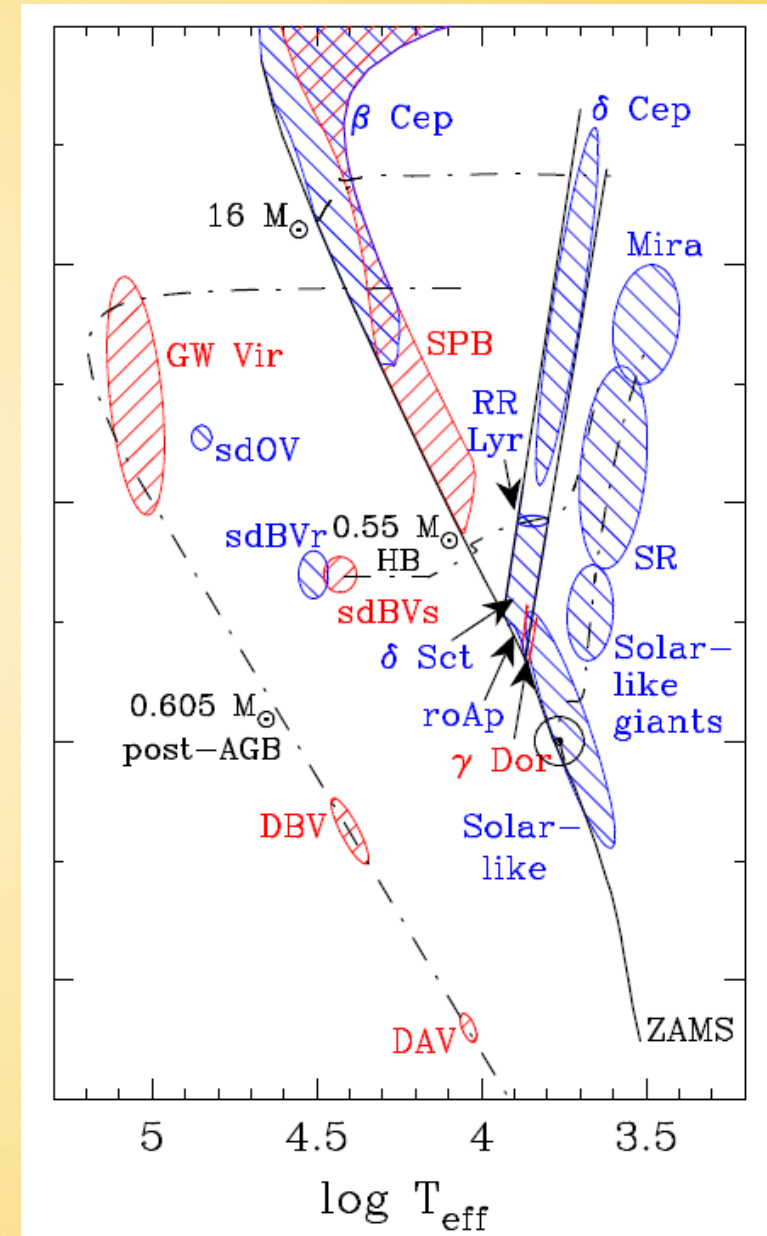


# Pulzátory na hlavní posloupnosti

Pomalou pulzující B hvězdy (SPB, 5-20  $M_{\text{Slunce}}$ )

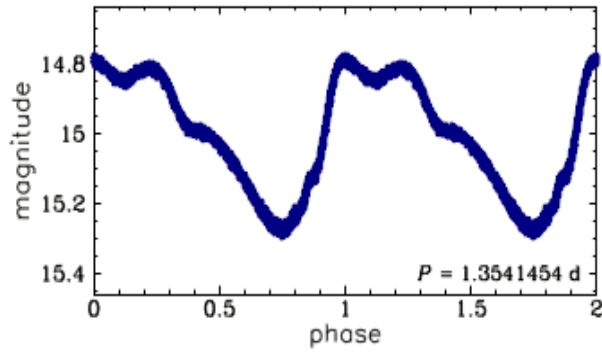


Aerts 2019, RvMP, 93, 5001

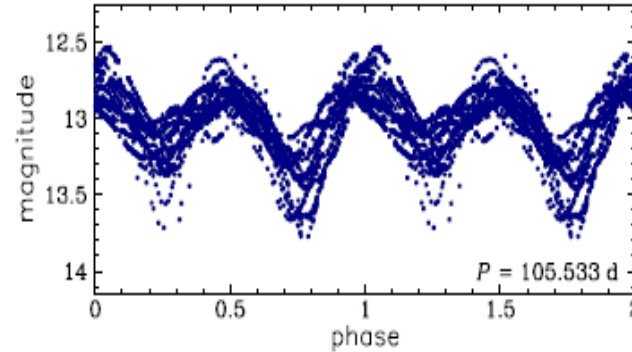


# Vyvinuté hvězdy

## BL Her

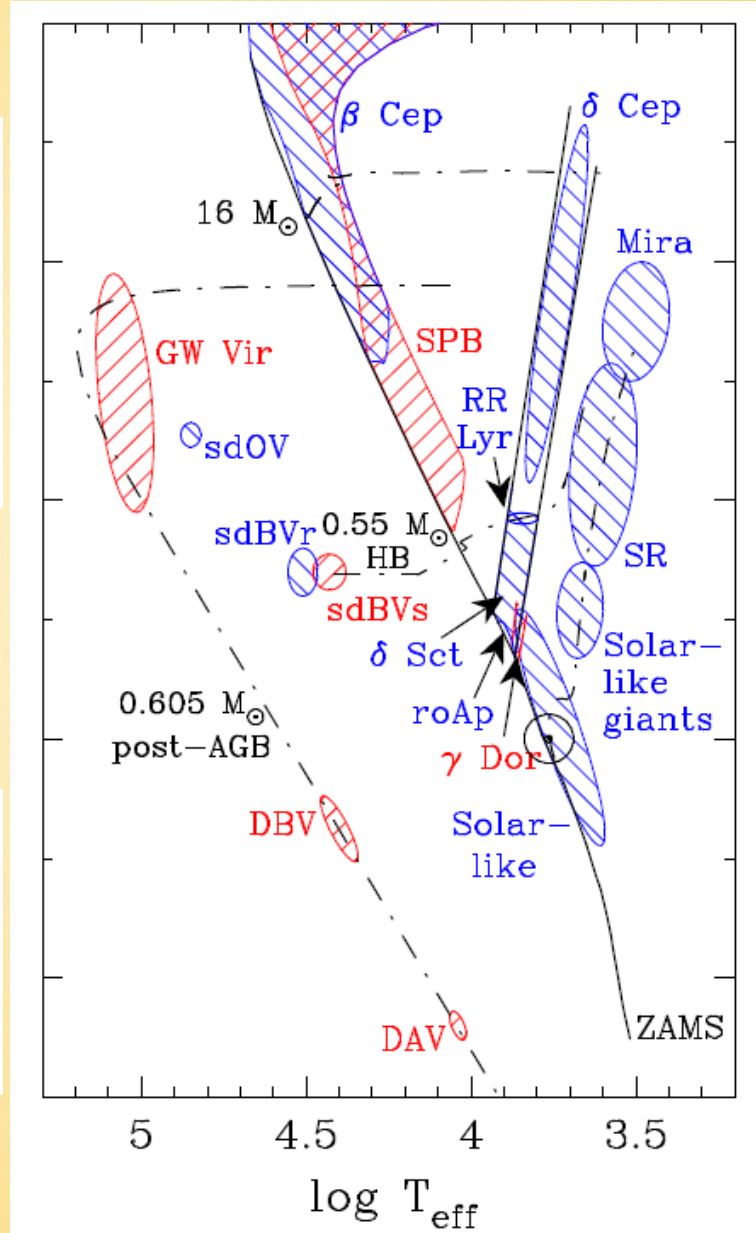
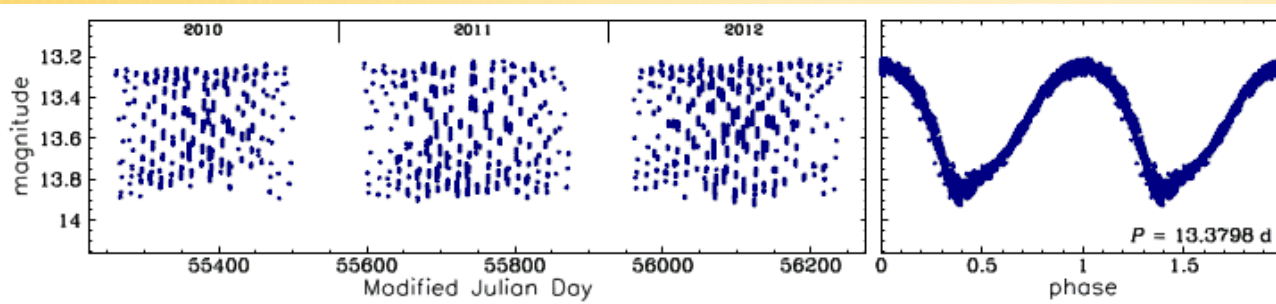


## RV Tau

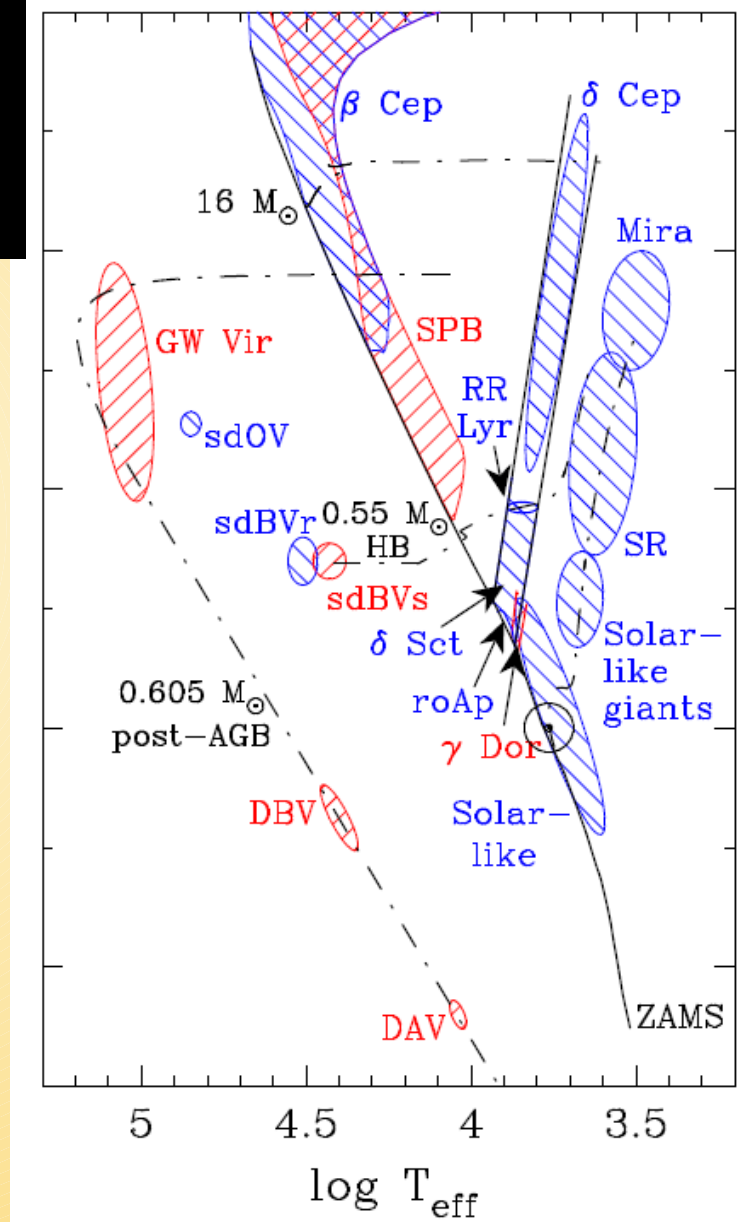
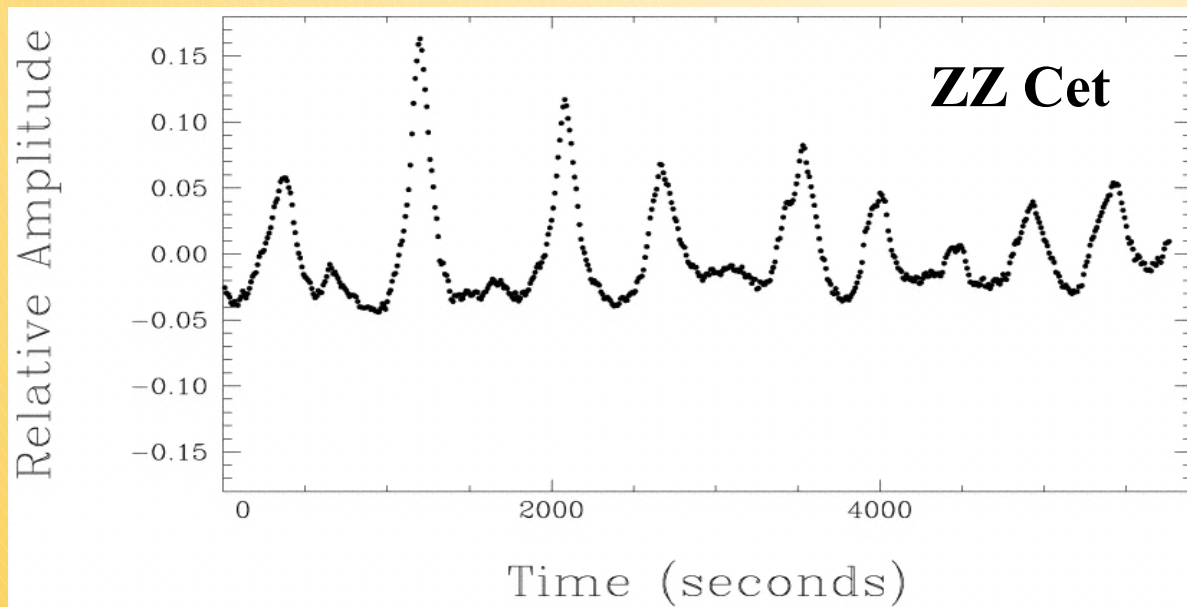
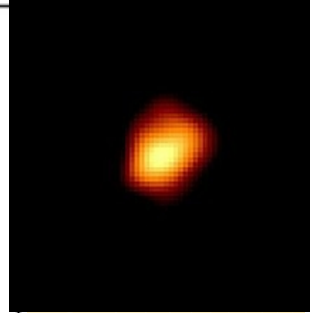
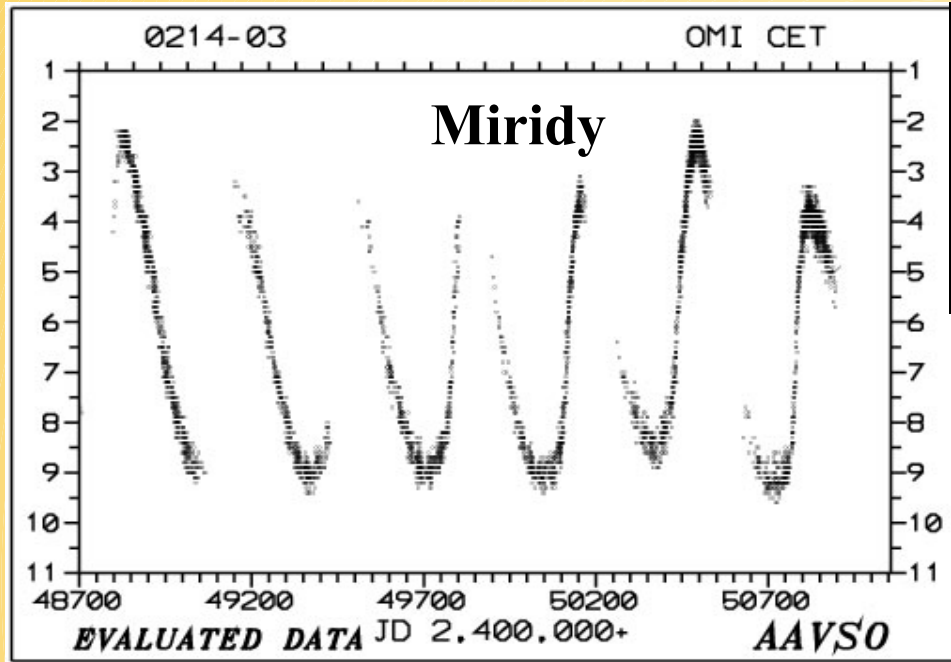


[http://ogle.astrouw.edu.pl/atlas/RR\\_Lyr.html](http://ogle.astrouw.edu.pl/atlas/RR_Lyr.html)

## W Vir

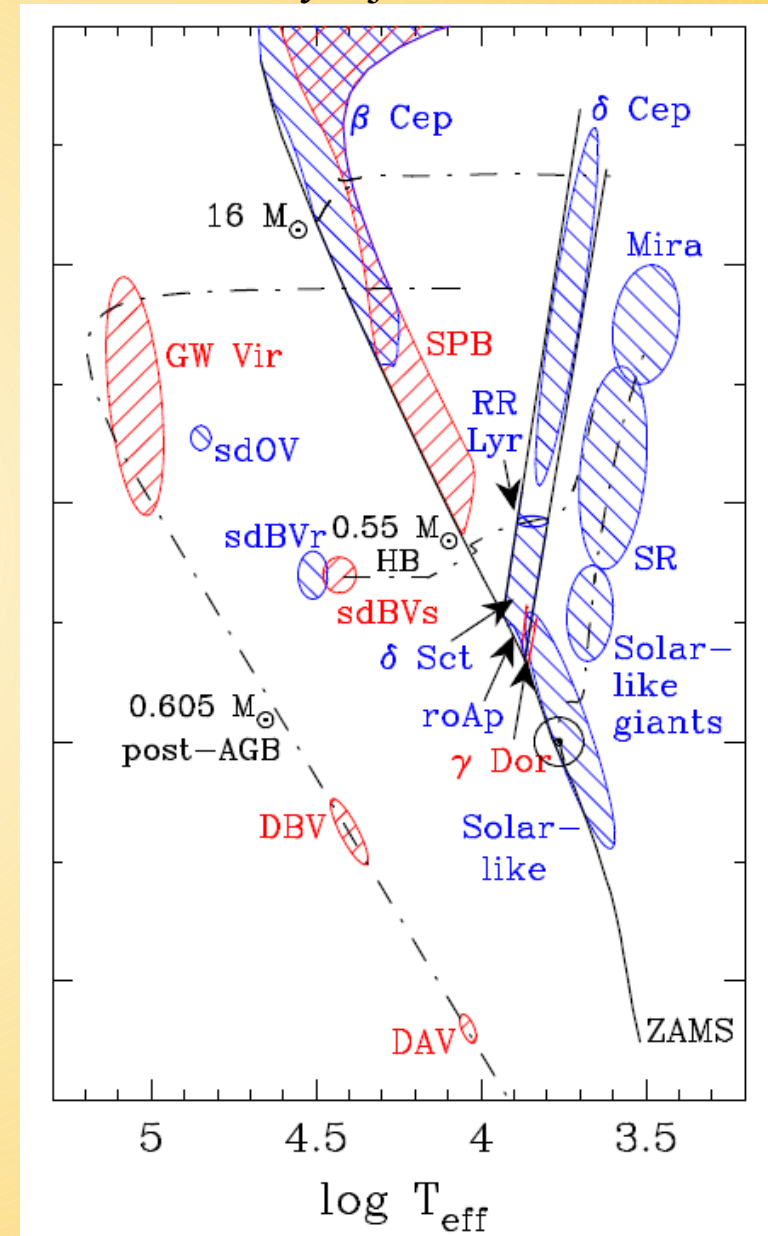
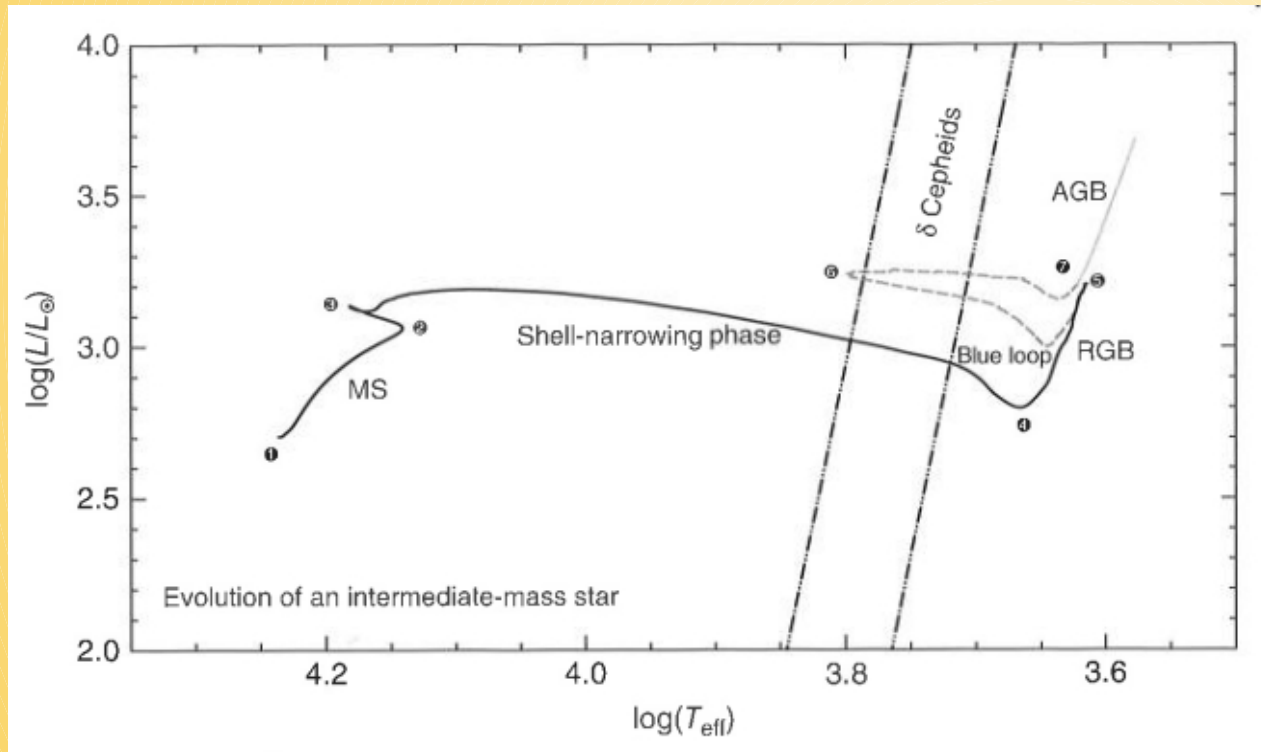


# Vyvinuté hvězdy



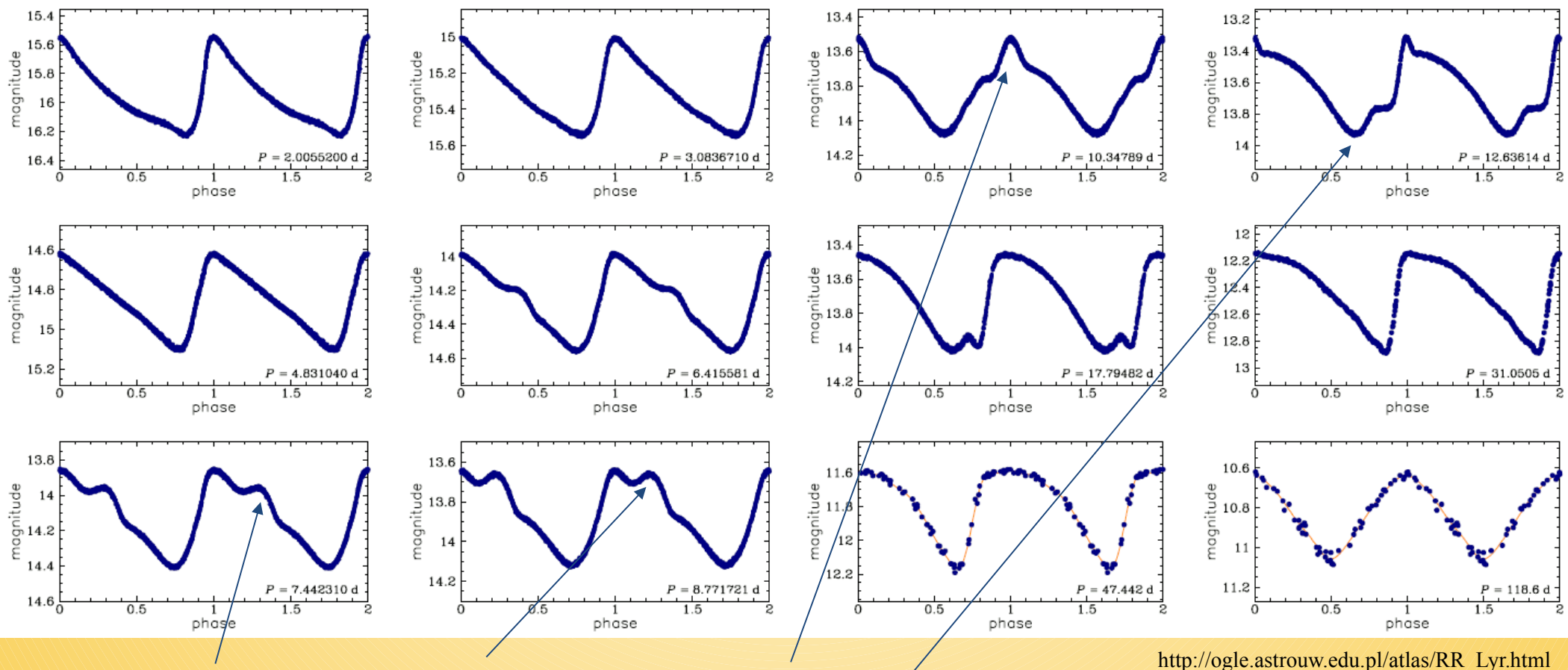
# Cefeidy

- Radiálně pulzující mladé hvězdy (do 0.1 mld let) v pokročilém stadiu vývoje
- Periody 1-130 d, hmotnosti 5-20 hmotností Slunce
- Standardní svíčky
- Mohou se do pásu nestability dostat i opakovaně



# Cefeidy

- Radiálně pulzující mladé hvězdy (do 0.1 mld let) v pokročilém stadiu vývoje
- Periody 1-130 d, hmotnosti 5-20 hmotností Slunce
- Standardní svíčky
- Mohou se do pásu nestability dostat i opakovaně

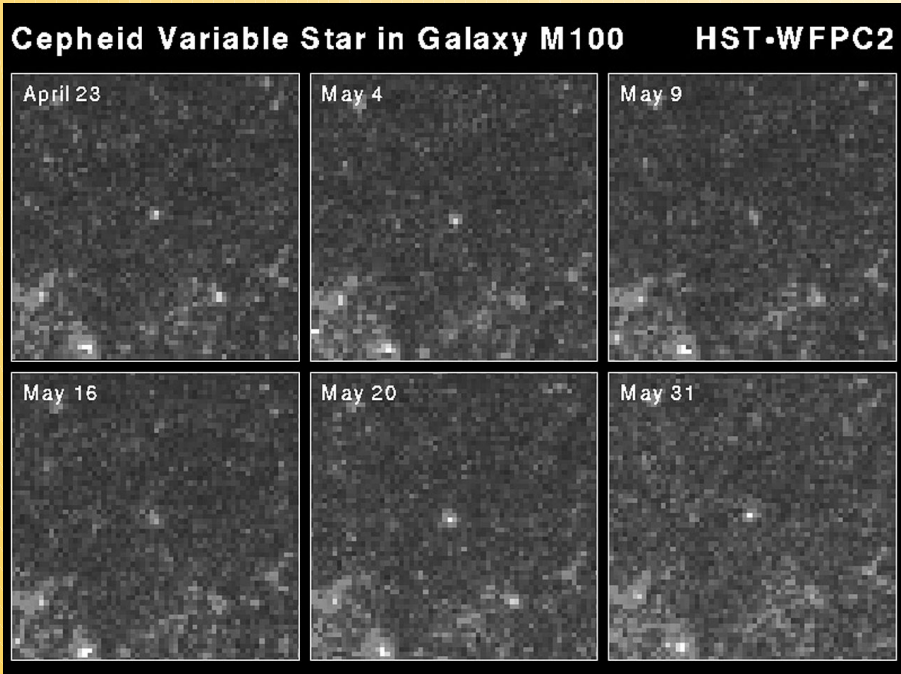
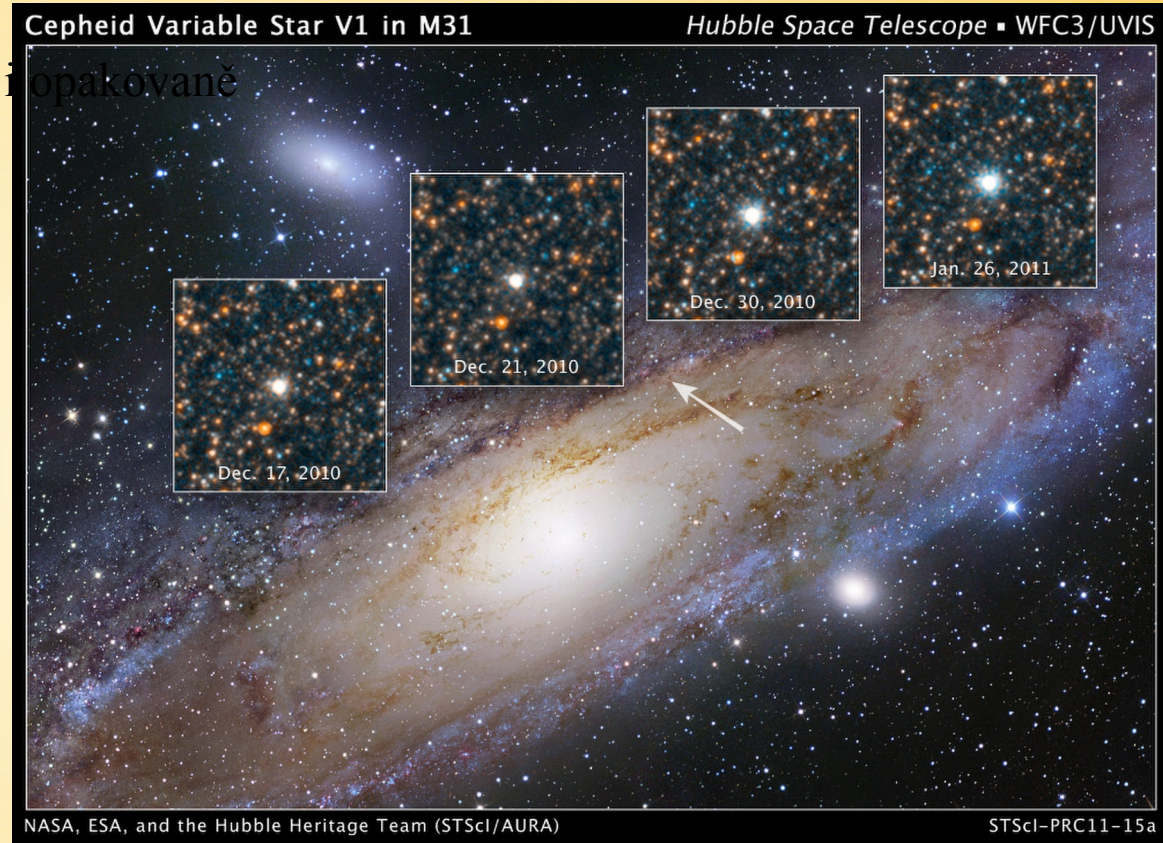


[http://ogle.astrouw.edu.pl/atlas/RR\\_Lyr.html](http://ogle.astrouw.edu.pl/atlas/RR_Lyr.html)

Hertzsprungova progresa - poloha hrbolu se mění spolu s periodou

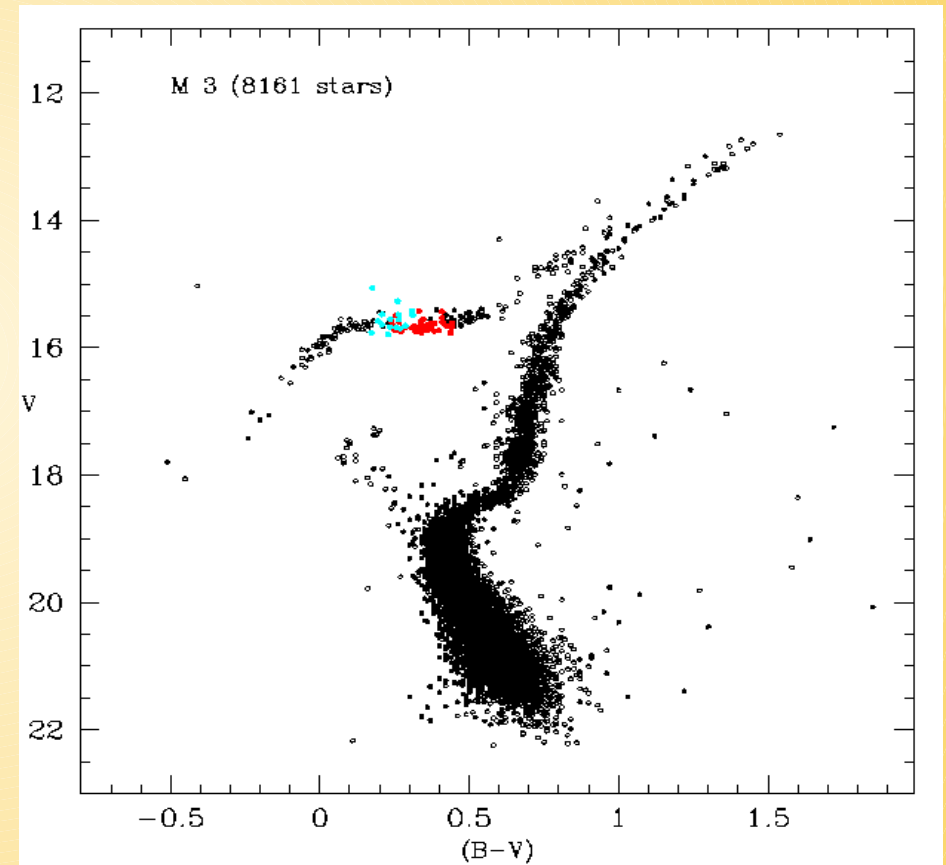
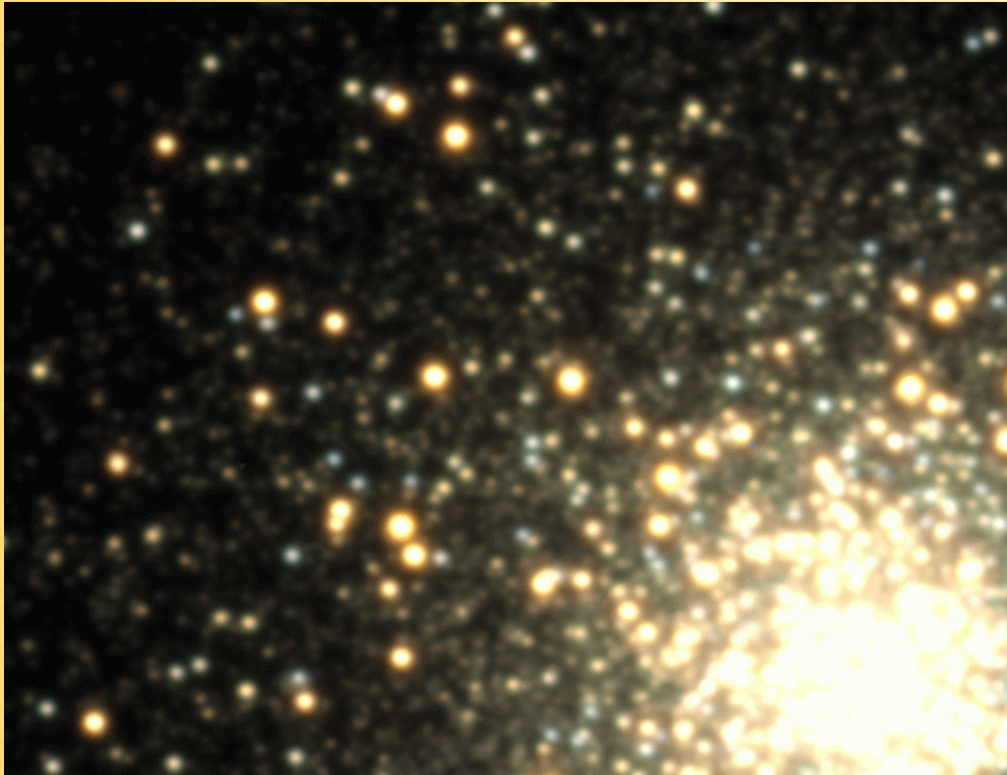
# Cefeidy

- Radiálně pulzující mladé hvězdy (do 0.1 mld let) v pokročilém stadiu vývoje
- Periody 1-130 d, hmotnosti 5-20 hmotností Slunce
- Standardní svíčky
- Mohou se do pásu nestability dostat i opakovaně



# RR Lyrae

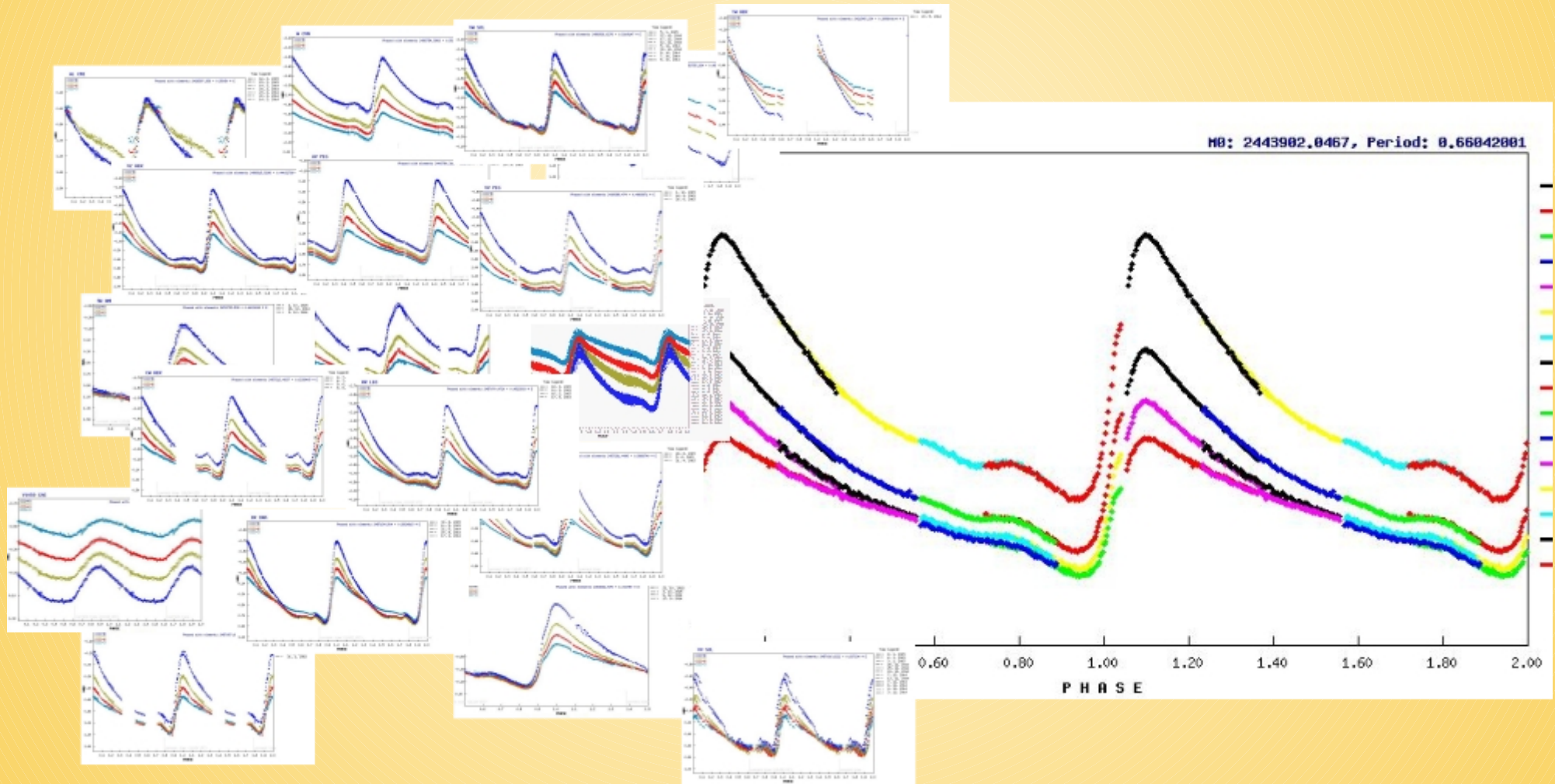
- (Ne)radiálně pulzující staré hvězdy ( $>9$  mld let) horizontální větve obrů
- Periody 0.2-1 den, hmotnosti  $<0.8 M_{\odot}$





# RR Lyrae

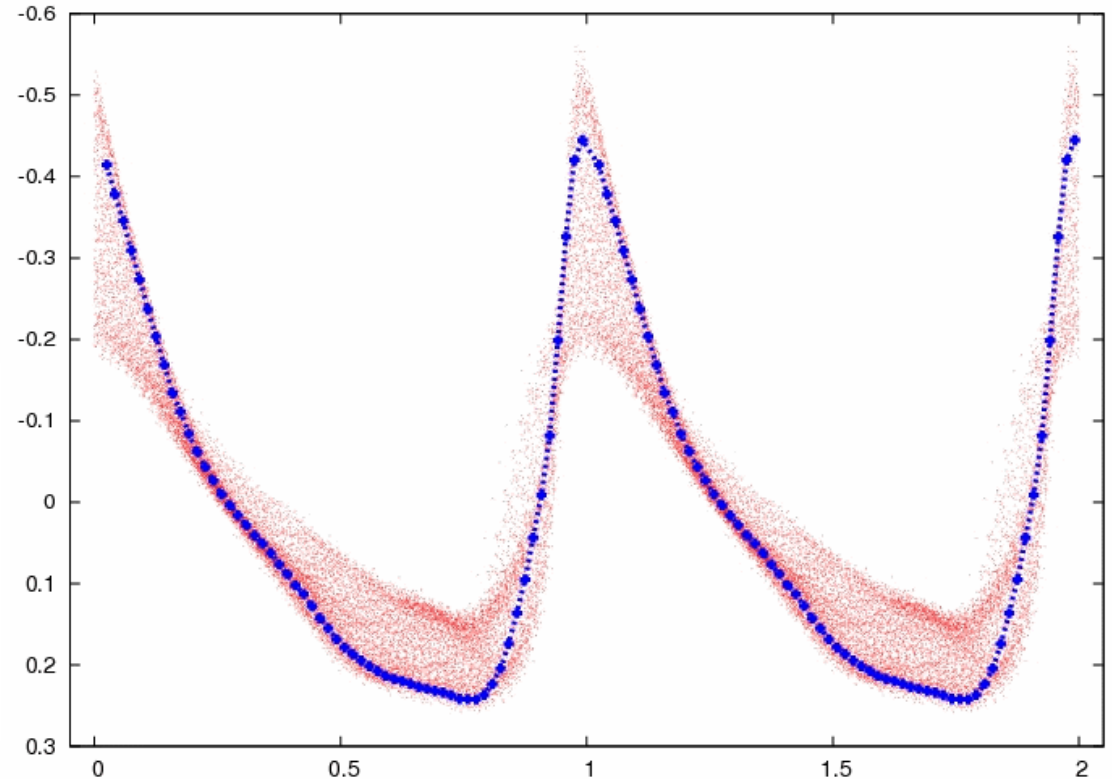
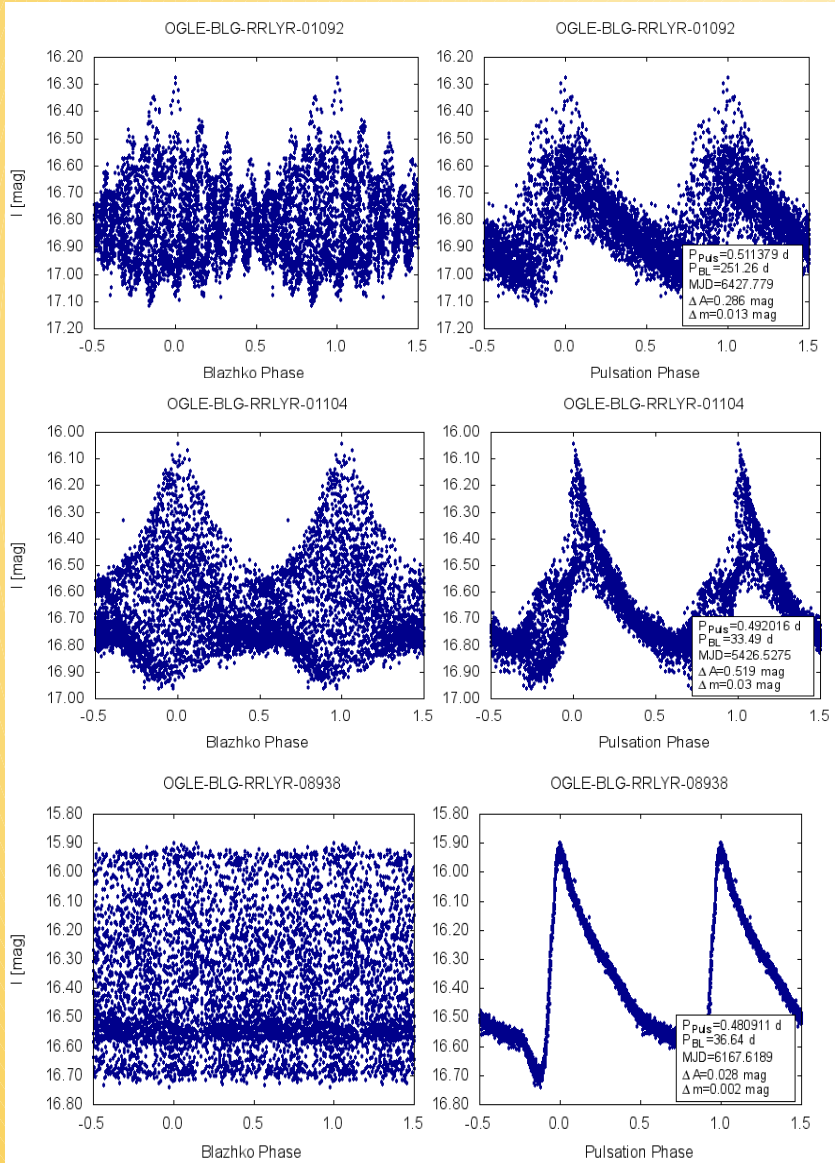
- (Ne)radiálně pulzující staré hvězdy (>9 mld let) horizontální větve obrů
- Periody 0.2-1 den, hmotnosti <0.8 Ms



# RR Lyrae

- (Ne)radiálně pulzující staré hvězdy (>9 mld let) horizontální větve obrů
- Periody 0.2-1 den, hmotnosti <0.8 Ms
- >40 % vykazuje modulaci světelné křivky (Blazhkov jev)

Chadid et al. 2010, A&A, 510, 39



## Known Blazhko stars in Galactic field

[Stars with one Blazhko period](#)

[Stars with changing Blazhko period](#)

[Stars with multiple Blazhko period](#)

[Sorted by RA](#)

[Sorted by Constellation](#)

[References to all resources](#)

[Description of the website and tables](#)

[Last modification: Jan 20, 2016](#)

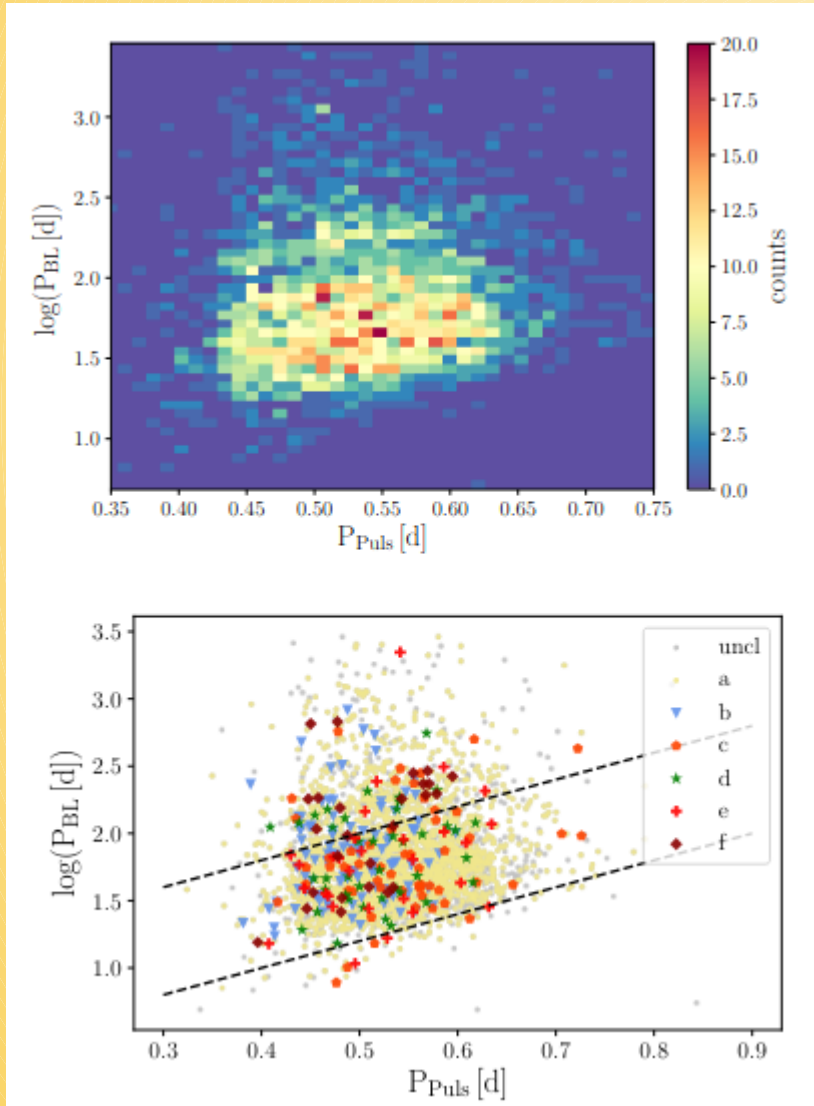
The presented list contains **407** RR Lyrae type stars exhibiting the Blazhko effect.

Acknowledging us: If you have used this database in a paper then please add this citation: [Skarka, M. 2013, A&A, 549, A101](#)



# RR Lyrae

- (Ne)radiálně pulzující staré hvězdy (>9 mld let) horizontální větve obrů
- Periody 0.2-1 den, hmotnosti <0.8 Ms
- >40 % vykazuje modulaci světelné křivky (Blažkův jev)



Skarka et al. 2021, ASPC, 529, 139

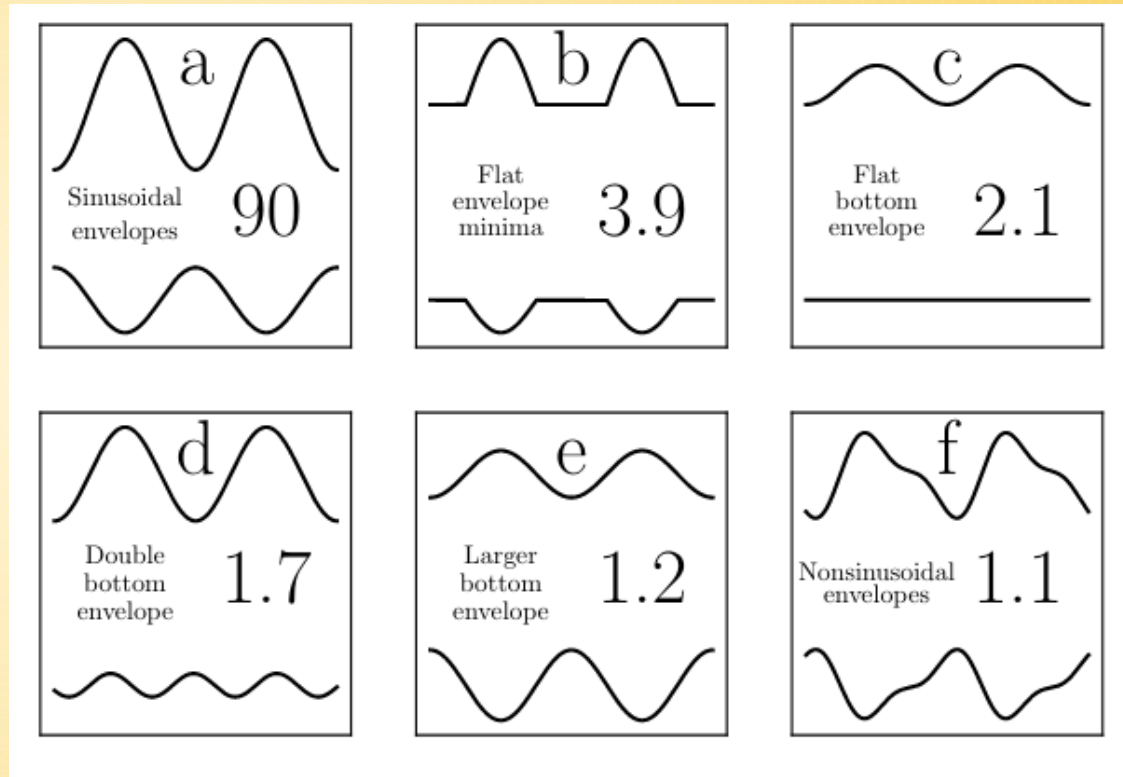


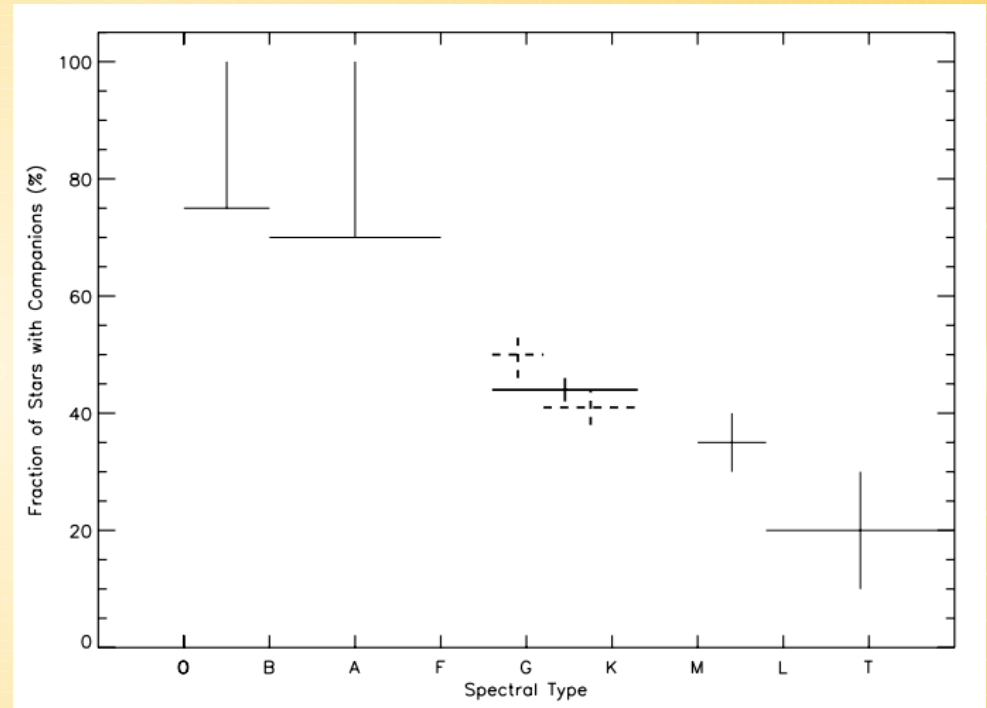
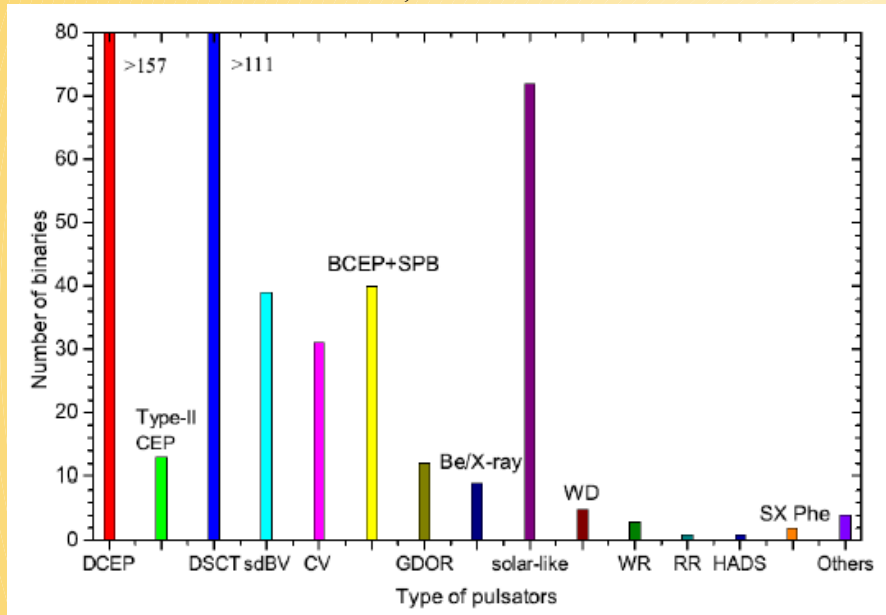
Figure 1. The schematic cartoons of the basic morphological types of the modulation envelopes. The most distinct features are described. The numbers show the incidence rate in per cent.

# RR Lyrae

- (Ne)radiálně pulzující staré hvězdy (>9 mld let) horizontální větve obrů
- Periody 0.2-1 den, hmotnosti <0.8 Ms
- >40 % vykazuje modulaci světelné křivky (Blažkův jev)
- Nejsou známy dvojhvězdy

Raghavan et al. 2010, ApJSS, 190, 1

Zhou 2014, arXiv:1002.2729v5



**Hmotnosti, poloměry a svítivosti známe  
pouze nepřímou!!!**

# RR Lyrae

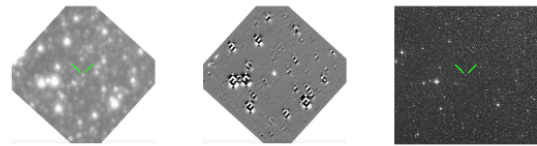
## A comprehensive look at RR Lyrae stars through high-precision photometry and astrometry

László Molnár (Konkoly Observatory, CSFK, Budapest), Attila Bódi, András Pál, Anupam Bhardwaj, Franz-Josef Hamsch, József Benkő, Aliz Derekas, M. Ebadi, Meridith Joyce, Amir Hasanzadeh, Katrien Kolenberg, Michael Lund, James Nemec, Henryka Netzel, Chow-Choong Ngeow, Joshua Pepper, Emese Plachy, Zdenek Prudil, Robert Siverd, Marek Skarka, Radoslaw Smolec, Ádám Sódor, Salma Sylla, Pál Szabó, Róbert Szabó, Hans Kjeldsen, Jorgen Christensen-Dalsgaard, and George R. Ricker

(from the TESS RR Lyrae first light paper, currently under review)

### TESS differential photometry - works everywhere

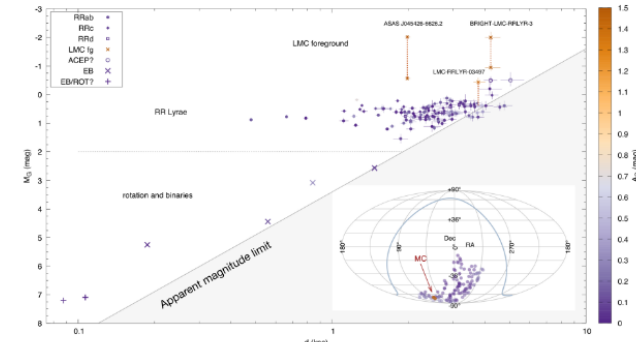
We used the *fish* code to process targets from S1-S2 FFIs. We selected 126 stars, and used aperture photometry on differential images. Reference brightnesses came from Gaia RP magnitudes. This worked well even for dense stellar fields.



A heavily blended target in front of the LMC. Raw and differential TESS images, and the same field in DSS.

### TESS + Gaia data = accurate classification

We combined light curve shape information from TESS with distances and extinction-corrected absolute magnitudes from Gaia EDR3. This made it possible to keep RR Lyrae stars with unusual light curve shapes while removing rotational variables and binaries with light curves very similar to pulsating stars.

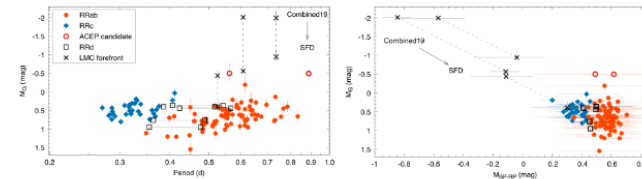


Distances vs. absolute magnitudes. **RR Lyrae stars cluster around  $M_G = 0-1$  mag, while fainter MS stars can be filtered out.** A few stars appear to be excessively bright; these are in front of the Magellanic Clouds (see insert), and are overcorrected for interstellar absorption by the available 3D dust maps in the *medust* code.

**References:** *fish*: Pál, A., 2012, MNRAS, 421, 1825; *Gaia EDR3*: Gaia Collab, 2021, A&A, 649, 1; *Extra modes*: Molnár et al., 2017, EpJ WoC, 160, 04008; *M3*: Jurcsik et al., 2015, ApJS, 219, 25; *OGLE*: Netzel et al., 2019, MNRAS, 487, 5584; *NGC 6362*: Smolec et al., 2017, MNRAS, 467, 2349; *medust*: Bovy et al., 2016, ApJ, 818, 130

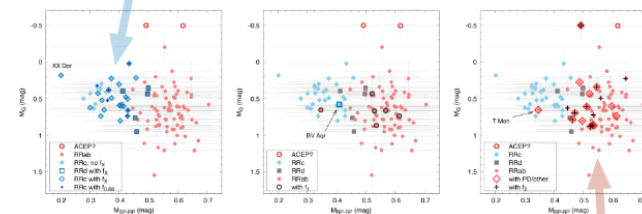
### Period-luminosity and color-magnitude diagrams

The Gaia PLR and CMD plots show that the 116 field RR Lyrae stars identified separate cleanly into the RRc (overtone, blue) and RRab (fundamental mode, red) groups. Double-mode (RRd) stars lie along the interface. A few stars are overcorrected for extinction (crosses). Two bright stars are potential anomalous Cepheids (circles). **These plots show how effective is the combined TESS+Gaia information in classifying the nearby RR Lyrae population.**



### We put the extra modes onto the CMD

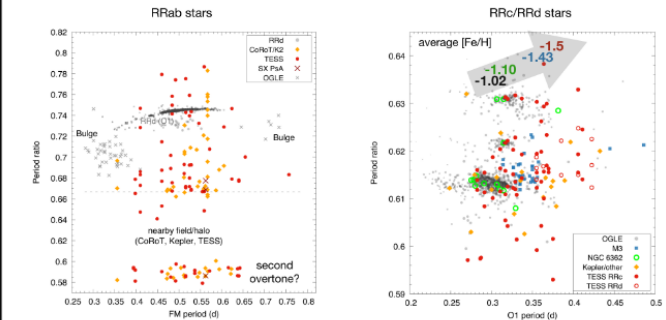
We highlighted the stars where we identified various low-amplitude extra modes. **For RRc stars, most of the hottest stars lack any extra modes**, whereas all cooler stars and RRd ones feature them, suggesting their excitation is  $T_{\text{eff}}$  dependent.



The number of RRab stars with extra modes is too low to draw clear conclusions, but **some signals in RRab stars seem to prefer the hotter stars up to the RRd interface.** The stars labelled are: XX Dor and T Men, both appear to be overcorrected for extinction; BV Aqr, a star which superficially looks like an RRc star but is likely an extreme RRd star, with an amplitude ratio of  $A_0/A_1 = 0.016$  between the two radial modes.

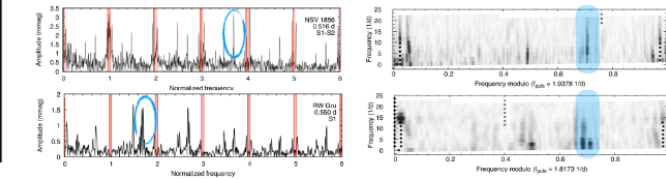
### Many extra modes in RR Lyrae stars

We detected modes beyond the dominant radial mode(s) in 35% of RRab, 81% of RRc and 100% of RRd stars, respectively. Several of these cannot be radial modes, although in RRab stars many cluster around the expected periods of the first and second overtones. The RRc and RRd stars are dominated by the cluster of modes around 0.61-0.64 period ratio. We see clear differences between the bulge and field populations and various open clusters, **suggesting that excitation of these extra modes depend not only on  $T_{\text{eff}}$  but also on stellar metallicity.**



### Mode identification will be difficult

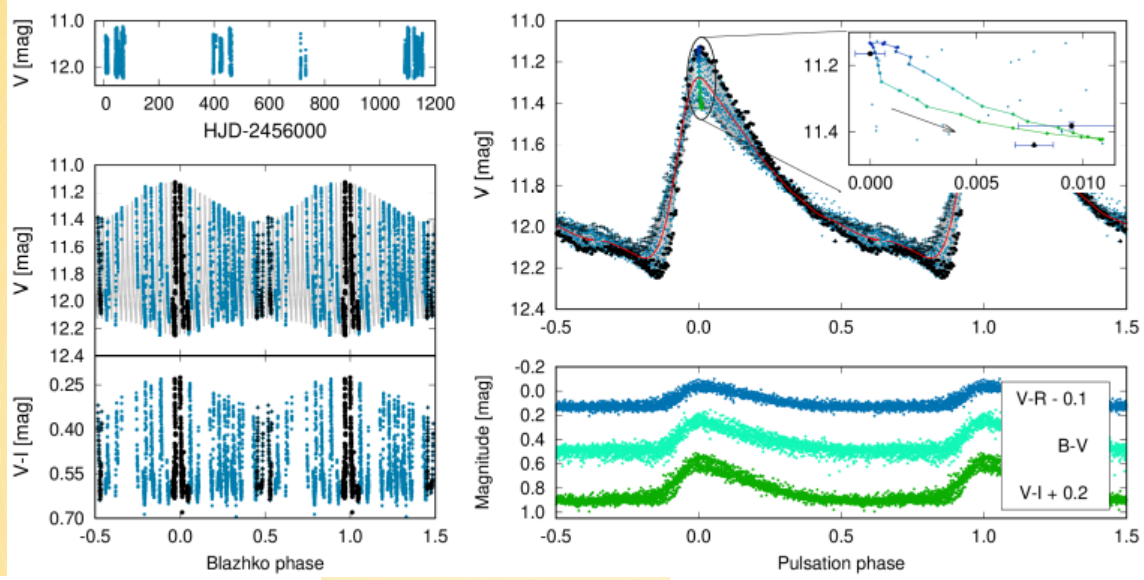
Modes are strongly affected by the strong non-linear coupling to the radial mode which leads to a series of linear combination frequencies in the spectrum. More puzzlingly, if we plot these series of peaks as an échelle diagram (where each vertical structure correspond to one  $f + n f_0$  series), **we observe ridges at the same modulo frequencies, but with peak amplitudes at very different positions.** Here a very similar, second-overtone-like signal peaks at a much higher position in NSV 1856 than in RW Gru, making it difficult to decide where the parent signal really is.



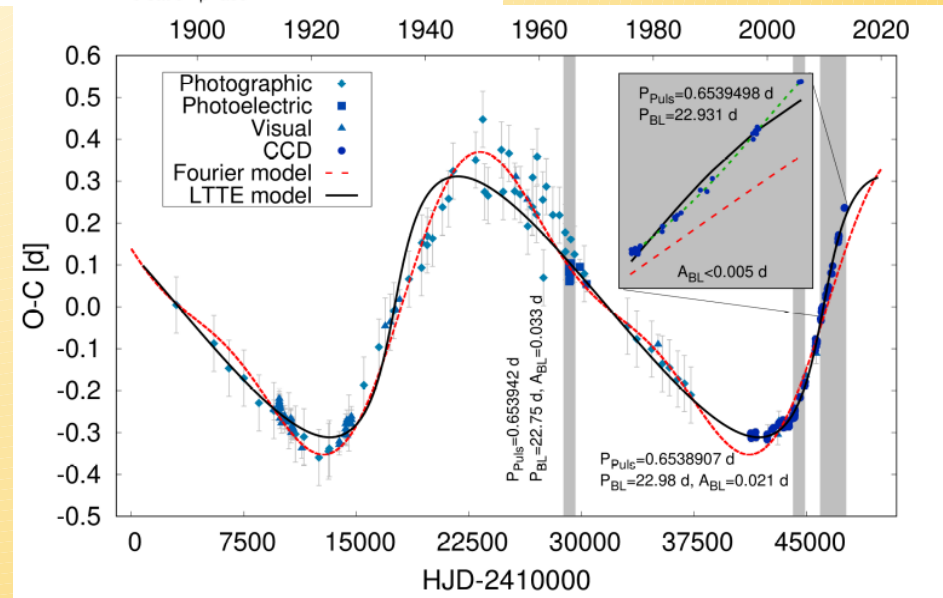
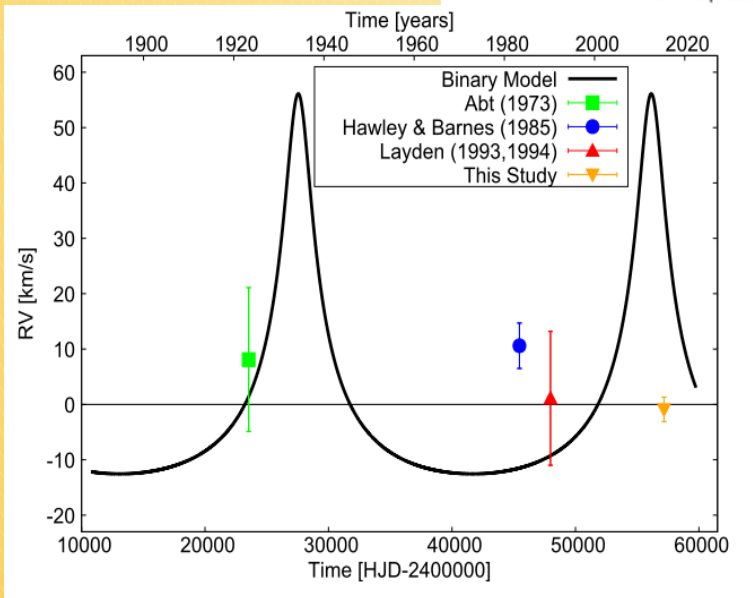
**Acknowledgements:** Funding for the TESS mission is provided by the NASA Science Mission Directorate. This work has made use of data from the ESA mission Gaia, processed by the Gaia Data Processing and Analysis Consortium (DPAC). This research received funding from the LP2018-7 Lendület grant and the Premium Postdoctoral Research Program of the HAS.

# RR Lyrae – spolupráce s amatéry

- Velmi důležitá – sběr fotometrických dat časově náročný
- Možnost barevné fotometrie
- Objevování nových hvězd s Blažkovým jevem, dvojhvězdnost



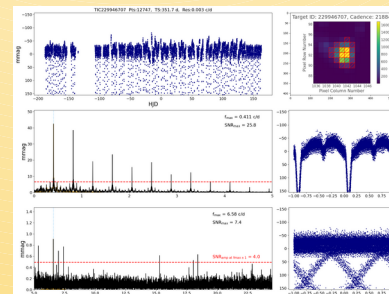
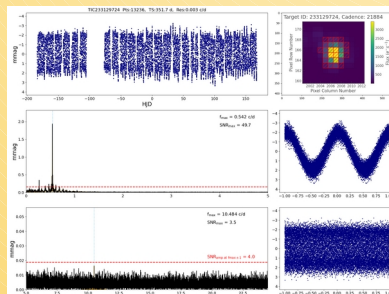
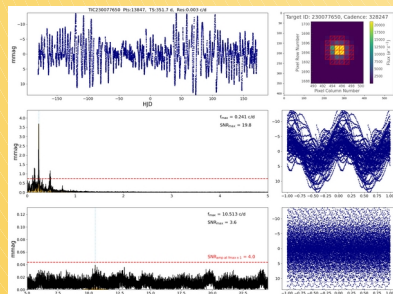
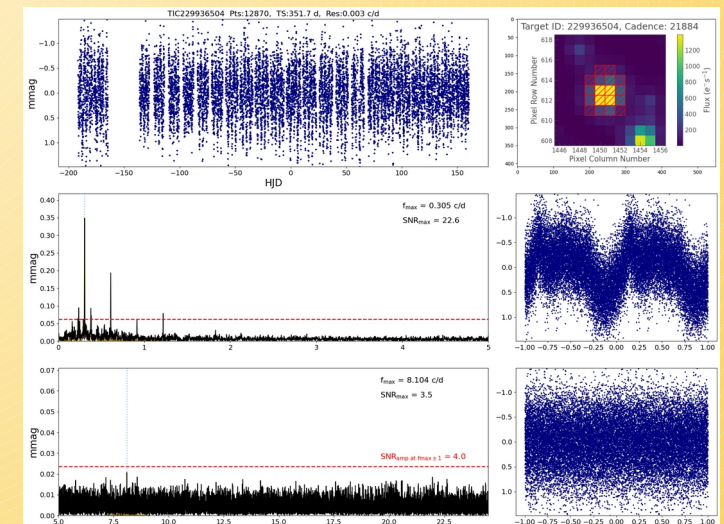
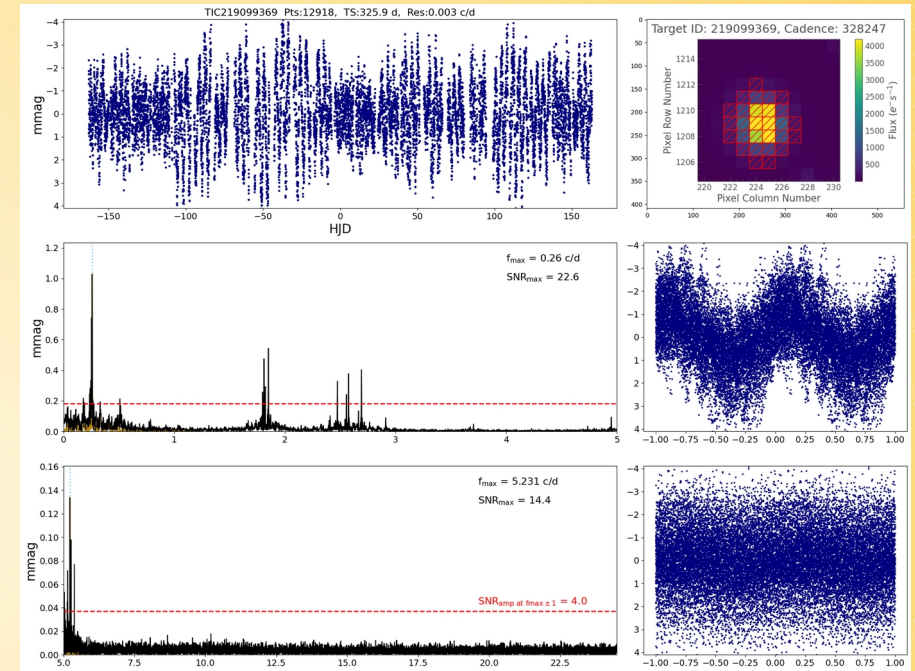
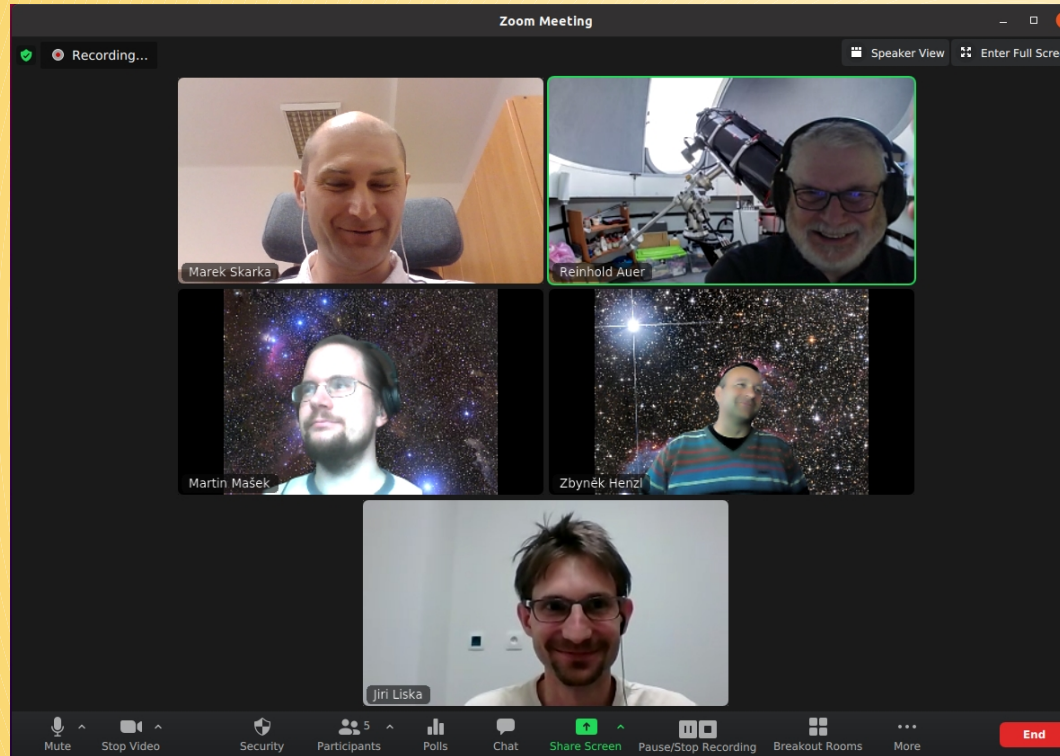
Skarka et al. 2018, MNRAS, 474, 824



# Spolupráce na proměnkách z TESS

Klasifikace proměnných hvězd na základě tvaru světelné křivky a frekvenčního spektra - skupina PES  
Možné projekty A-F hvězdách v rámci BP, DP

- Analýza konkrétního objektu
- Výzkum skupin objektů s podobnými vlastnostmi



# Děkuji za pozornost

## Dotazy, komentáře?

Literatura:

<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2021RvMP...93a5001A/abstract>

[http://stelweb.asu.cas.cz/~skarka/Pulsating\\_Stars.zip](http://stelweb.asu.cas.cz/~skarka/Pulsating_Stars.zip)