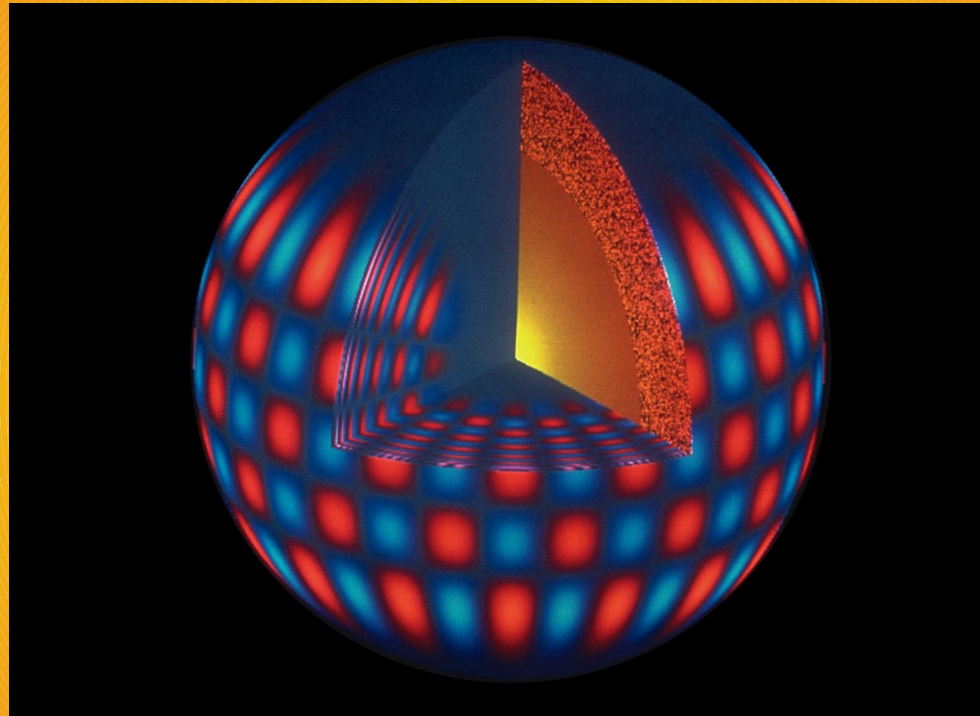


Hvězdné pulzace



Marek Skarka

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?

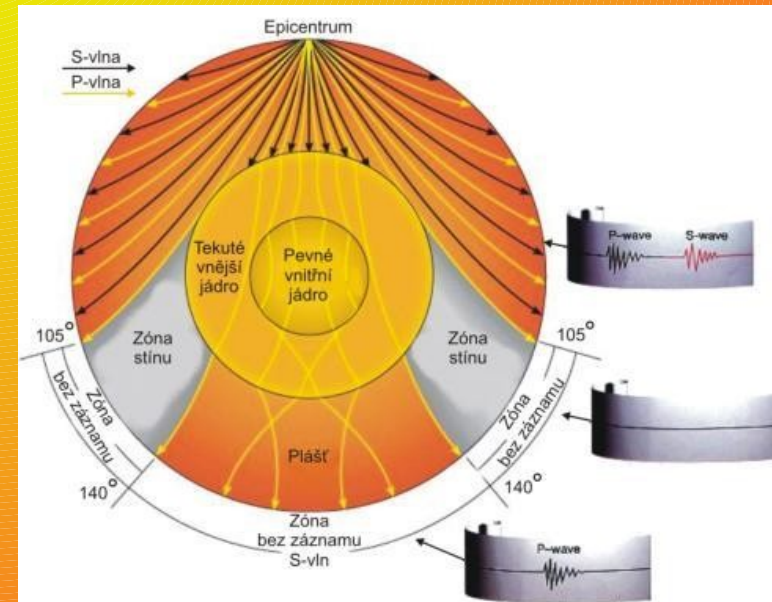
Studium změn jasnosti a spektra způsobených pulzacemi je jedinou možností, jak se podívat dovnitř hvězdy

Co můžeme zjistit:

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



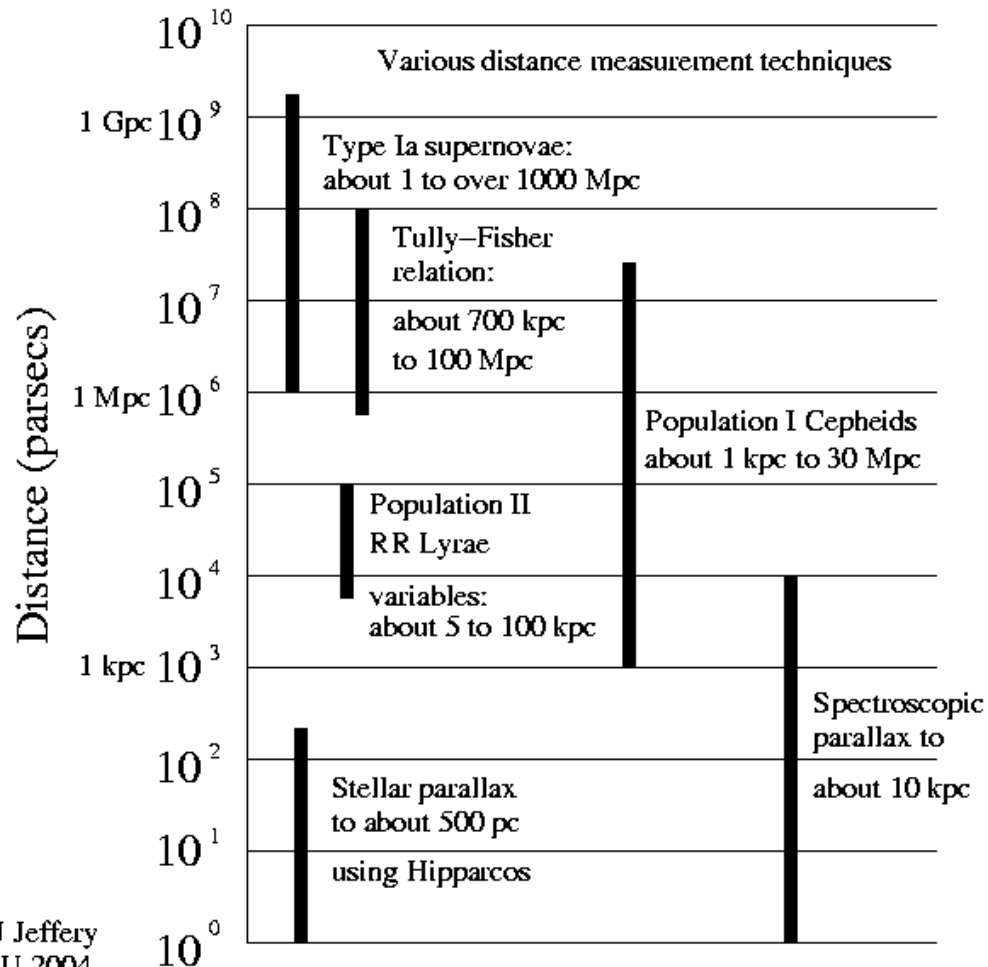
Každá hvězda pulzuje!



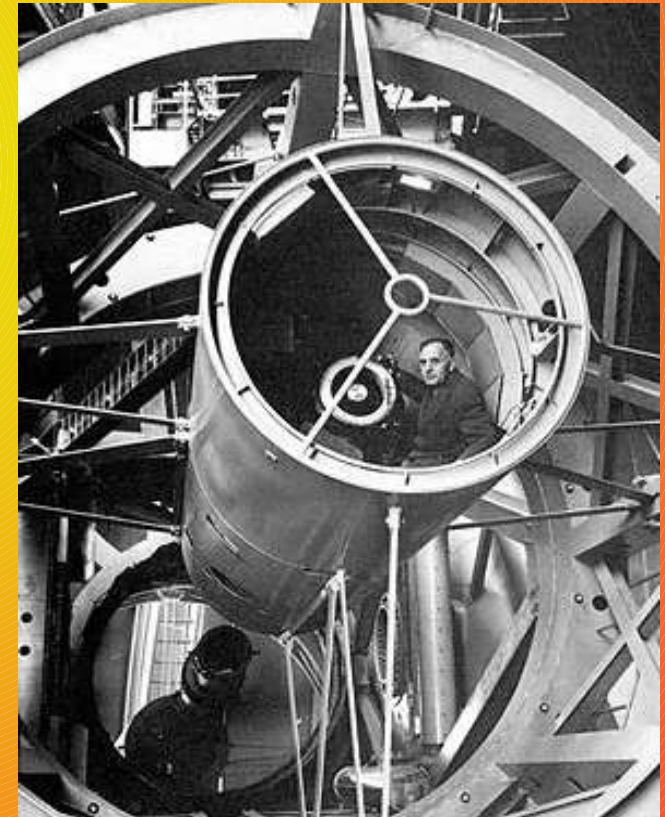
Proč studovat hvězdné pulzace?

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

A Cartoon of the Distance Ladder



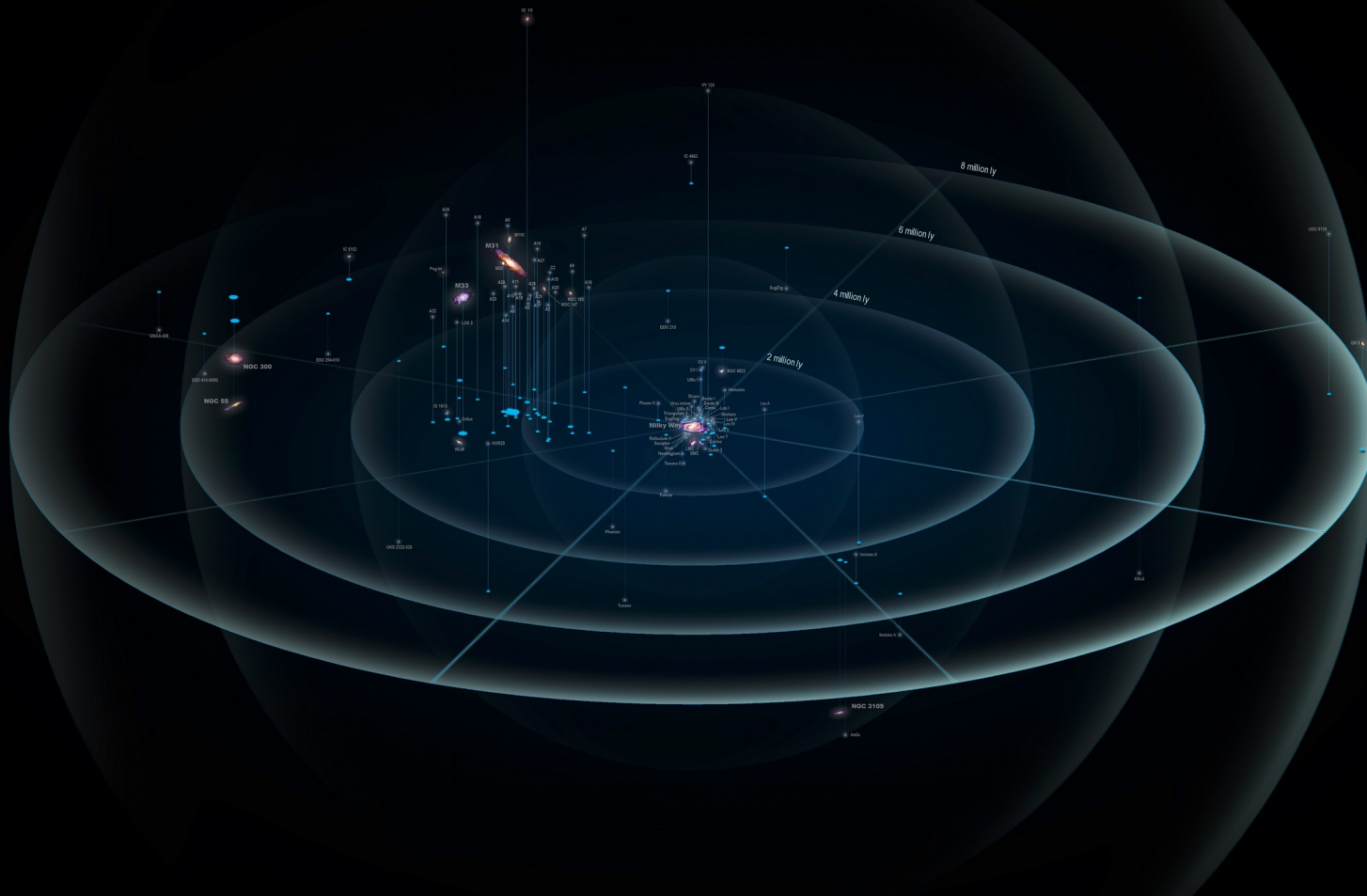
DJ Jeffery
WU 2004



Proč studovat hvězdné pulzace?

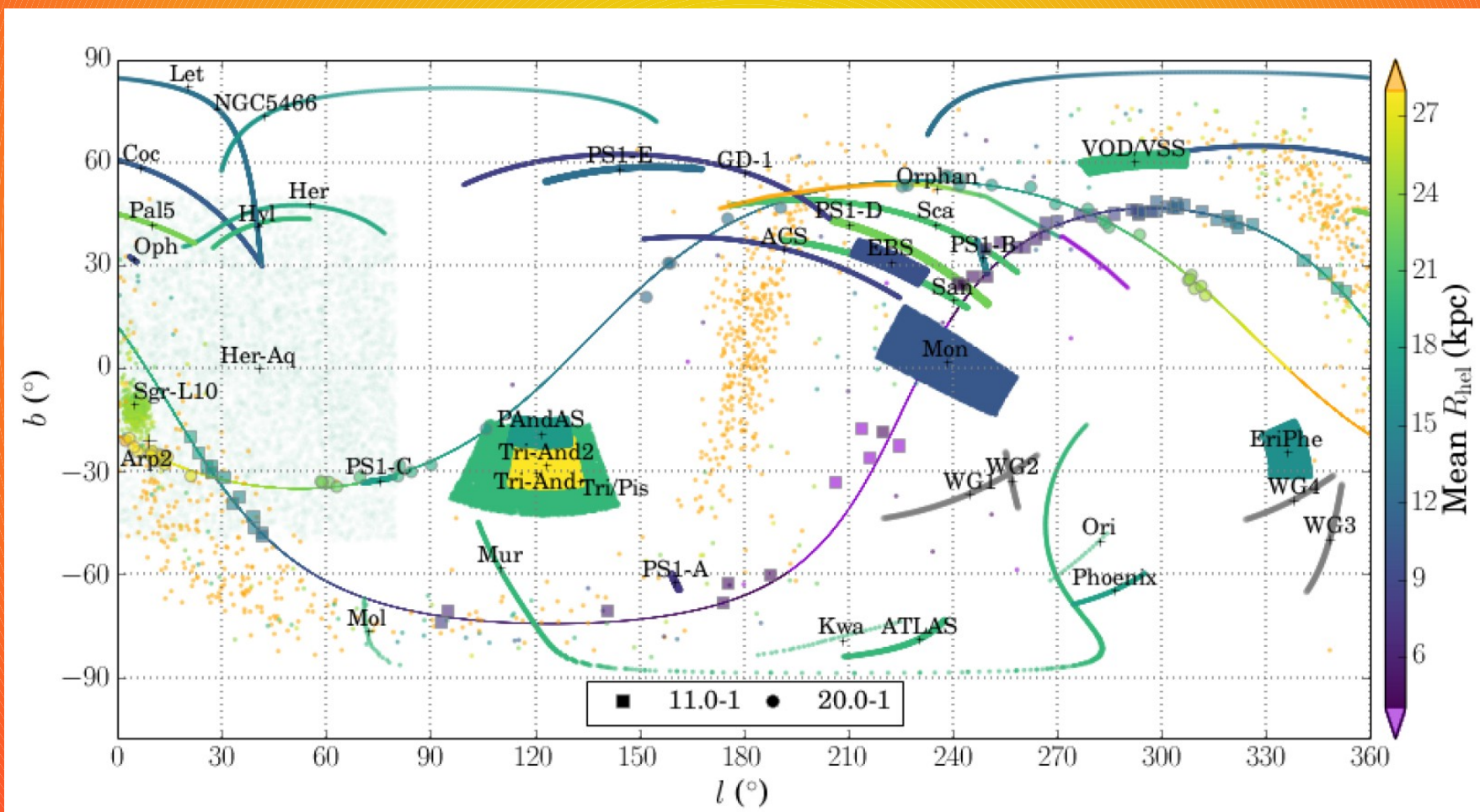
Pulzující hvězdy jsou vhodné k určování vzdáleností, galaktické archeologii a mapování

Local Group and nearest galaxies



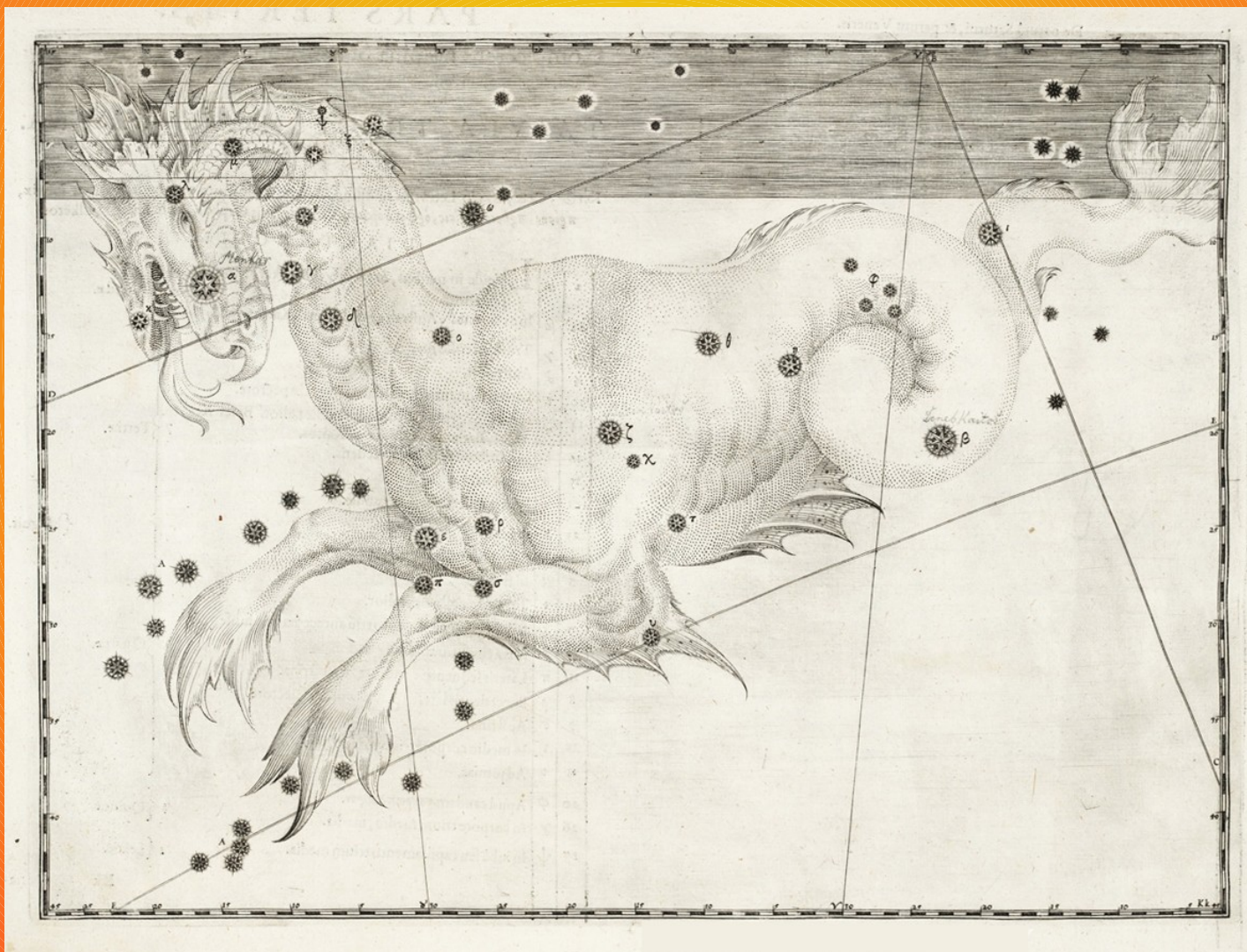
Proč studovat hvězdné pulzace?

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



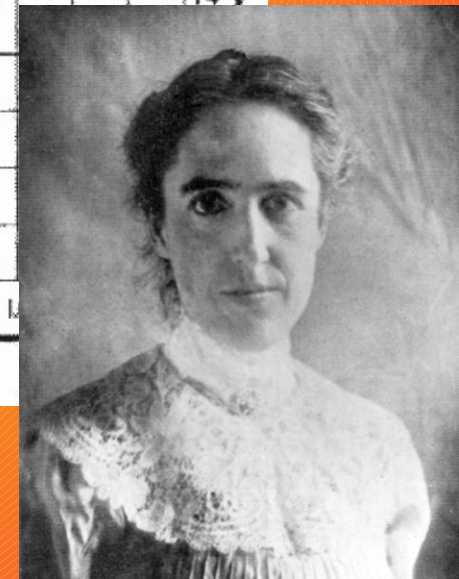
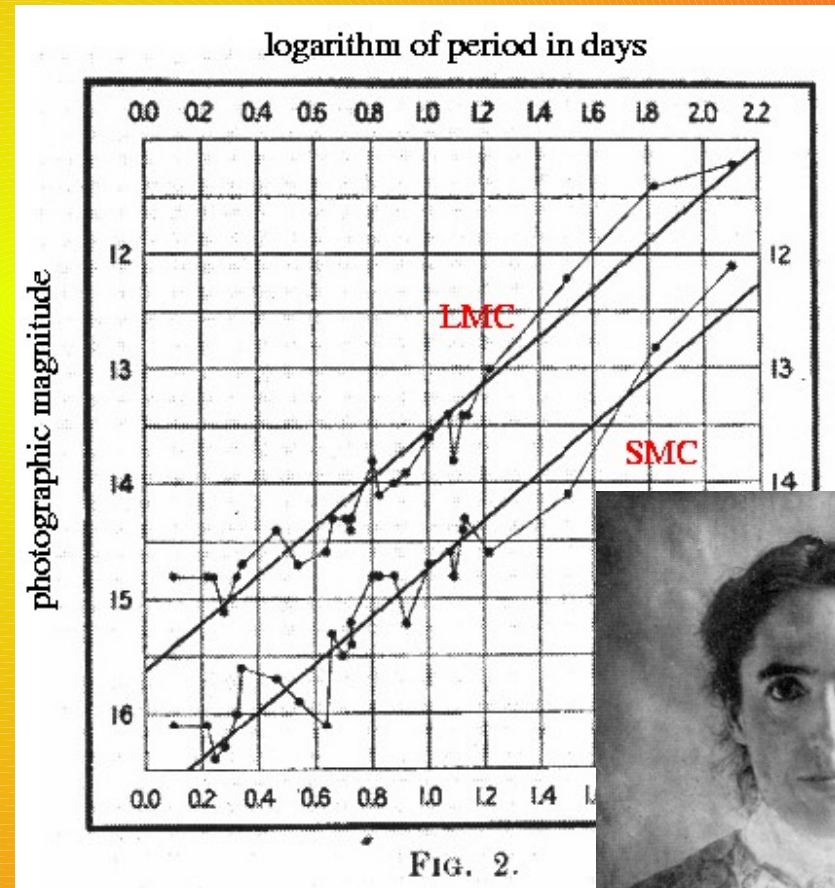
Pulzující hvězdy v kontextu dějin

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



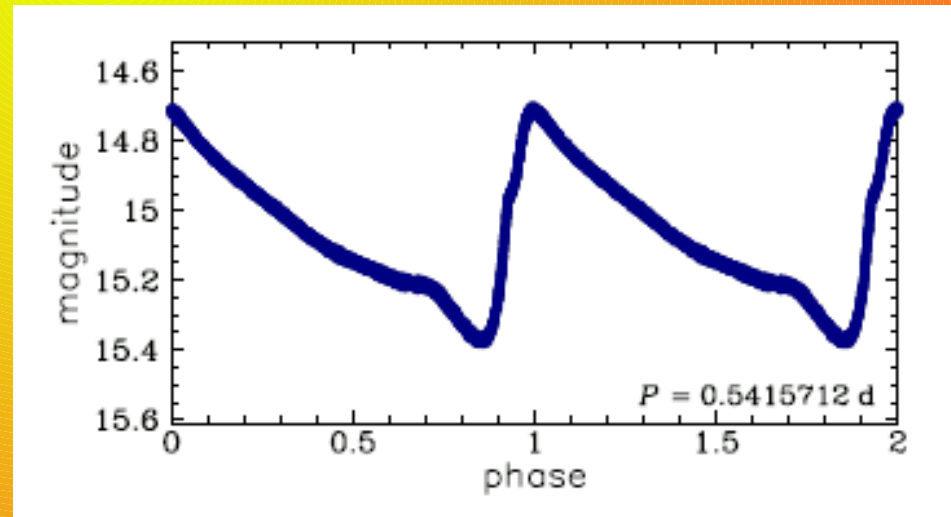
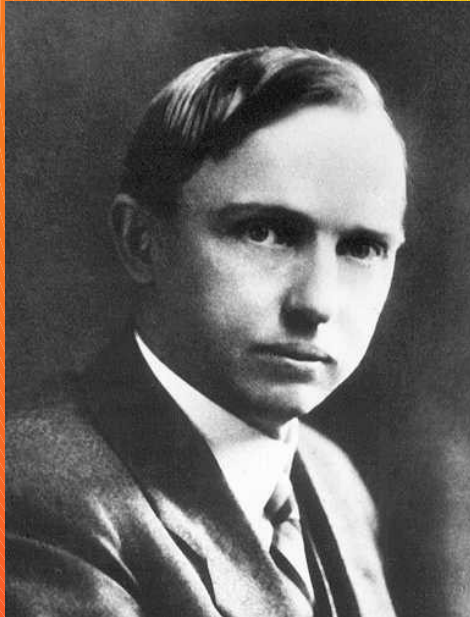
Pulzující hvězdy v kontextu dějin

- 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)



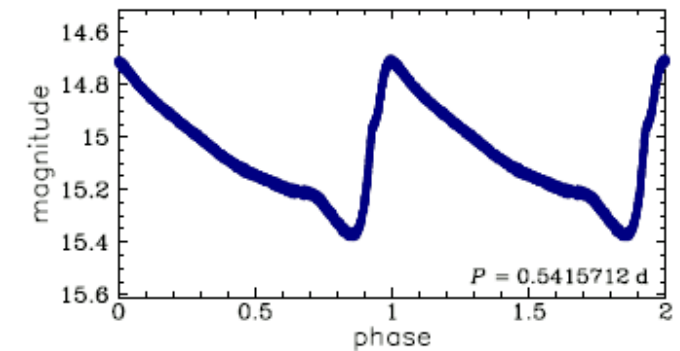
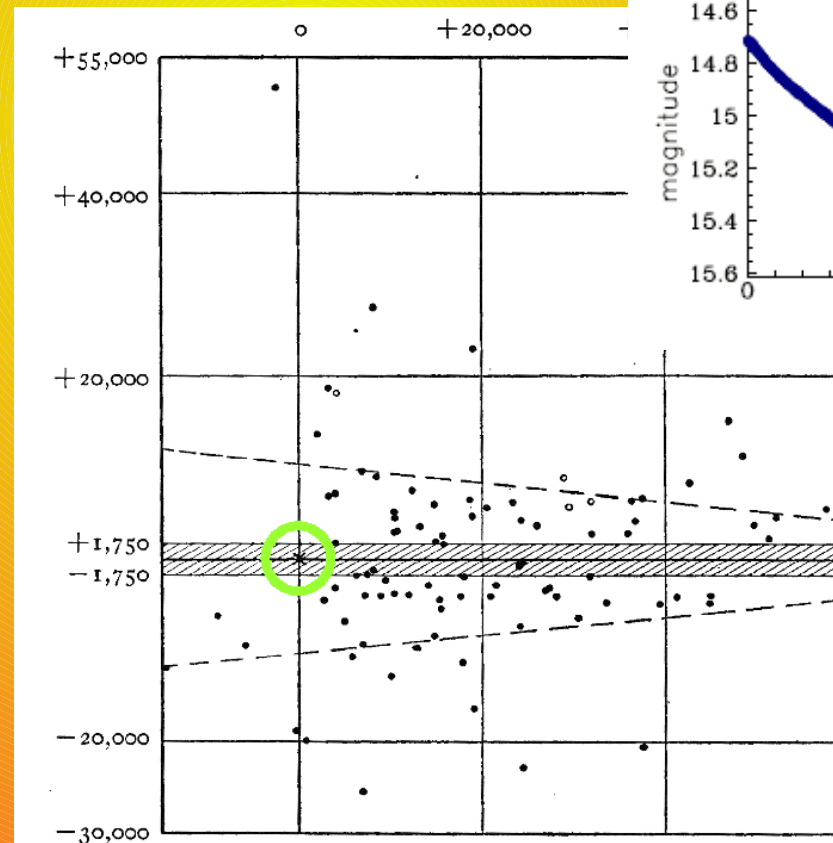
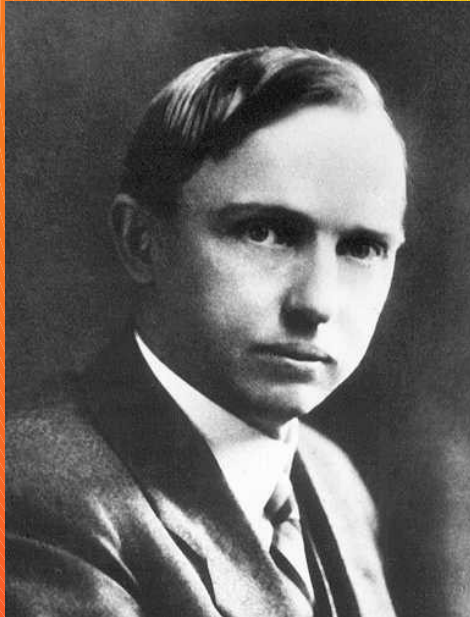
Pulzující hvězdy v kontextu dějin

- 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)



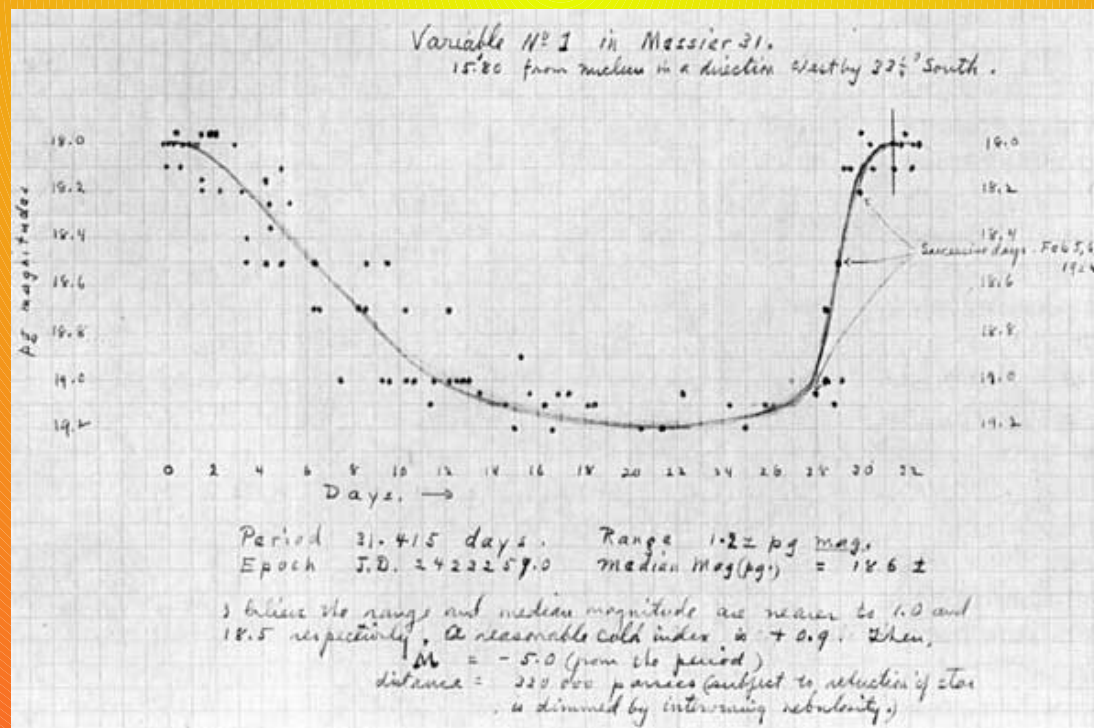
Pulzující hvězdy v kontextu dějin

- 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 periférii Galaxie (měření vzdálenosti pomocí hvězd typu RR Lyrae v kulových hvězdokupách, 1920)
- A. Eddington navrhl κ 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 κ 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

Jak hvězdy pulzují

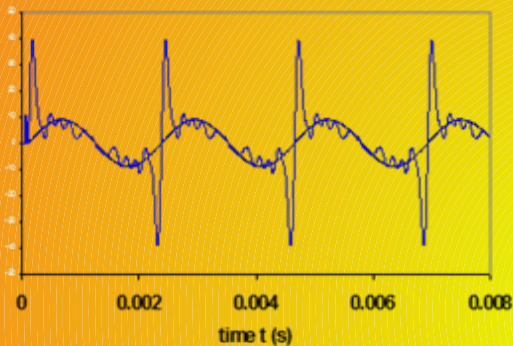
- Vlastní módy pulzací (pulzace na vlastních frekvencích)



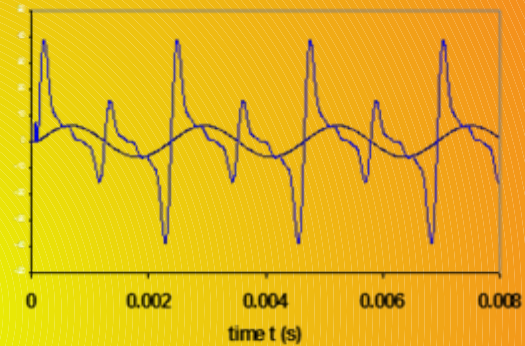
Jak hvězdy pulzují

- Vlastní módy pulzací (pulzace na vlastních frekvencích)

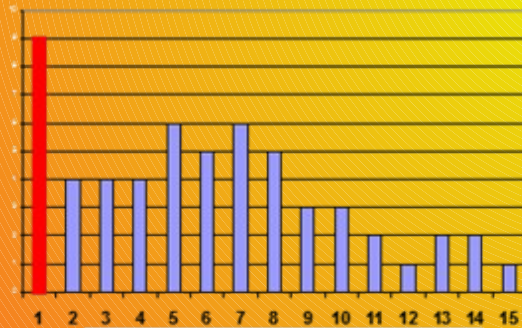
violin recording



viola recording

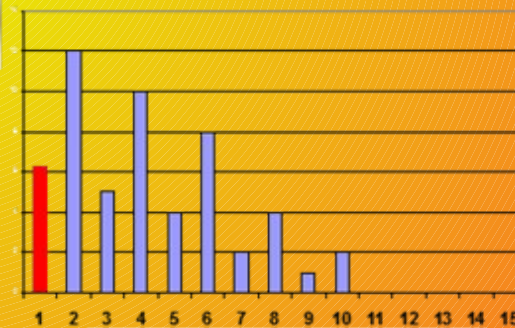


violin spectrum



harmonics ($f_1 = 440$ Hz)

viola spectrum

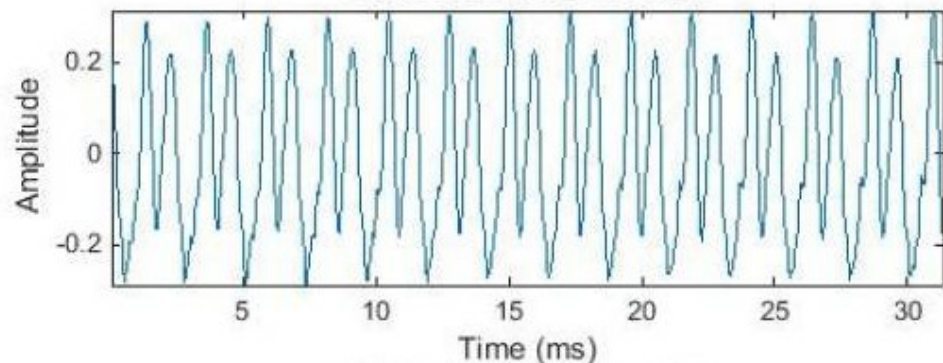


harmonics ($f_1 = 440$ Hz)

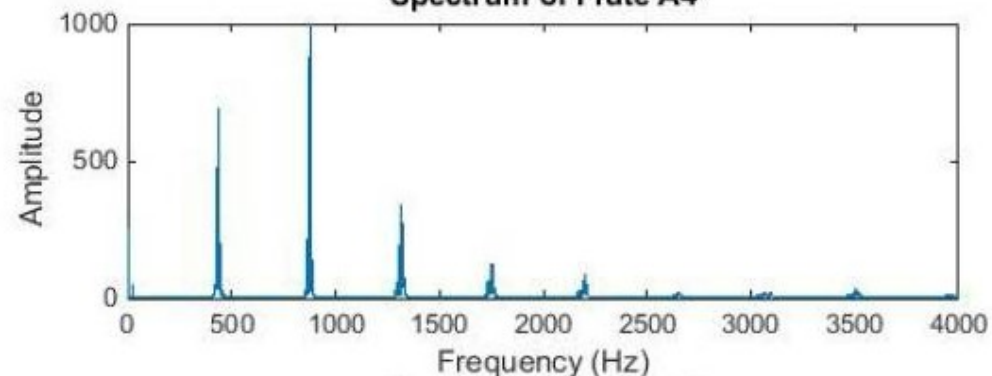
Jak hvězdy pulzují

- Vlastní módy pulzací (pulzace na vlastních frekvencích)

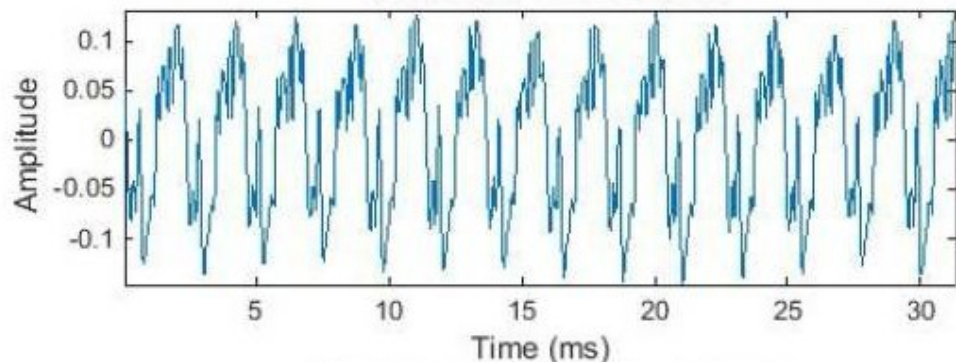
Flute A4 in Time Domain



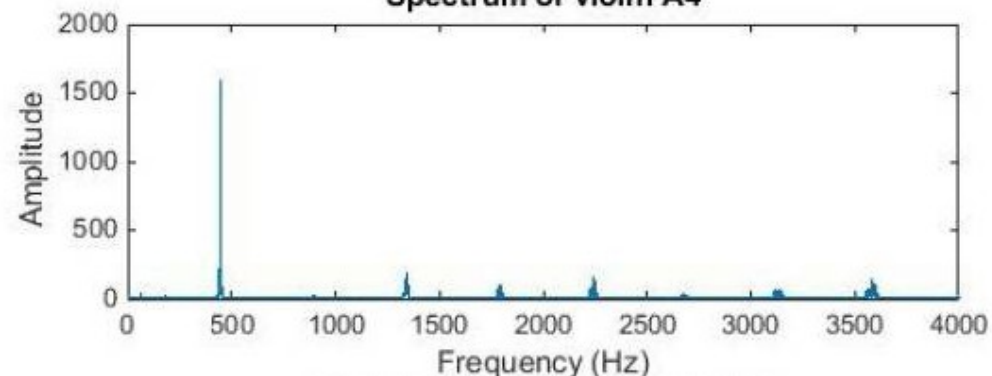
Spectrum of Flute A4



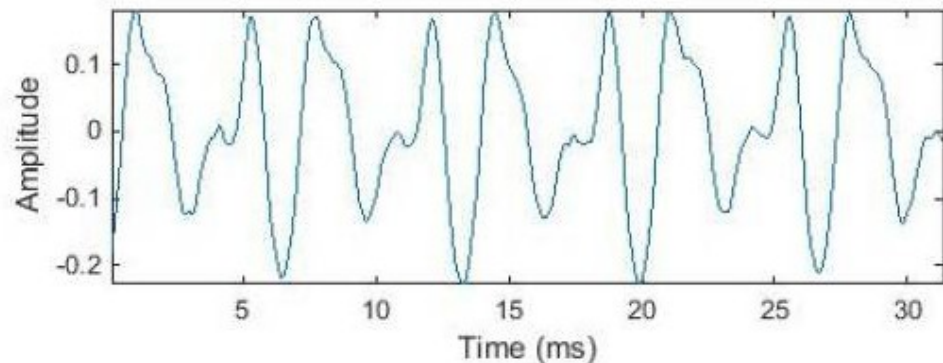
Violin A4 in Time Domain



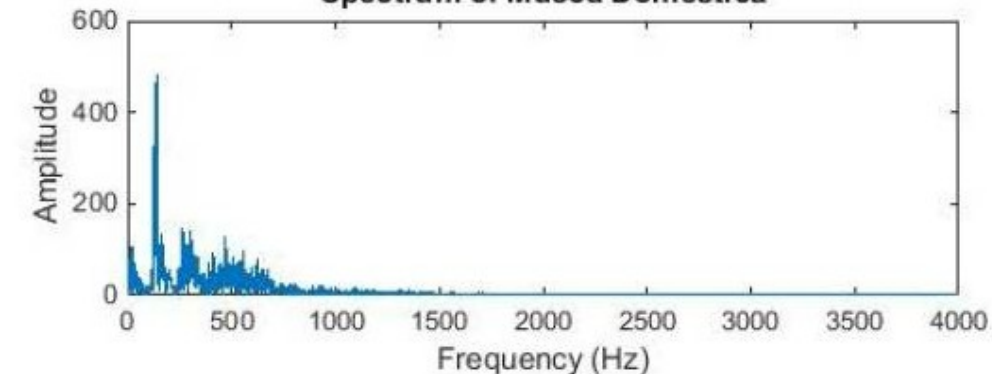
Spectrum of violin A4



Musca Domestica in Time Domain



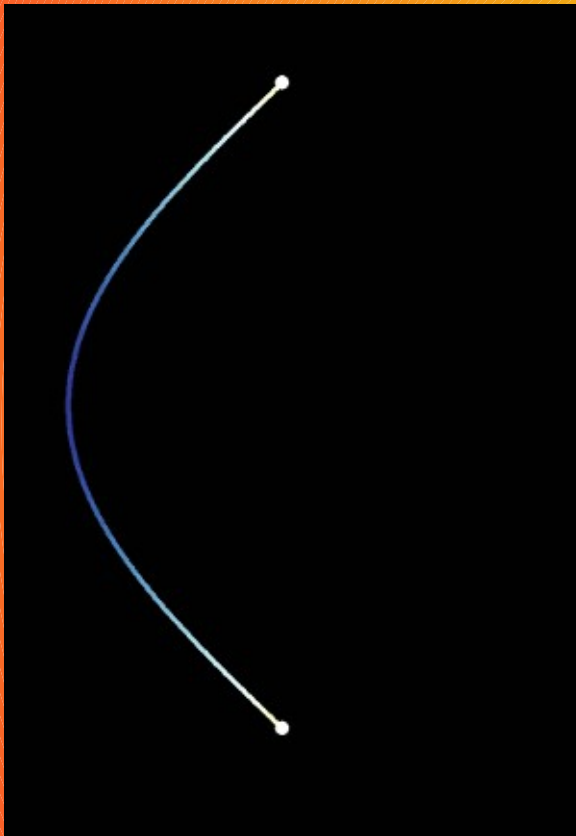
Spectrum of Musca Domestica



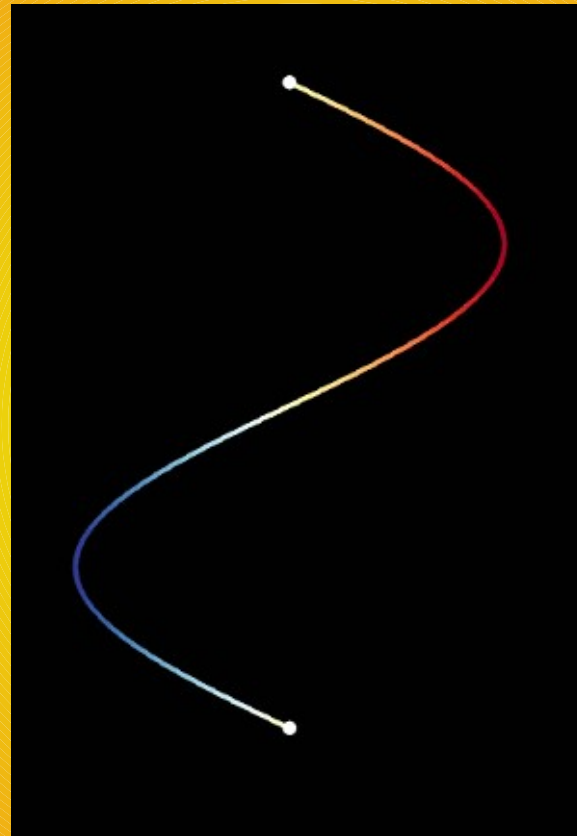
Jak hvězdy pulzují

- Vlastní módy pulzací (pulzace na vlastních frekvencích)

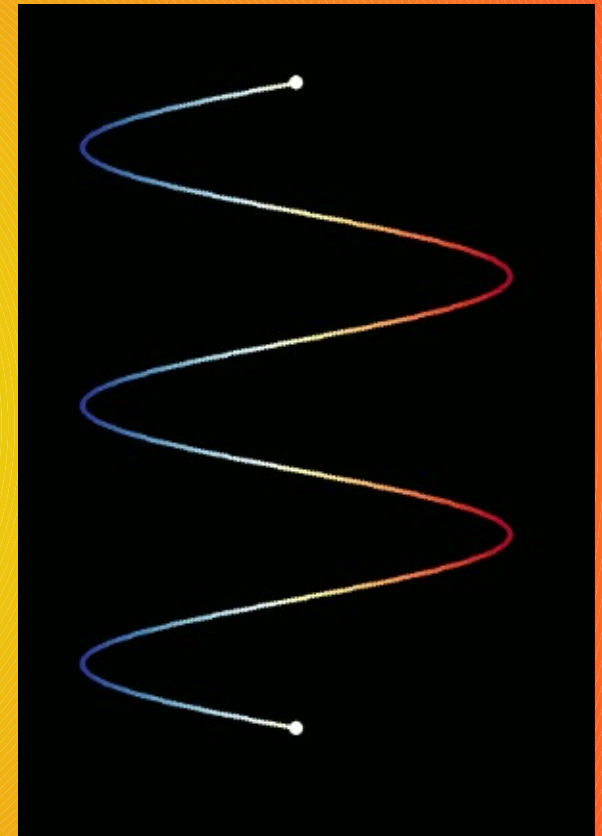
1D oscilace – struna, píšťala. Pulzace popsány jedním číslem popisujícím počet uzlů



0



1

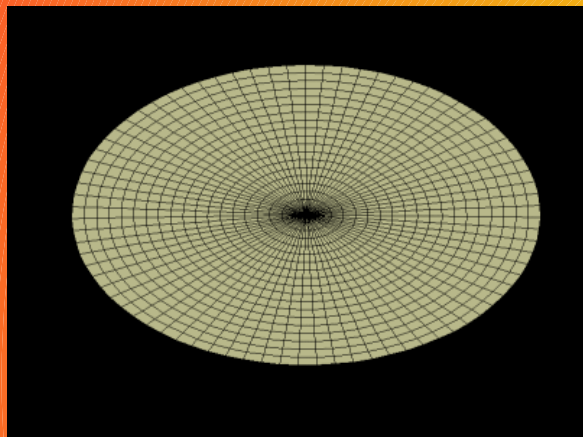


4

Jak hvězdy pulzují

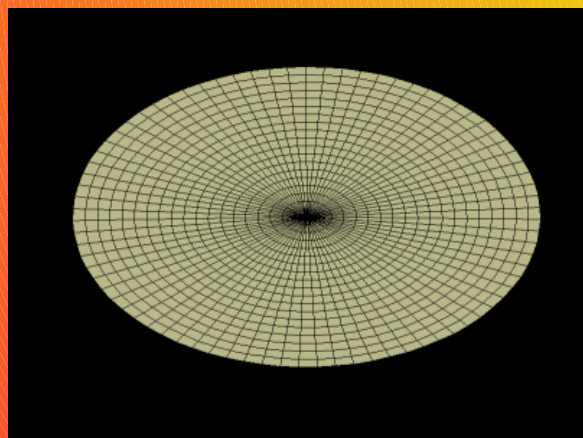
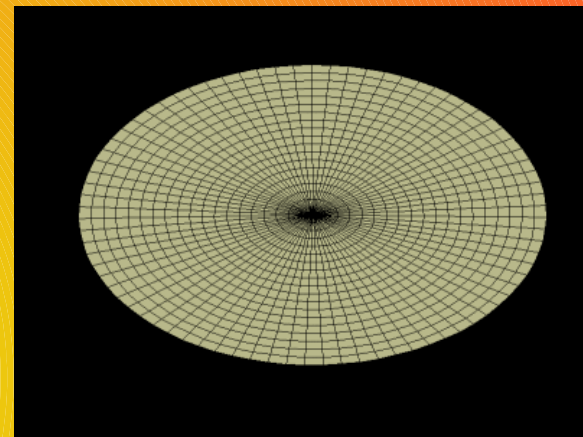
- Vlastní módy pulzací (pulzace na vlastních frekvencích)

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



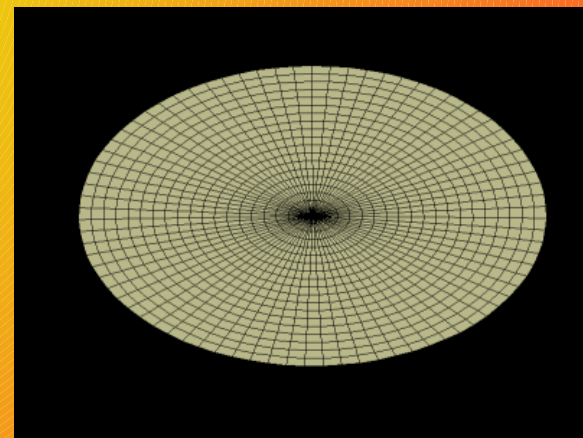
0,0

2,1



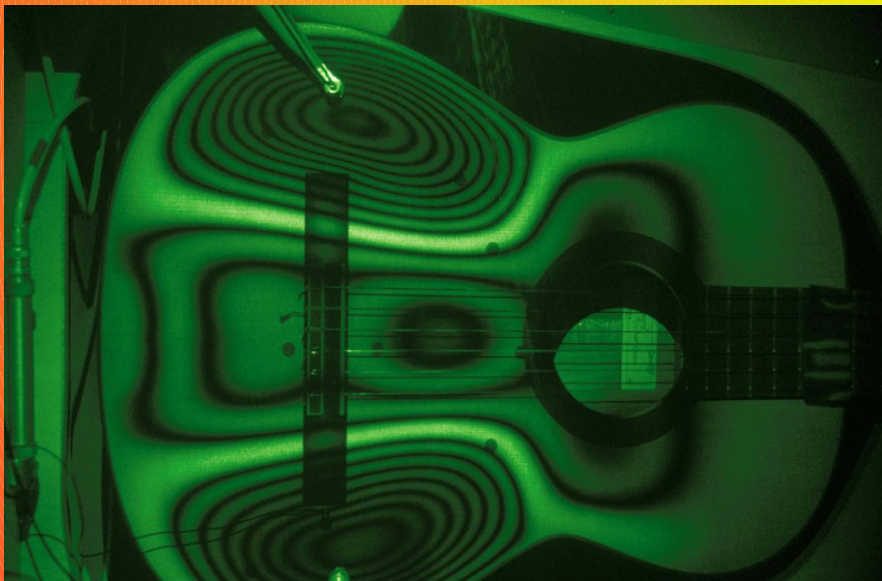
5,0

2,4



Jak hvězdy pulzují

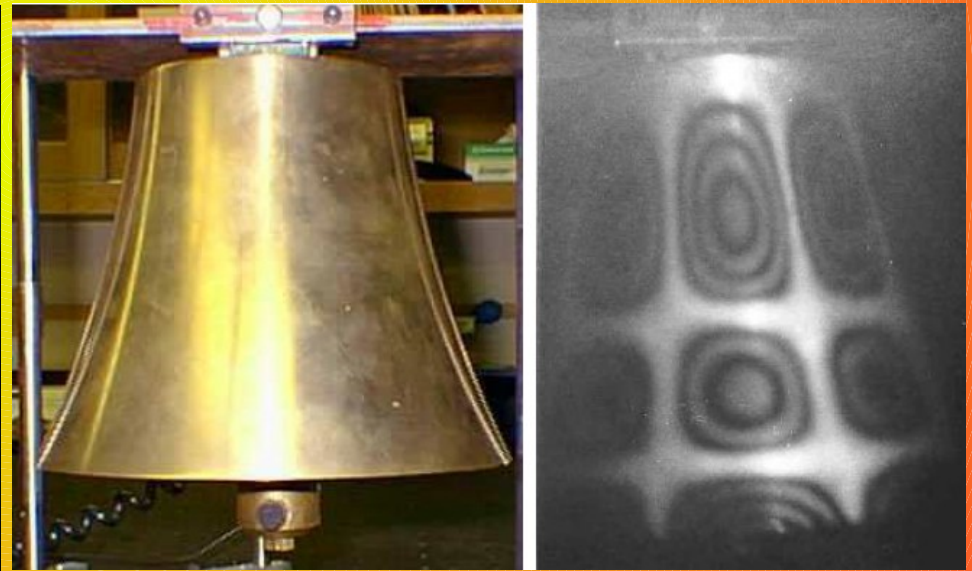
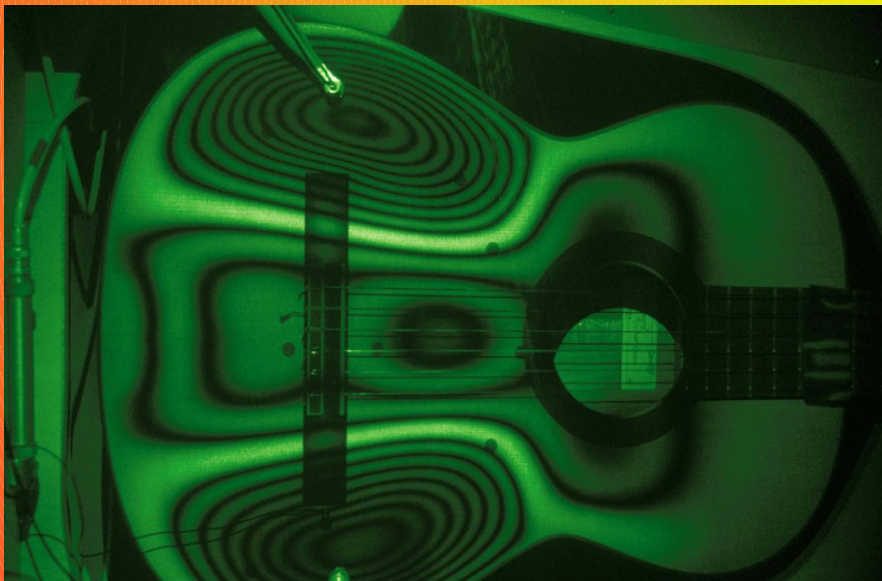
- Vlastní módy pulzací (pulzace na vlastních frekvencích)
2D oscilace – blána na bubnu, dvě čísla nutná k popisu pulzací



<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

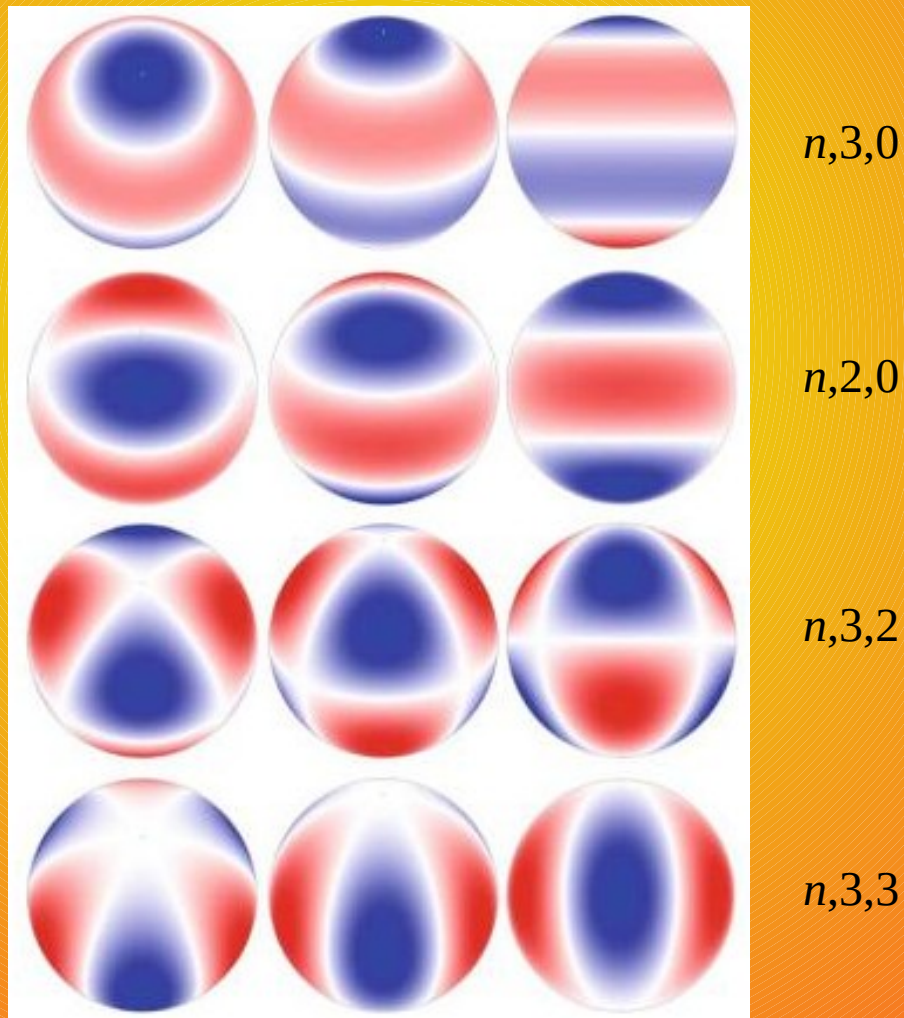


Mauro 2017, An overview on Asteroseismology, Proceedings of Science

Jak hvězdy pulzují

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

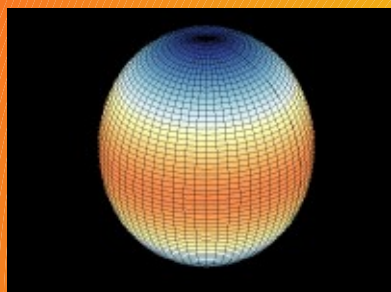
- › n – počet uzlových sfér; definuje mód radiálních pulzací
- › l – počet všech uzlových kružnic na povrchu hvězdy (sférický stupeň)
- › m – počet uzlových kružnic procházející póly (azimutální stupeň)



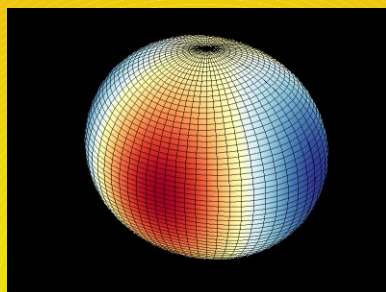
Jak hvězdy pulzují

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

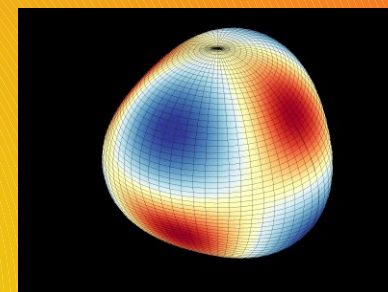
- › n – počet uzlových sfér; definuje mód radiálních pulzací
- › l – počet všech uzlových kružnic na povrchu hvězdy (sférický stupeň)
- › m – počet uzlových kružnic procházející póly (azimutální stupeň)



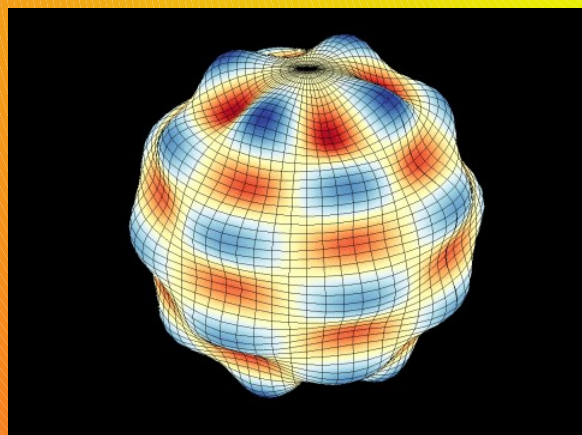
$n, 2, 0$



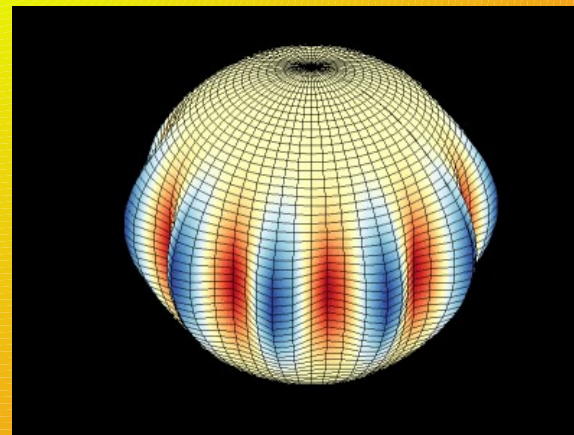
$n, 2, 2$



$n, 3, 2$

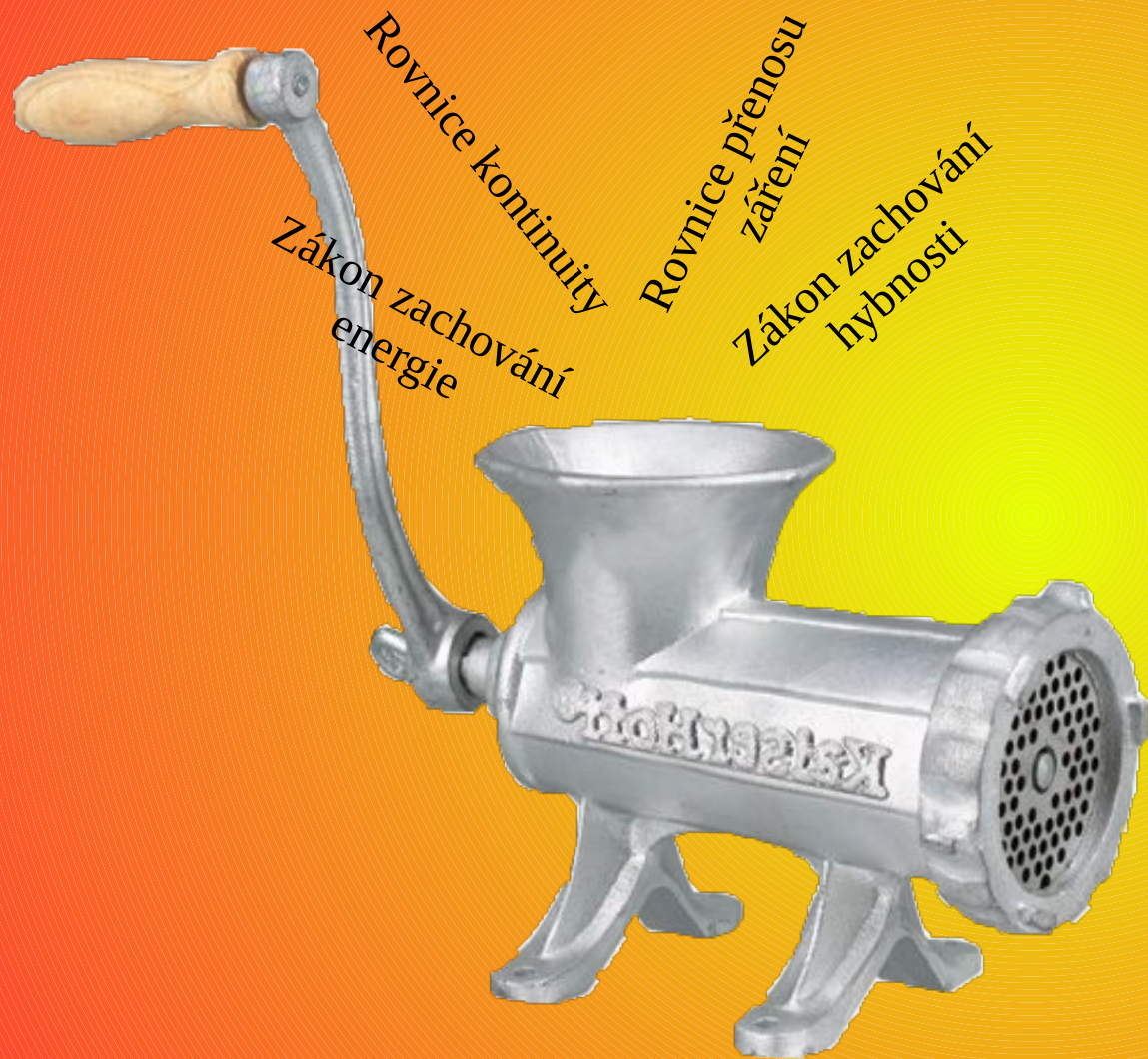


$n, 10, 4$



$n, 10, 10$

Jak hvězdy pulzují



**Rovnice popisující
hvězdné pulzace**

Jak hvězdy pulzují

Rovnice popisující hvězdné pulzace



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

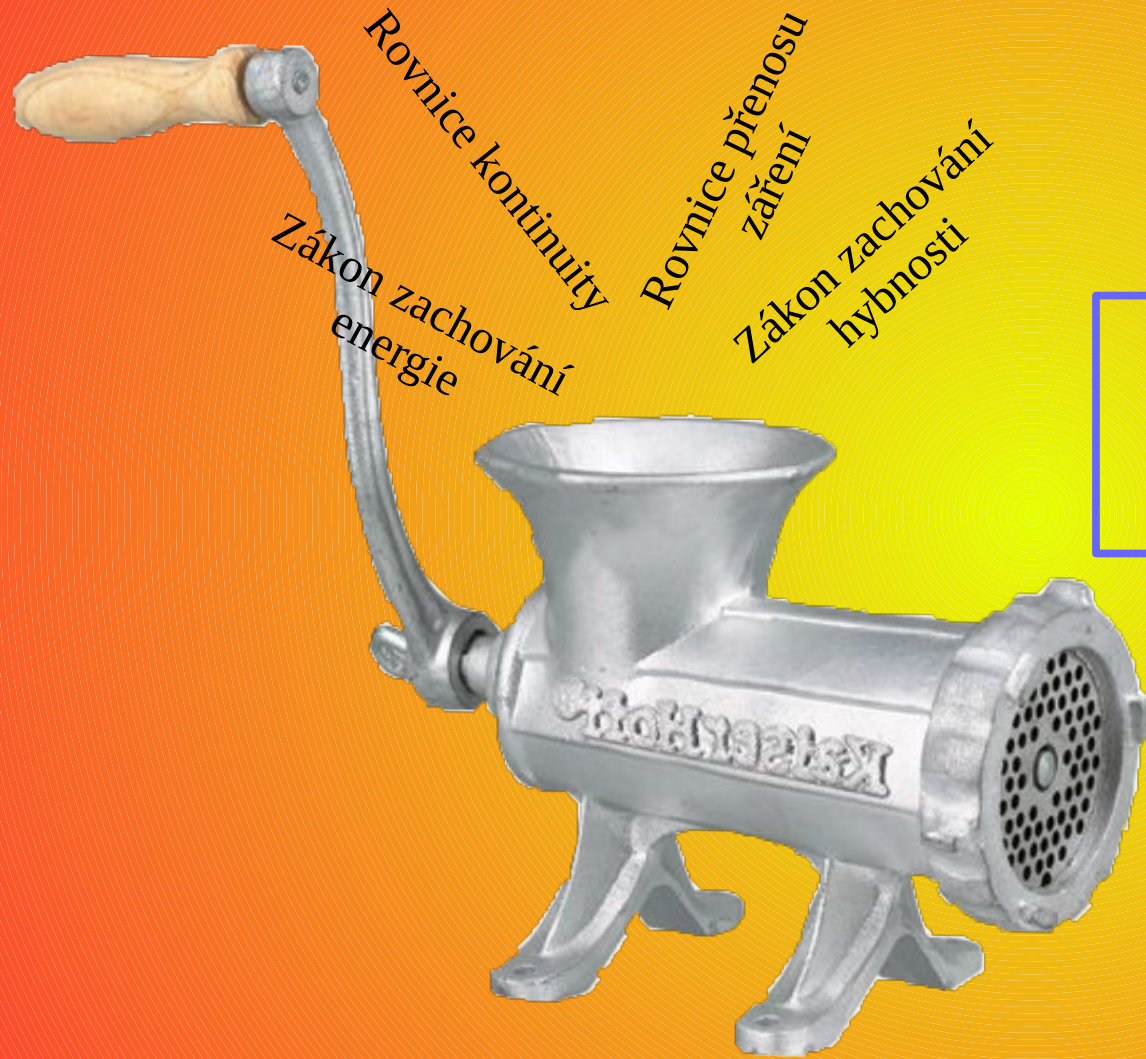
$$\xi_\theta(r, \theta, \phi, t) = b(r) \frac{\partial Y_l^m(\theta, \phi)}{\partial \theta} \exp(-i 2\pi\nu t),$$

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

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

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

Jak hvězdy pulzují



Rovnice kontinuity
Rovnice přenosu záření
Zákon zachování energie
Zákon zachování hybnosti

Vlnění dané frekvence může procházet pouze určitými oblastmi

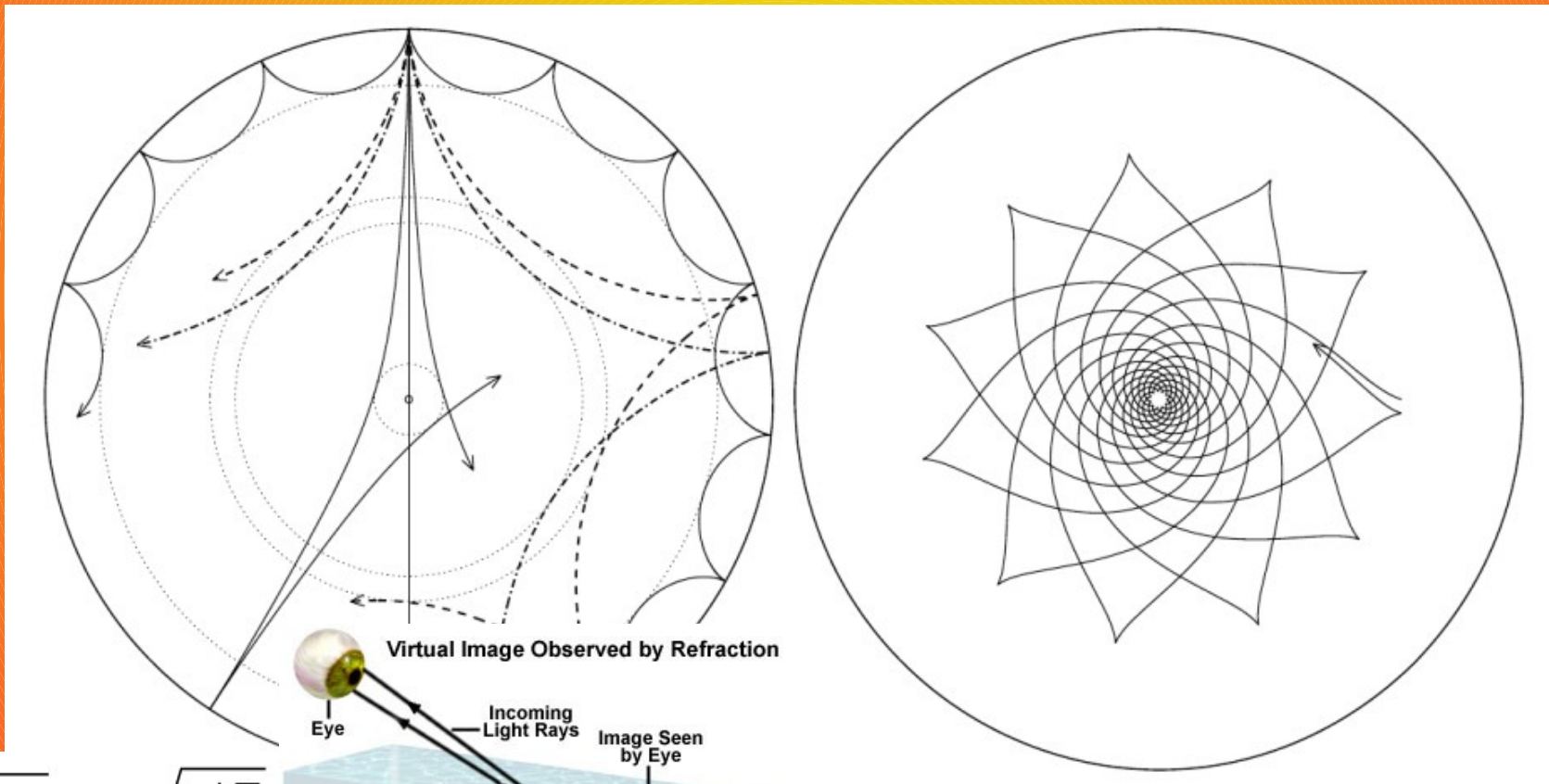
Rovnice popisující hvězdné pulzace

Jak hvězdy pulzují

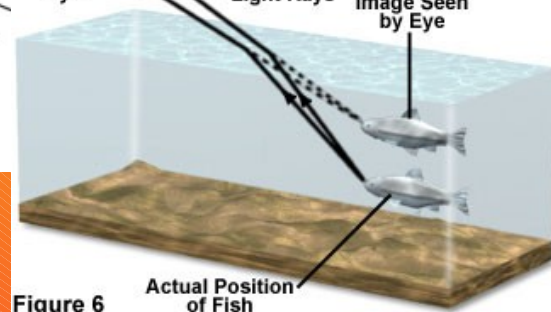
- Tlakové módy (zvukové vlny); vysoké frekvence, v celé hvězdě
- Gravitační módy; nízké frekvence, vnitřní části hvězdy

p-módy

g-módy



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



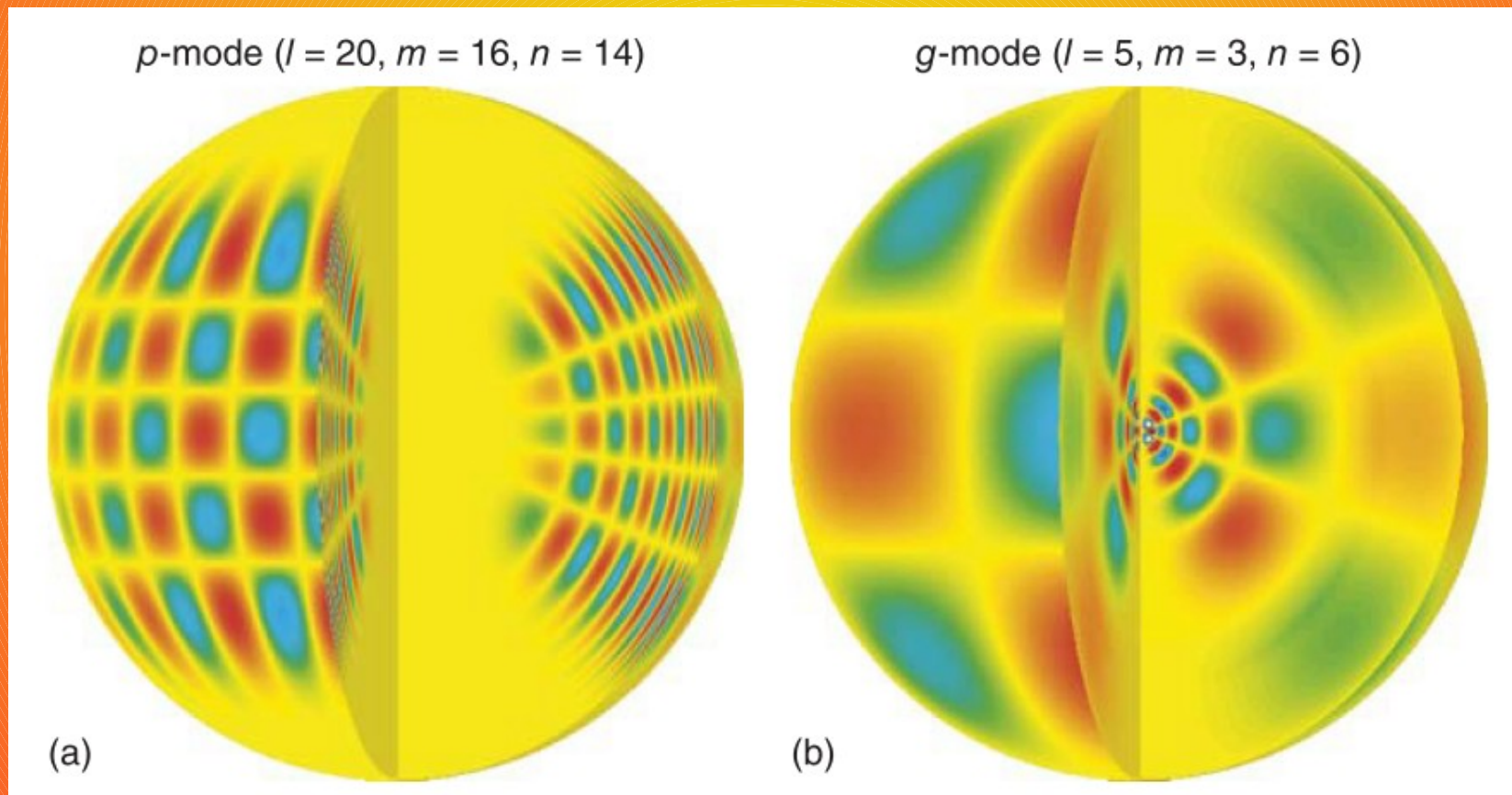
Chistensen-Dalgaard (2014), <http://astro.phys.au.dk/~jcd/>

Jak hvězdy pulzují

- Tlakové módy (zvukové vlny); vysoké frekvence, v celé hvězdě
- Gravitační módy; nízké frekvence, vnitřní části hvězdy

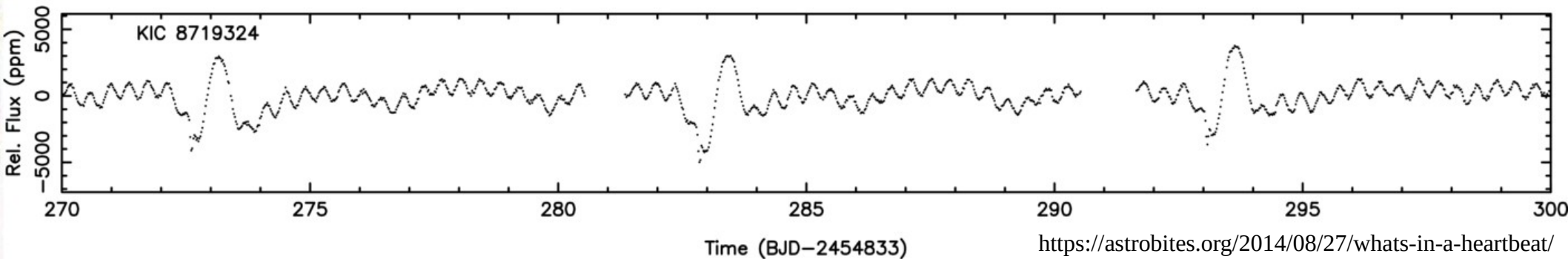
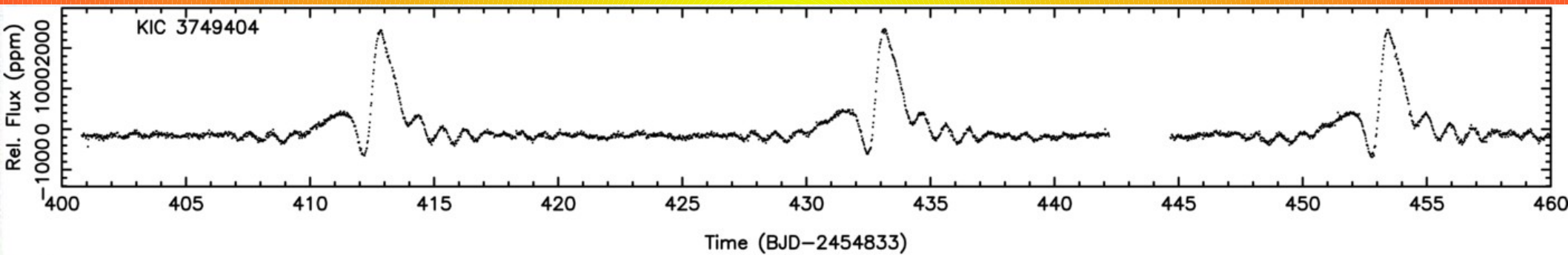
p-módy

g-módy



Proč hvězdy pulzují

- Díky pohybu hmoty uvnitř hvězdy (konvekce) – stochasticky vybuzené kmitání
- Vnitřní “motor”
 - Časově proměnná produkce energie (ϵ mechanismus)
 - Proměnná opacita (κ mechanismus)
 - Proměnná schopnost absorbovat energii (γ mechanismus)
- Generování pulzací v dvojhvězdách se silně eliptickými drahami

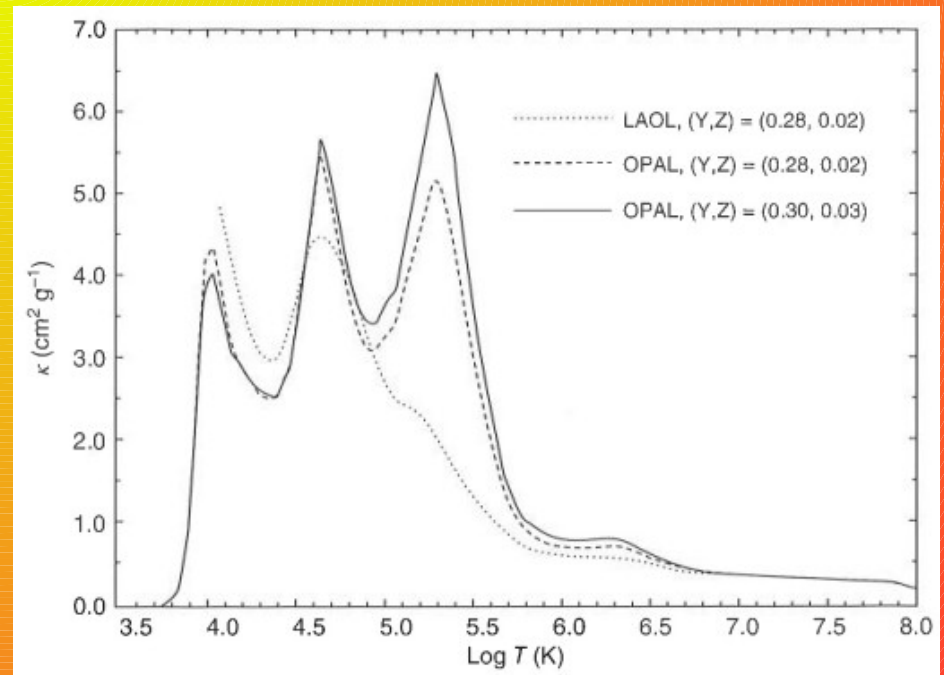
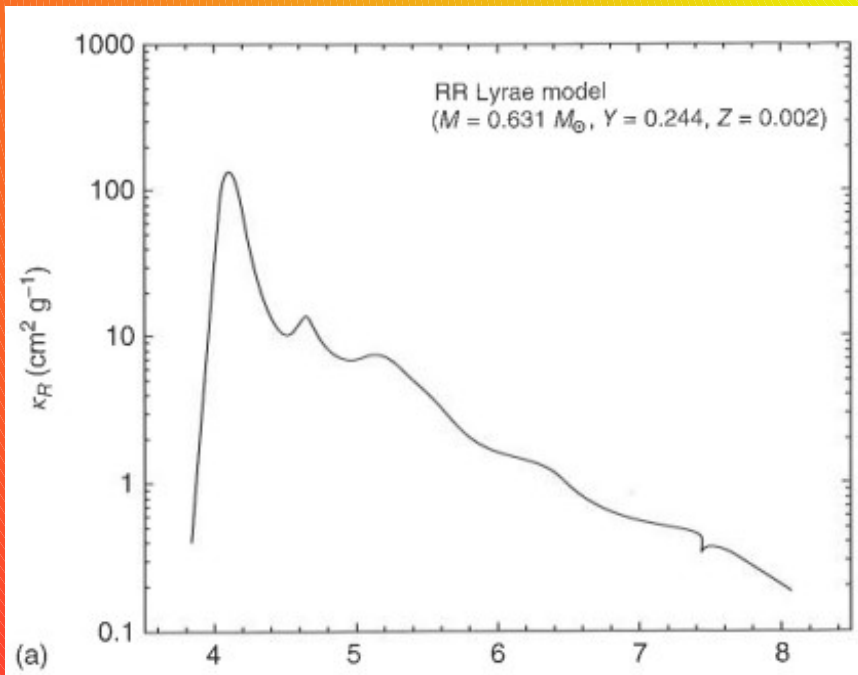


Proč hvězdy pulzují

Radiální pulzace – κ -mechanismus v He II vrstvě (HII, Fe vrstvách)



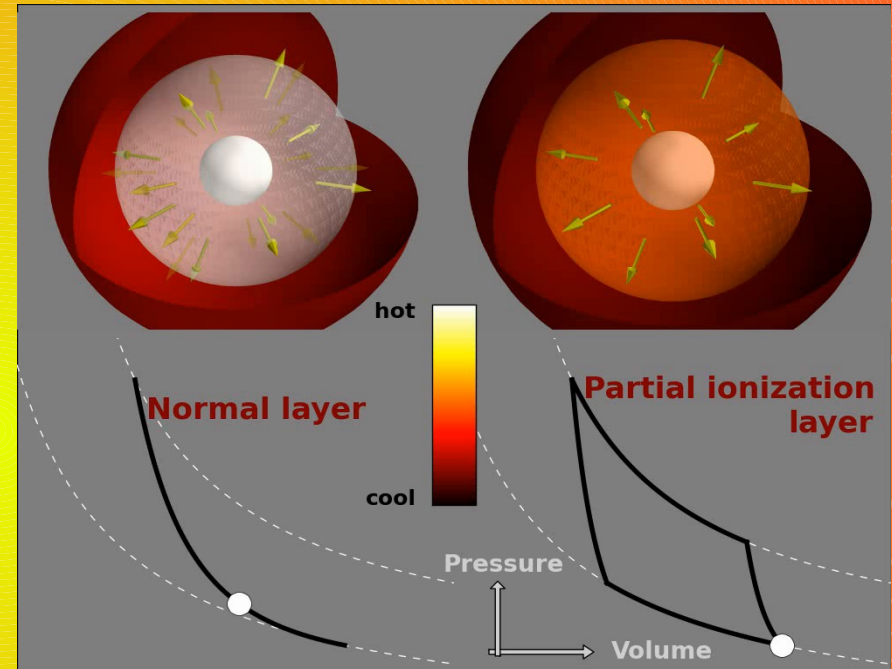
$$\kappa \sim \rho T^{-\frac{7}{2}}$$



Proč hvězdy pulzují

Radiální pulzace – κ -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



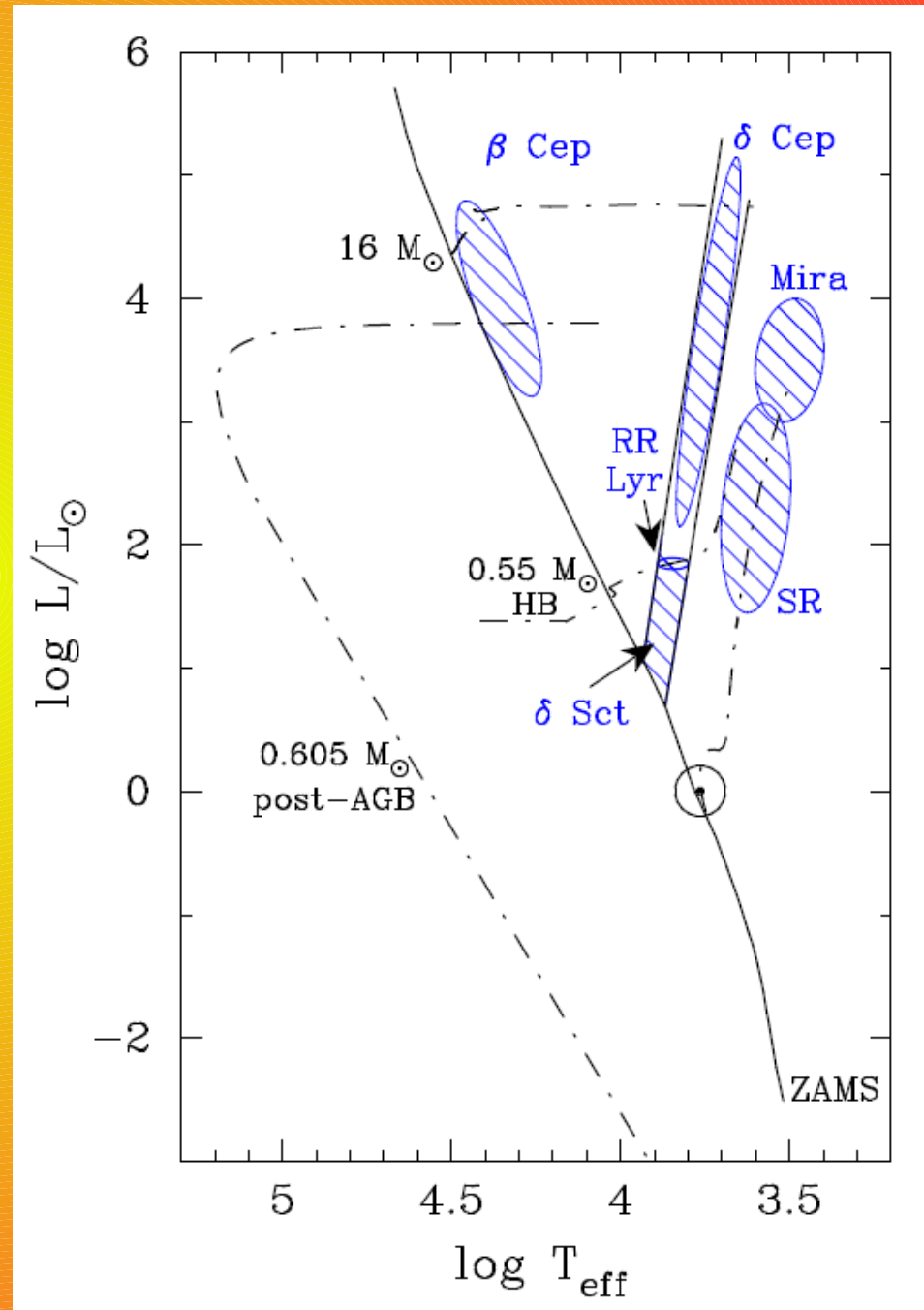
$$W = \oint \frac{\delta Q \delta T(t)}{T_0} > 0$$

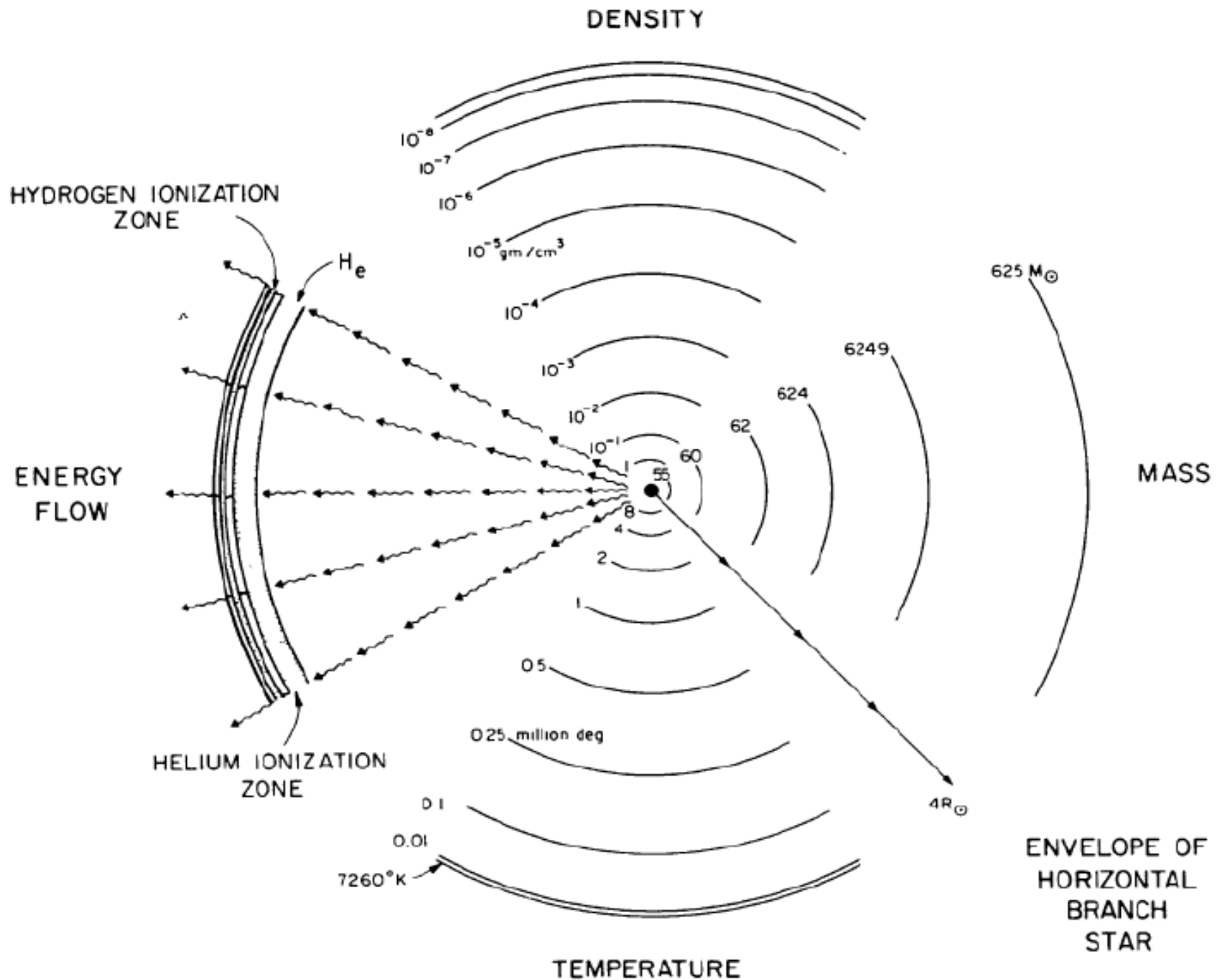
Proč hvězdy pulzují

Radiální pulzace – κ -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

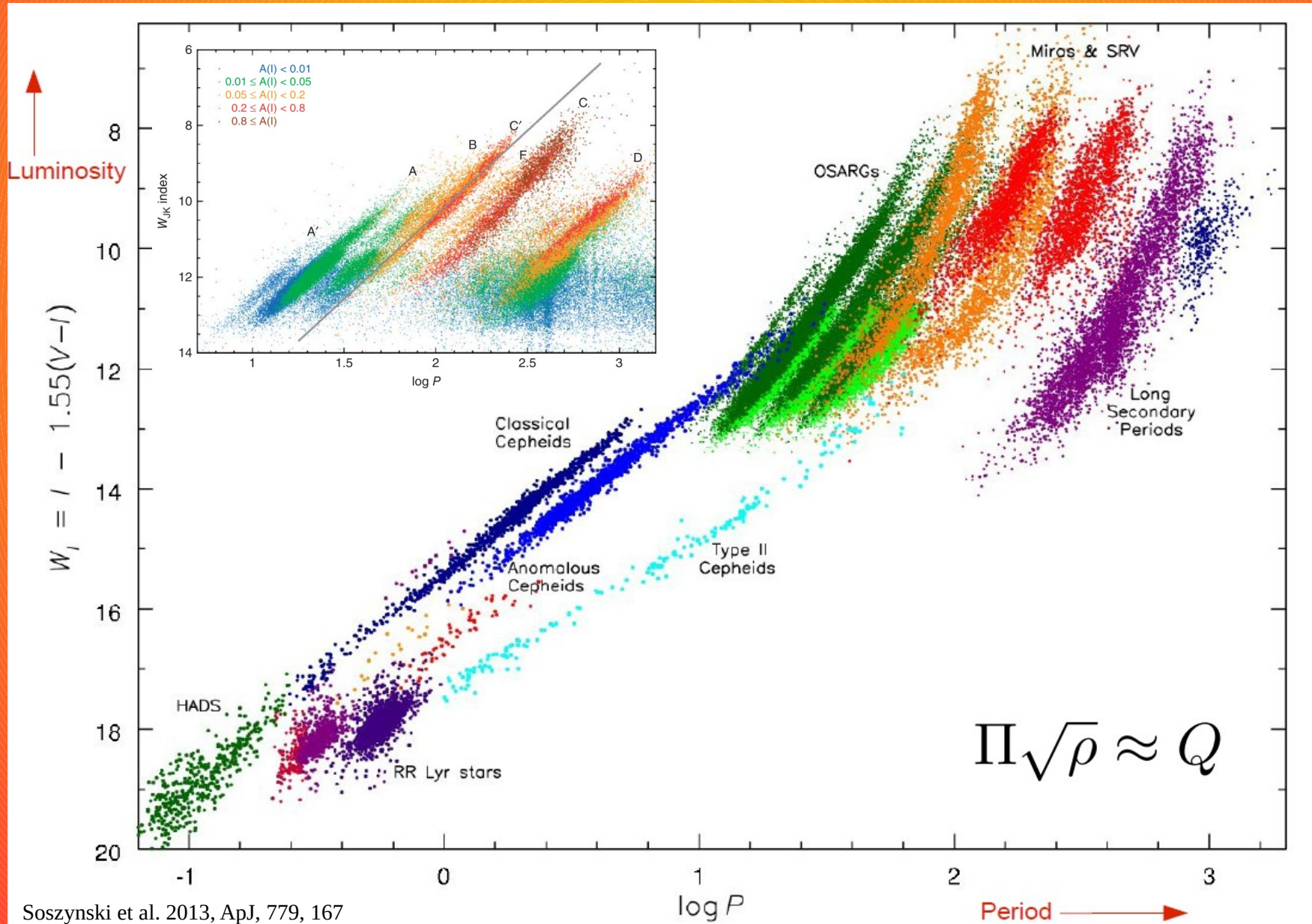
$$W = \oint \frac{\delta Q \delta T(t)}{T_0} > 0$$





Vztah perioda-zářivý výkon

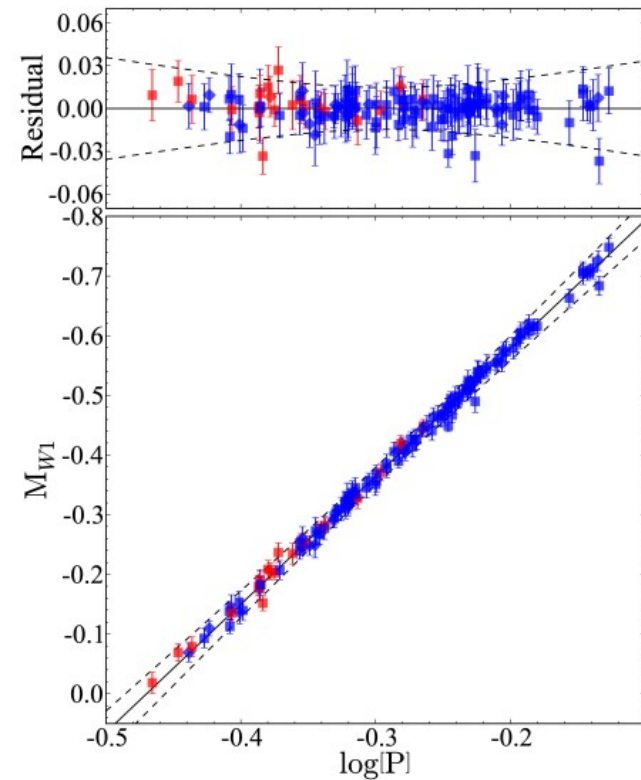
- Čím větší je hvězda, tím delší je perioda základního módu radiálních pulzací
=> vztah perioda-zářivý výkon => indikátor vzdálenosti



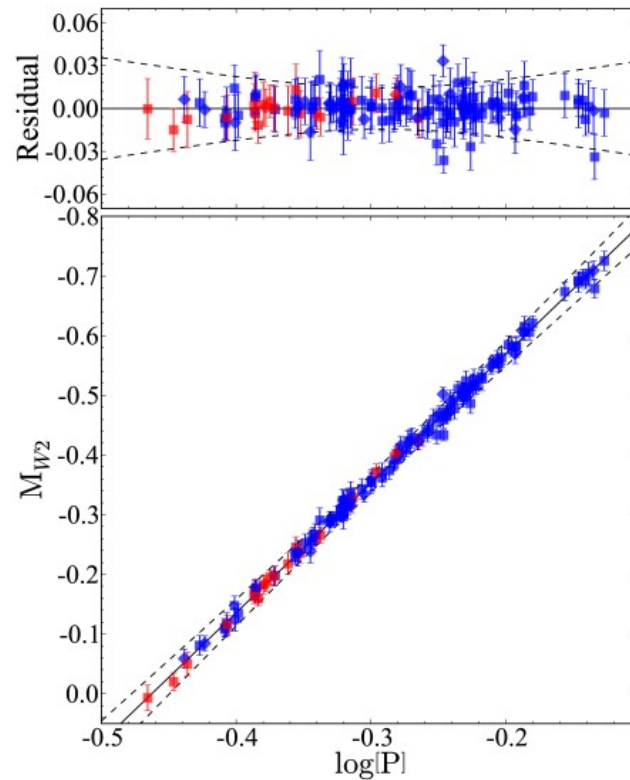
Vztah perioda-zářivý výkon

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

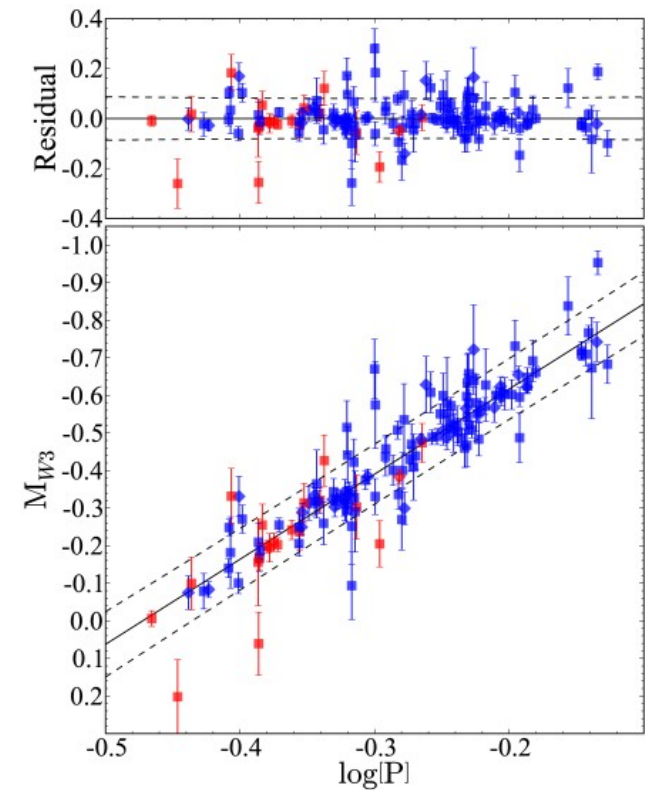
W1 Period-Luminosity Relation Fit



W2 Period-Luminosity Relation Fit

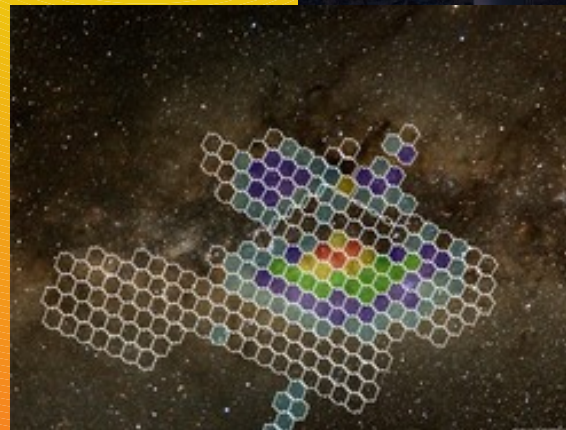
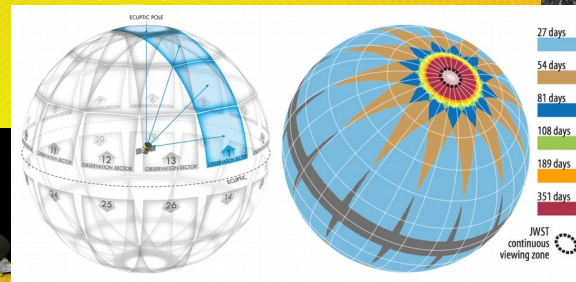
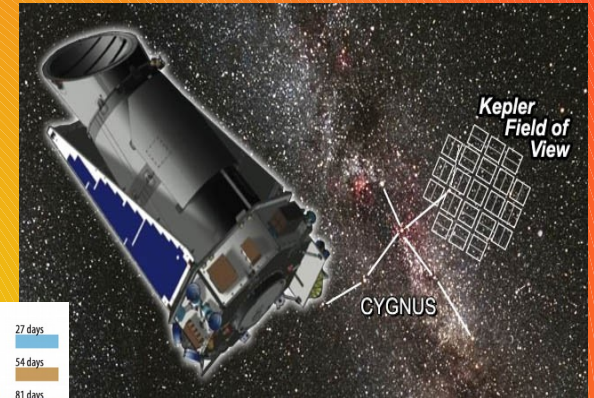


W3 Period-Luminosity Relation Fit



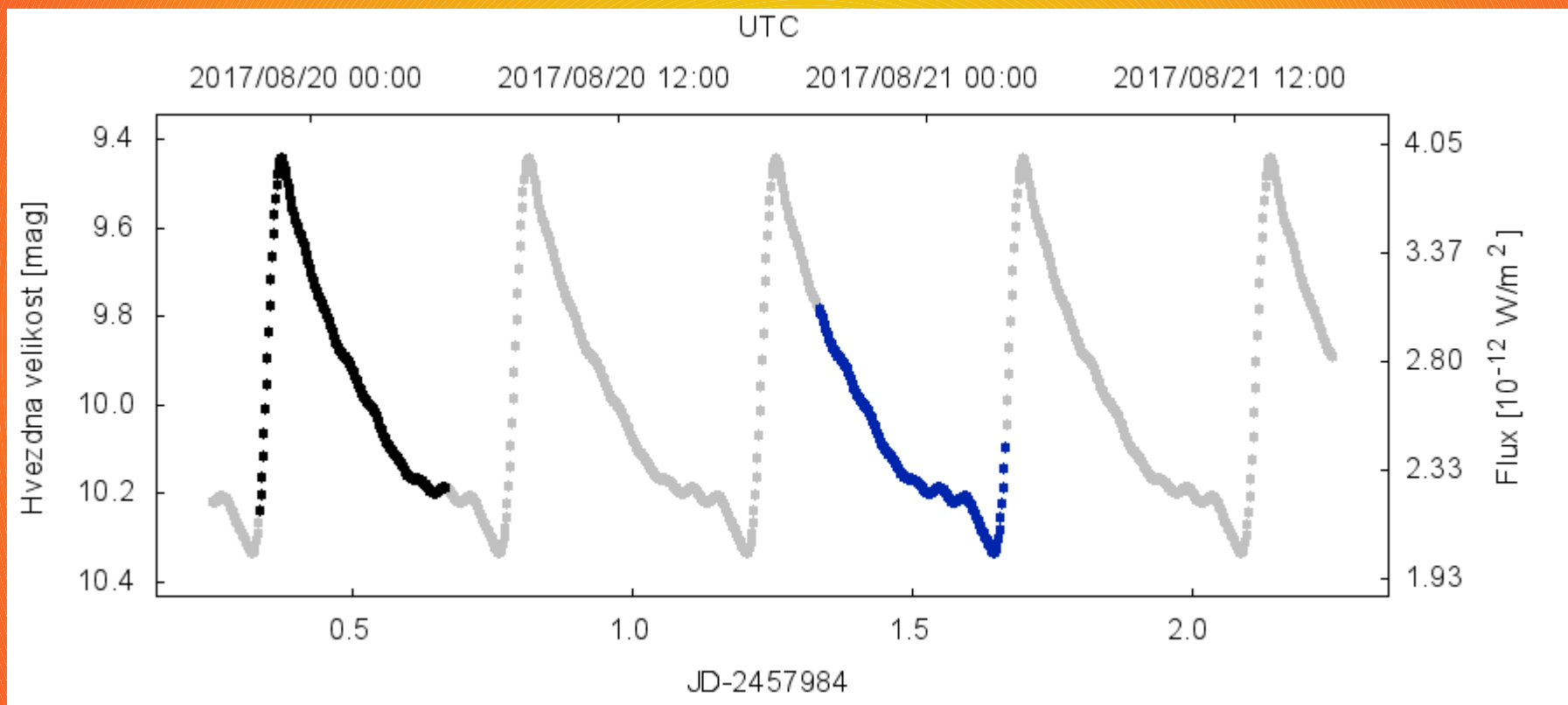
Jak pulzující hvězdy zkoumáme

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



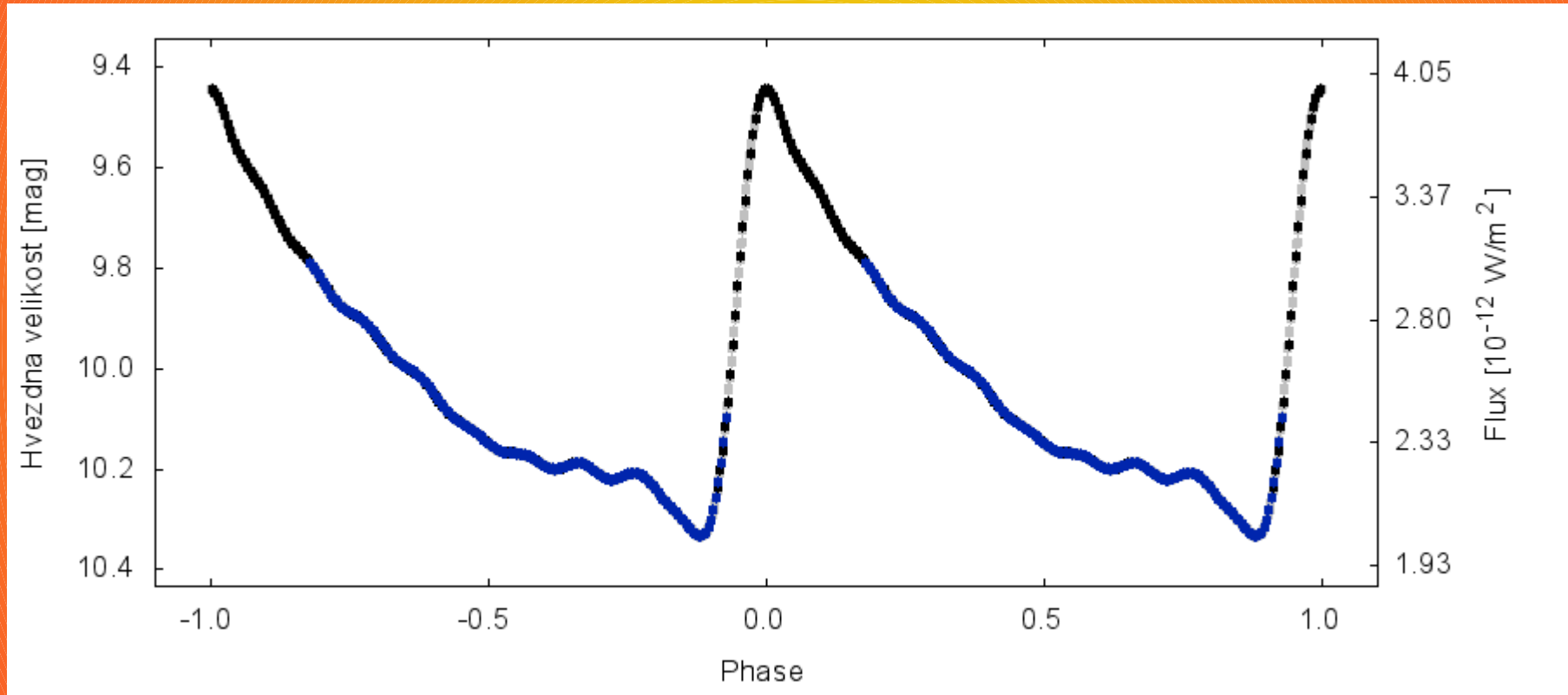
Jak pulzující hvězdy zkoumáme

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



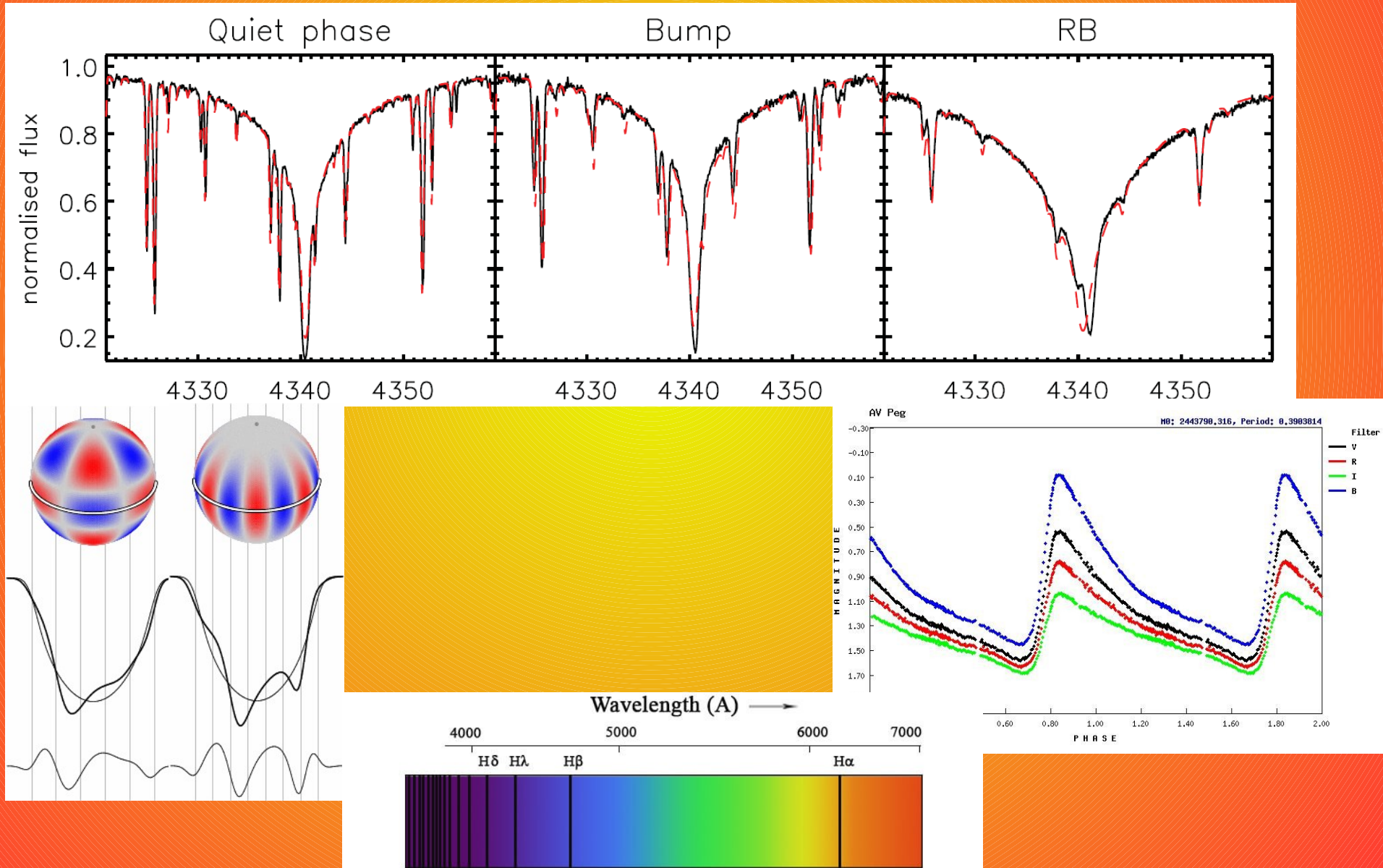
Jak pulzující hvězdy zkoumáme

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



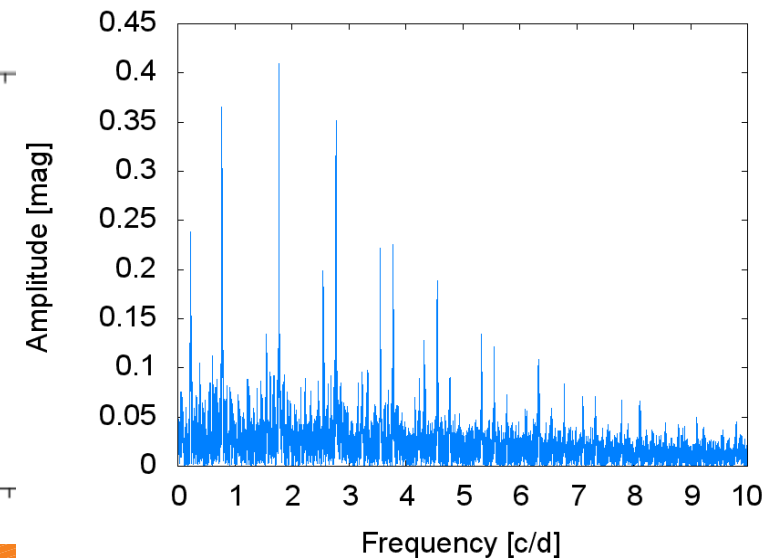
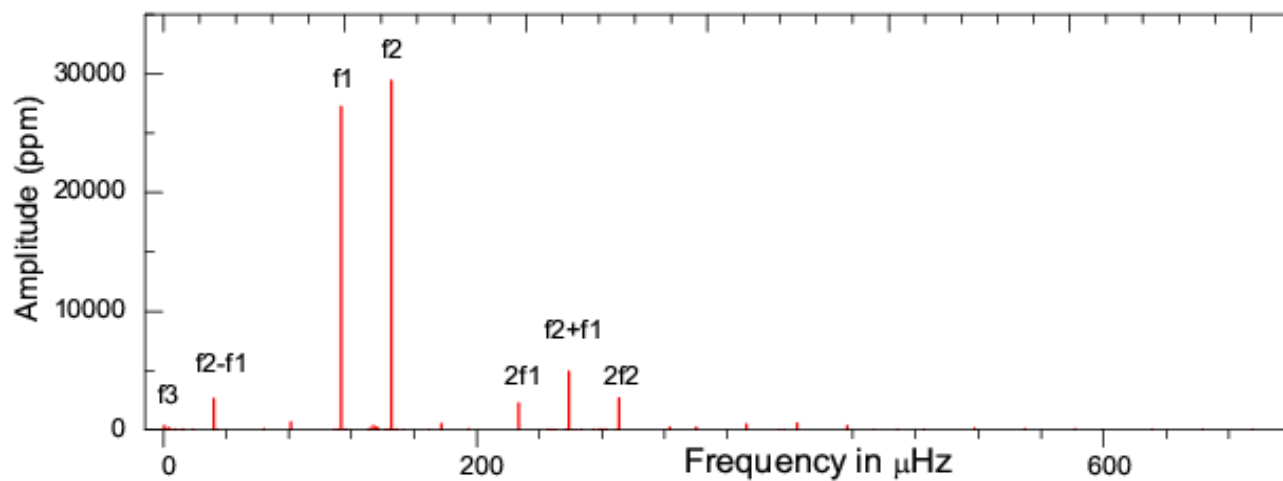
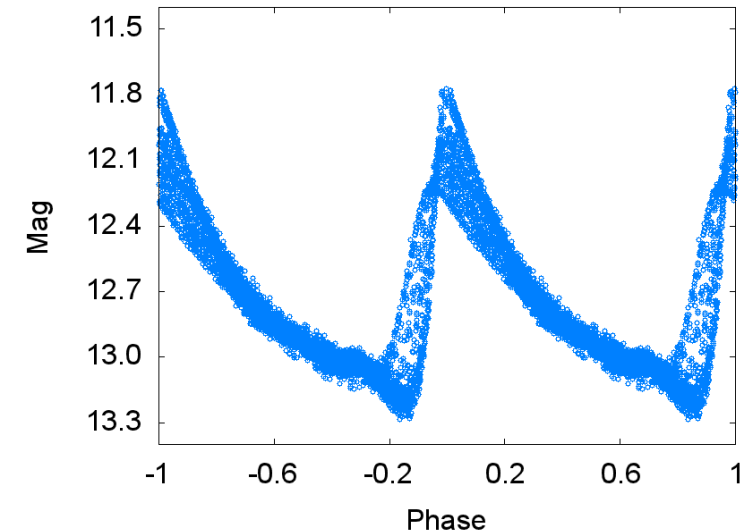
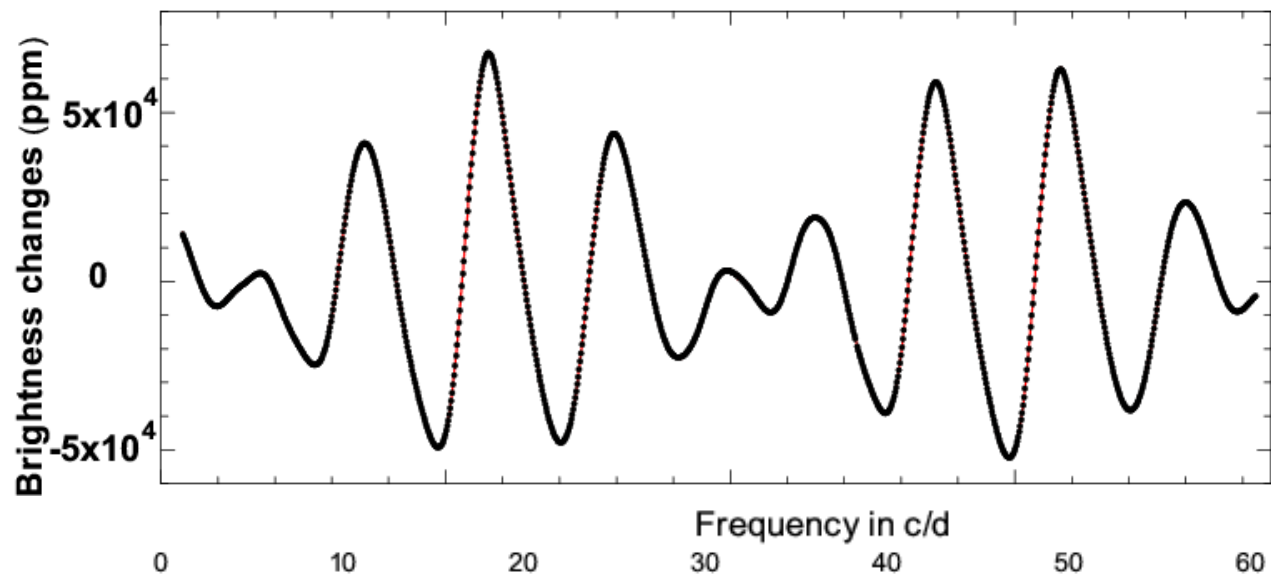
Jak pulzující hvězdy zkoumáme

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



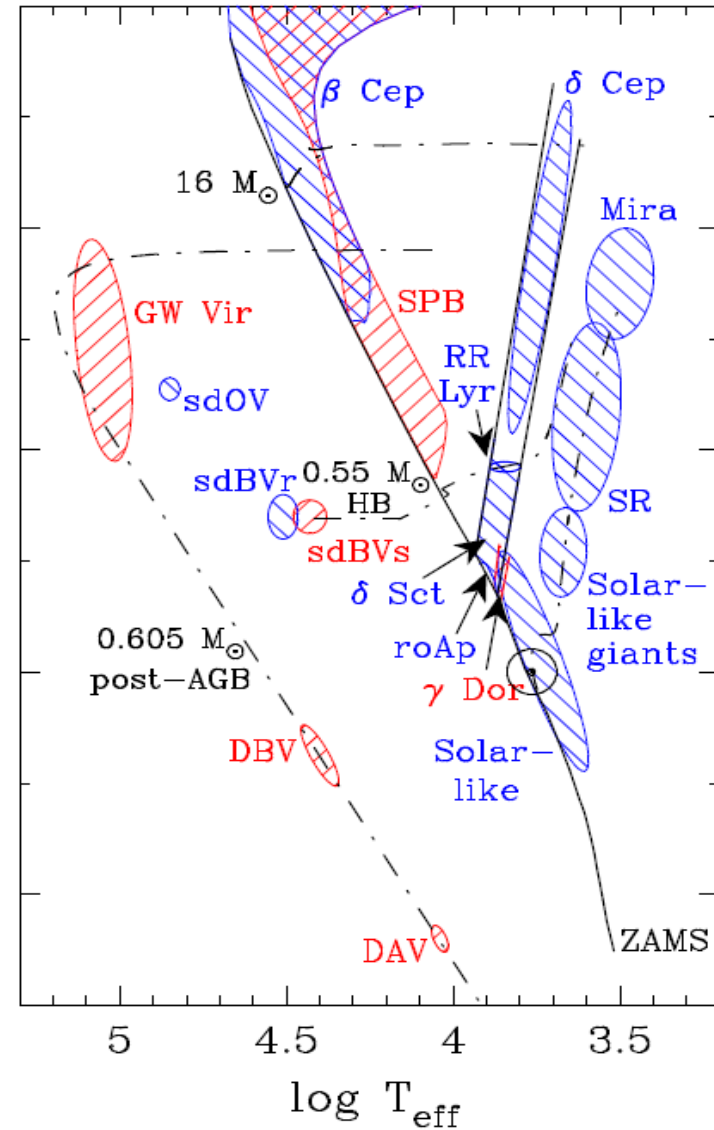
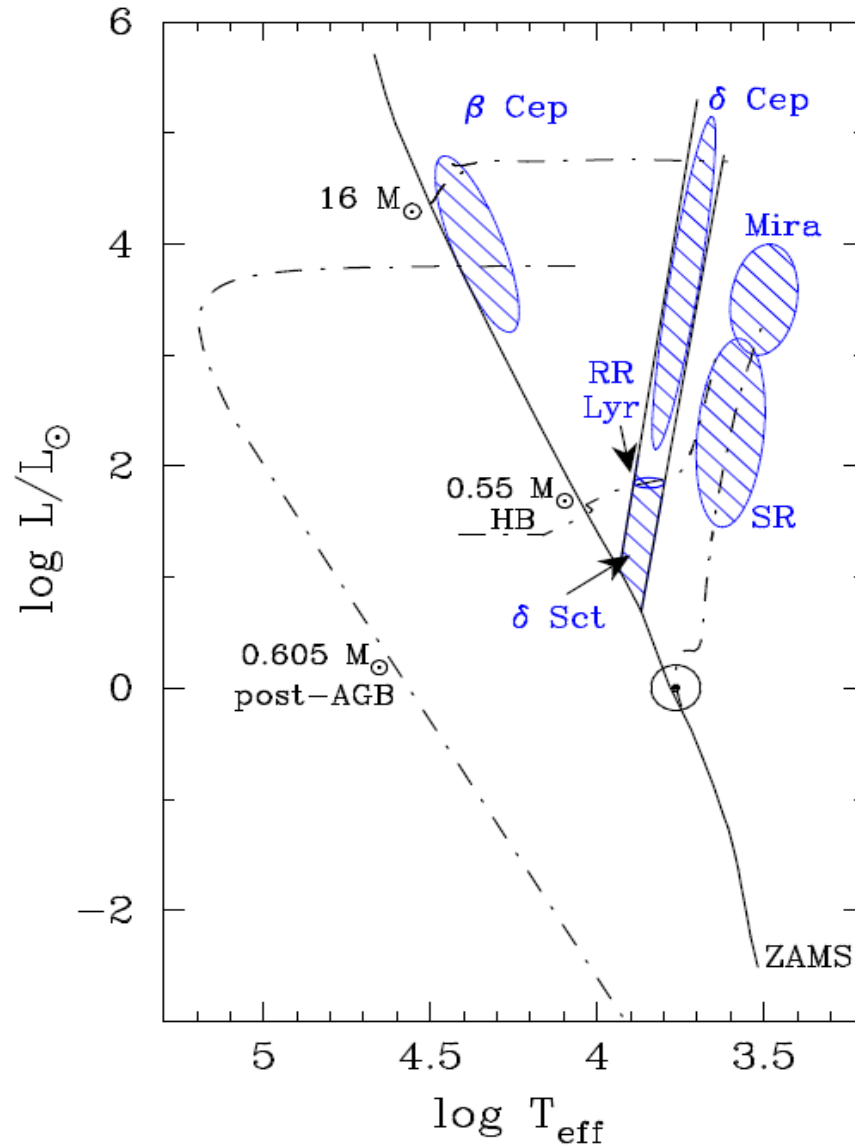
Jak pulzující hvězdy zkoumáme

- **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

Handler 2012, Asteroseismology, Springer-Verlag



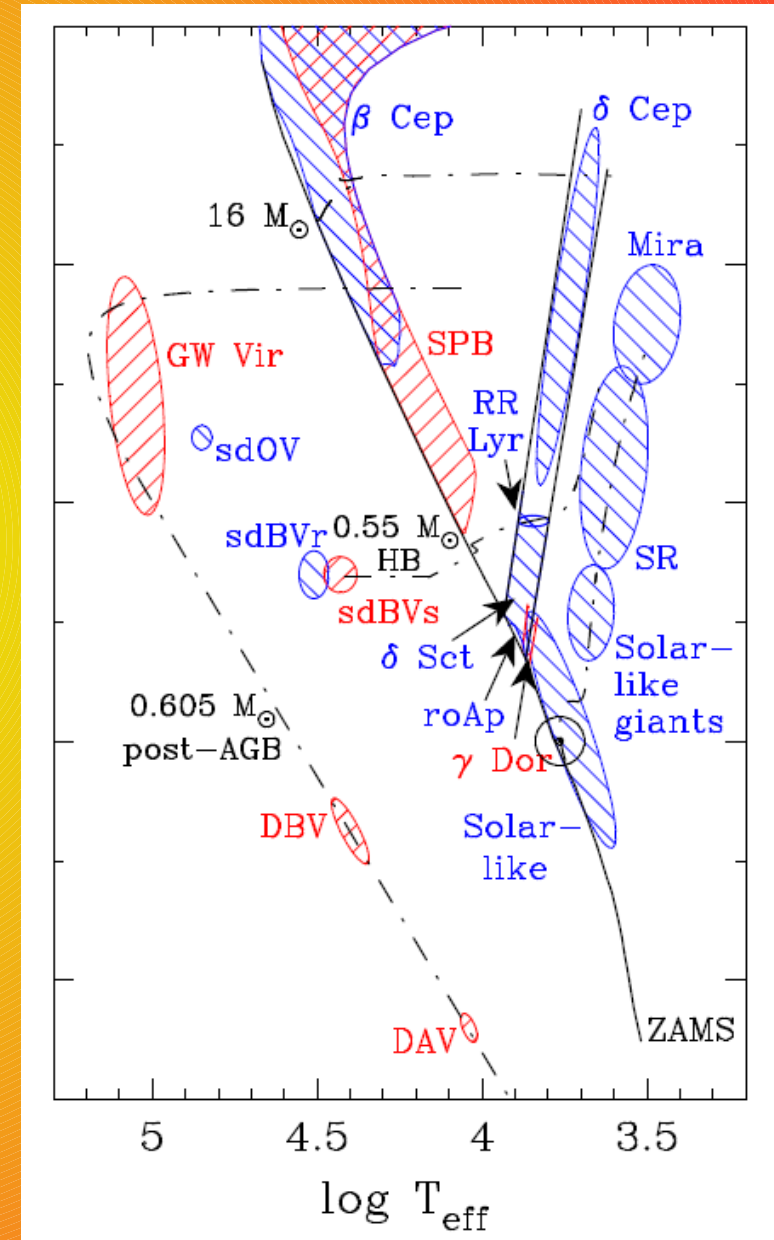
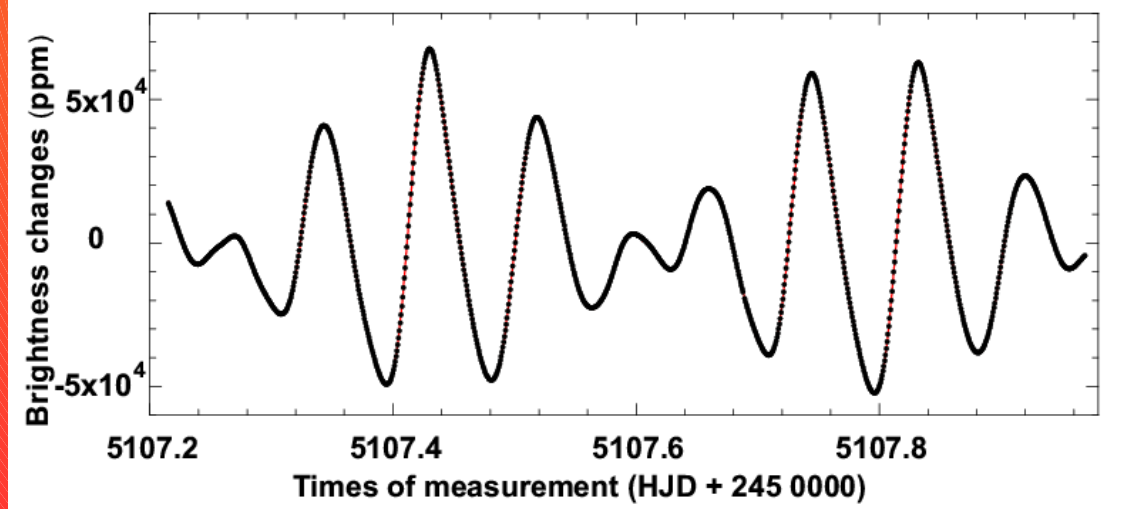
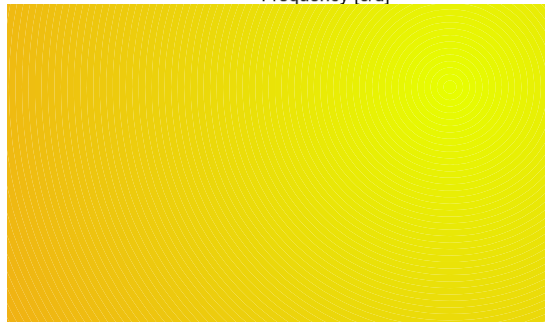
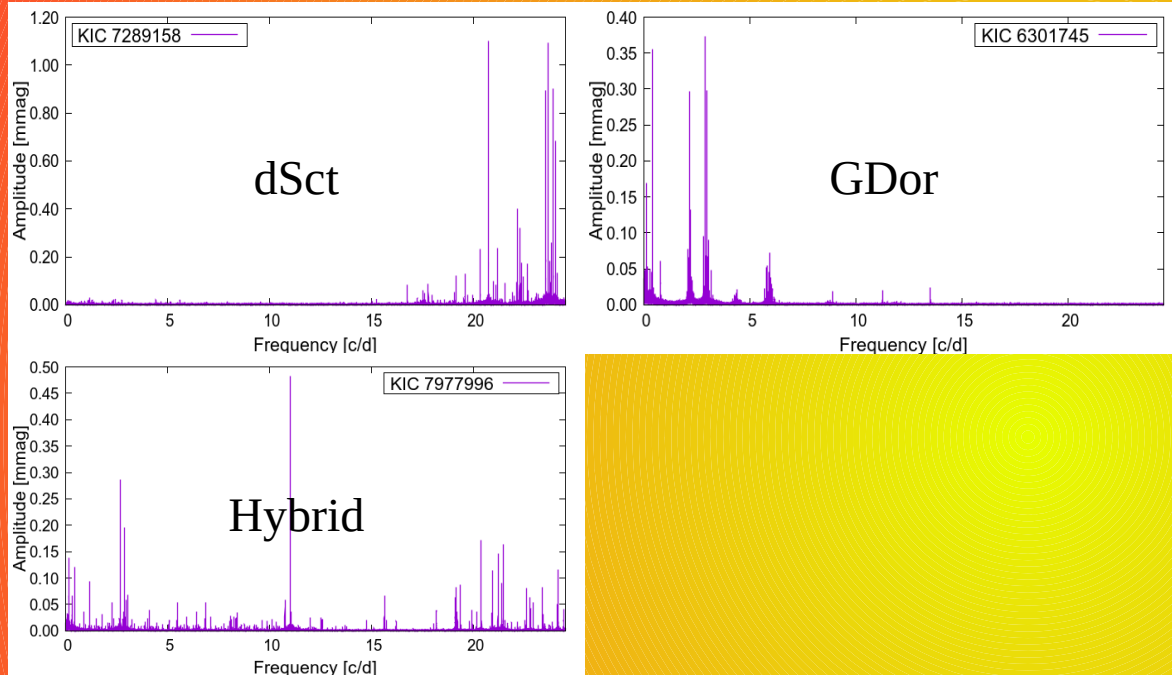
Typy pulzujících hvězd

<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> <i>p</i>	3 to 10 min few hrs to few days	< 8 ppm few 10 ppm
γ Dor	slowly pulsating F	<i>g</i>	0.3 to 3 d	< 50 mmag
δ 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
β Cep	β CMa, ζ Oph 53 per	<i>p&g</i>	2 to 8 h(<i>p</i>) few days(<i>g</i>)	< 0.1 mag < 0.01 mag
pulsating Be	λ Eri,SPBe	<i>p&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	$l = 0$ $l = 0$ $l = 0$	> 80 d > 80d < 80d	< 8 mag < 1 mag < 1 mag

Joshi&Joshi 2015,
ApA, 36, 33

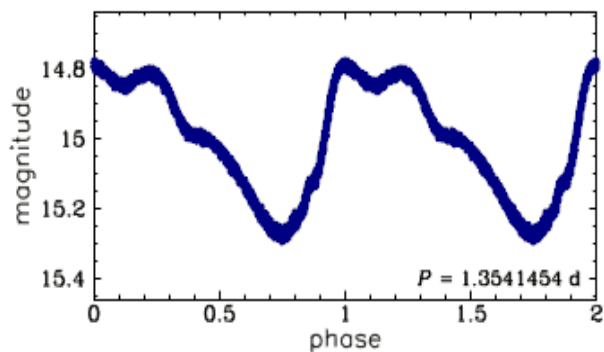
Typy pulzujících hvězd

- Hvězdy hlavní posloupnosti
- Periody 0.01-5 dní, hmotnosti 1.2-2.5 Ms

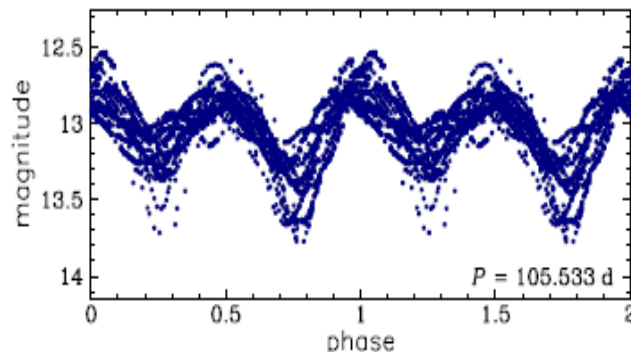


Typy pulzujících hvězd

BL Her

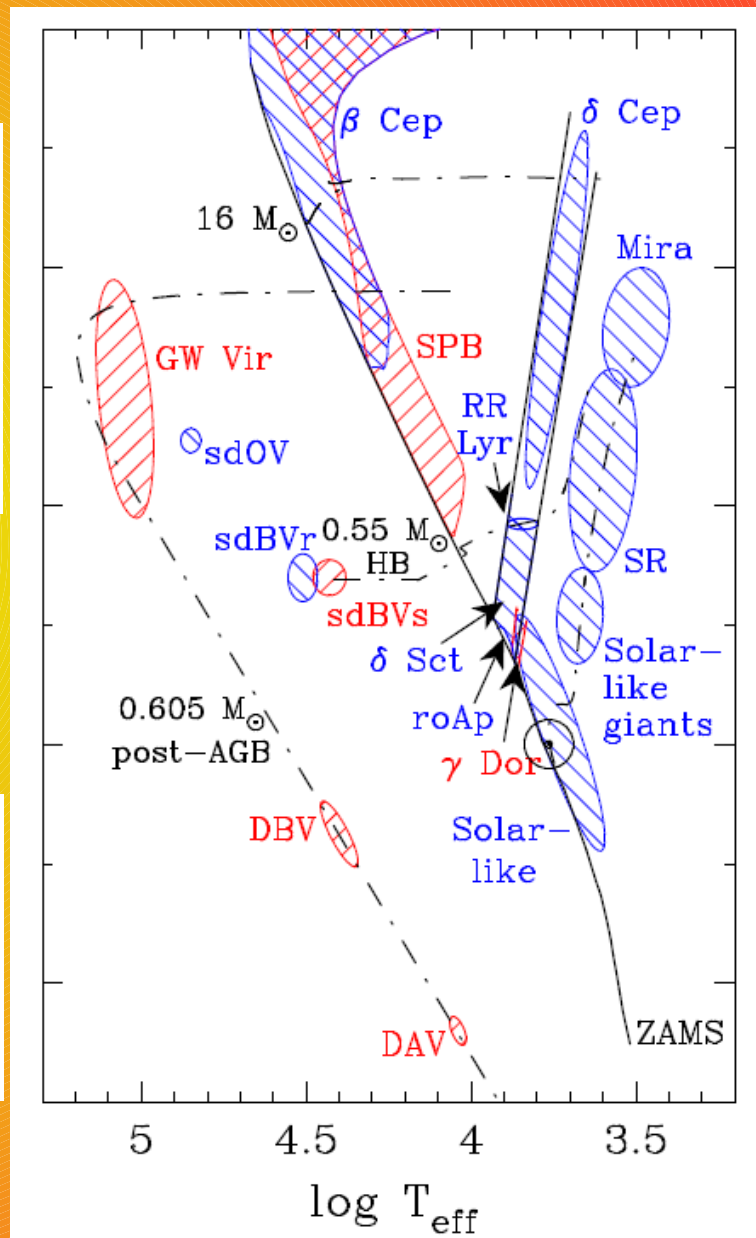
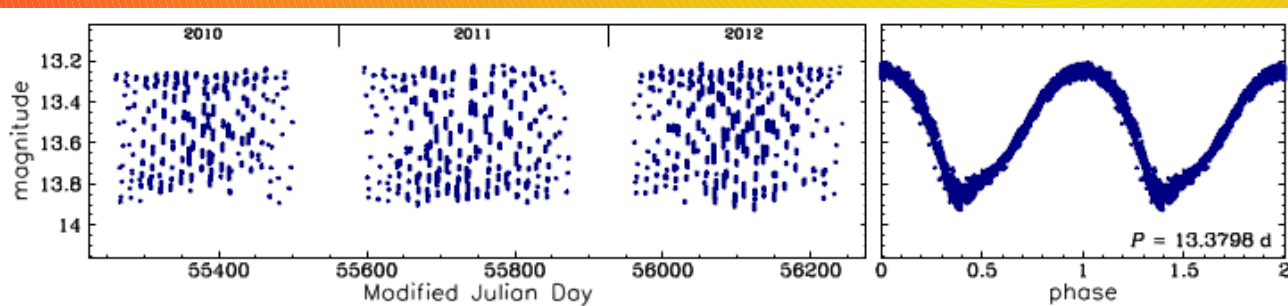


RV Tau

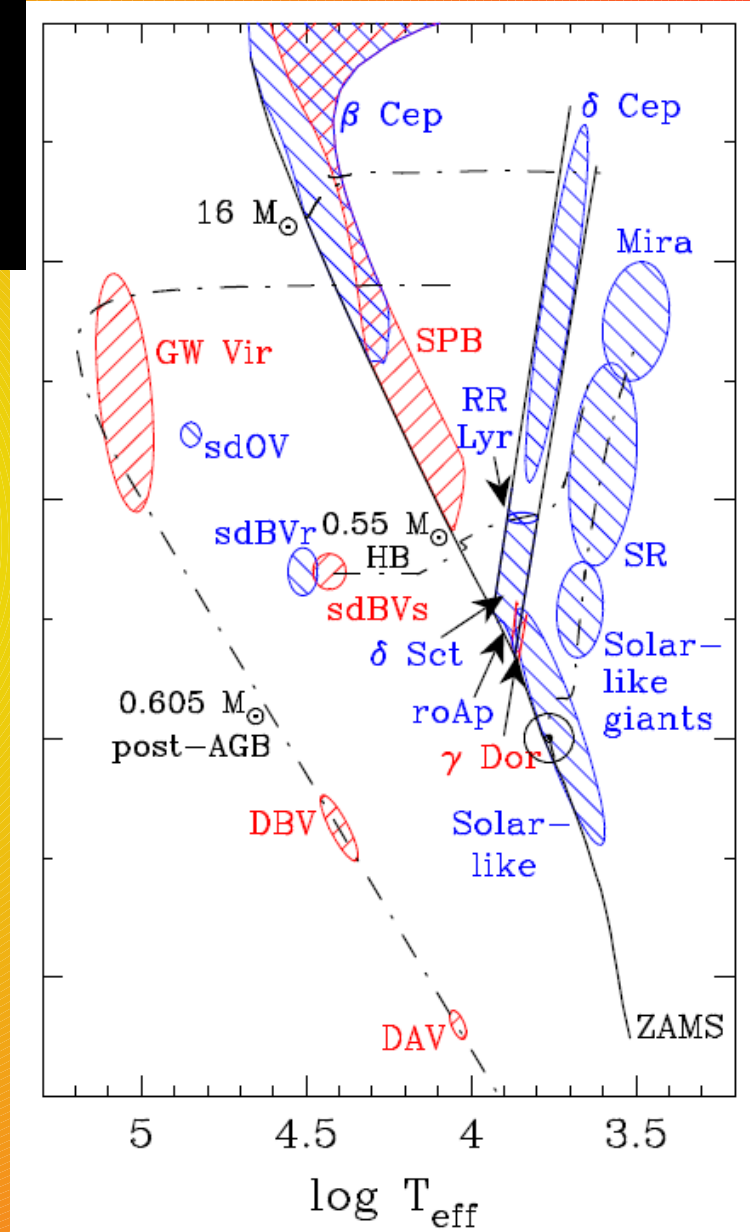
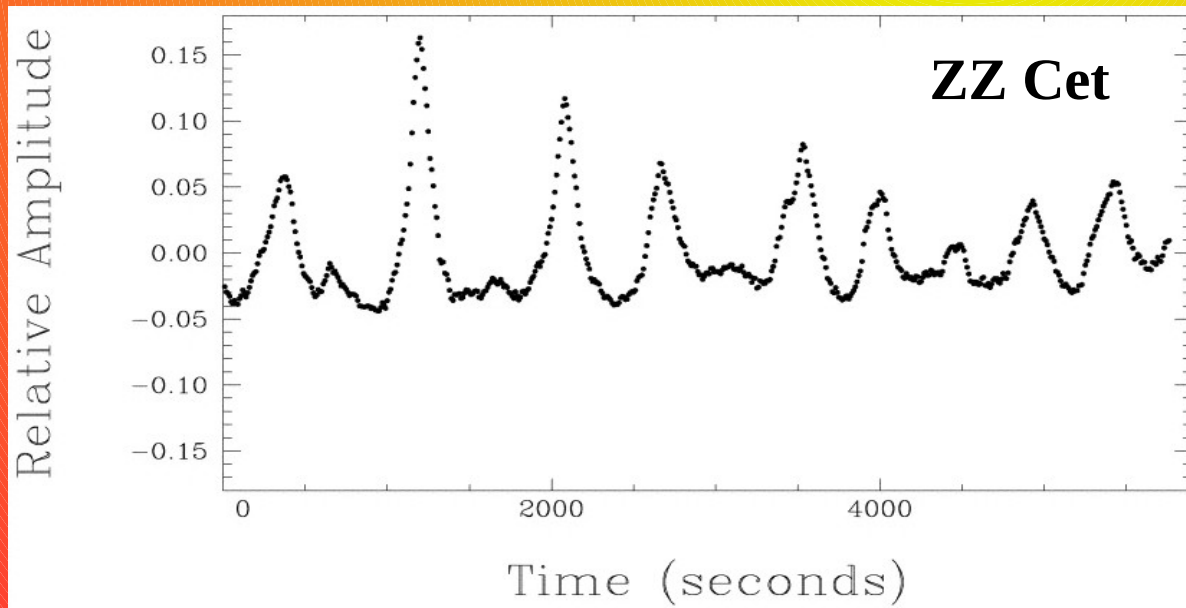
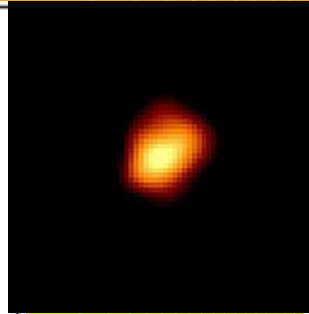
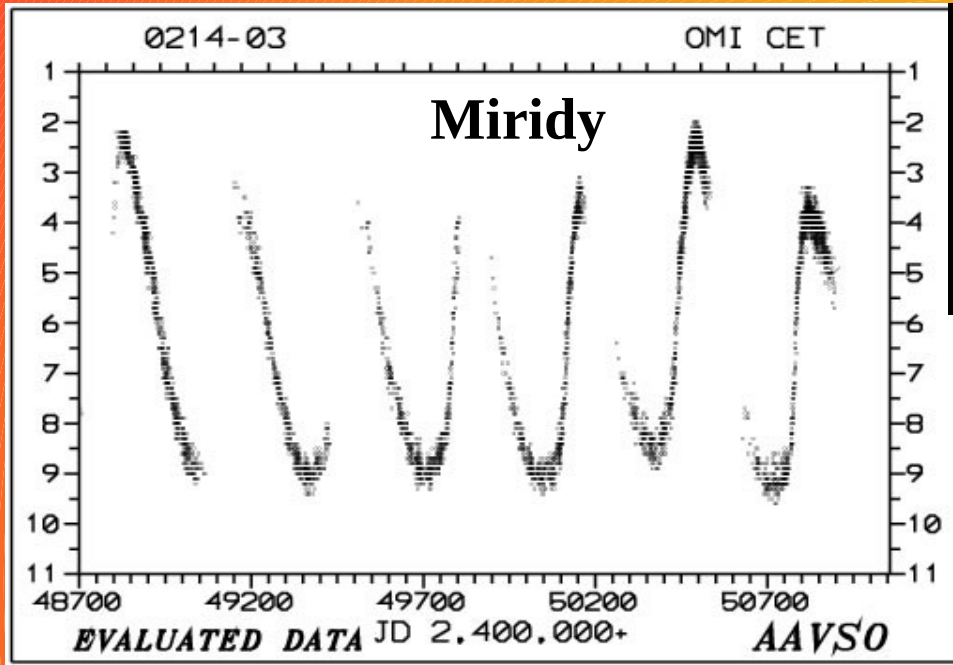


http://ogle.astrouw.edu.pl/atlas/RR_Lyr.html

W Vir

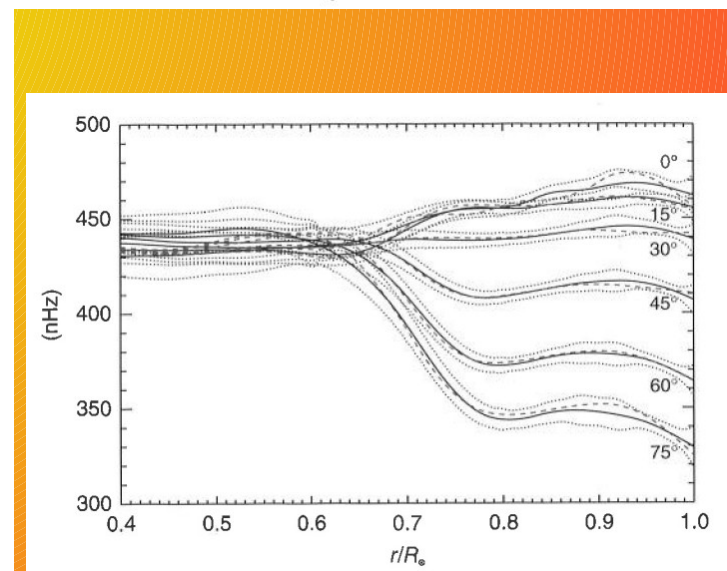
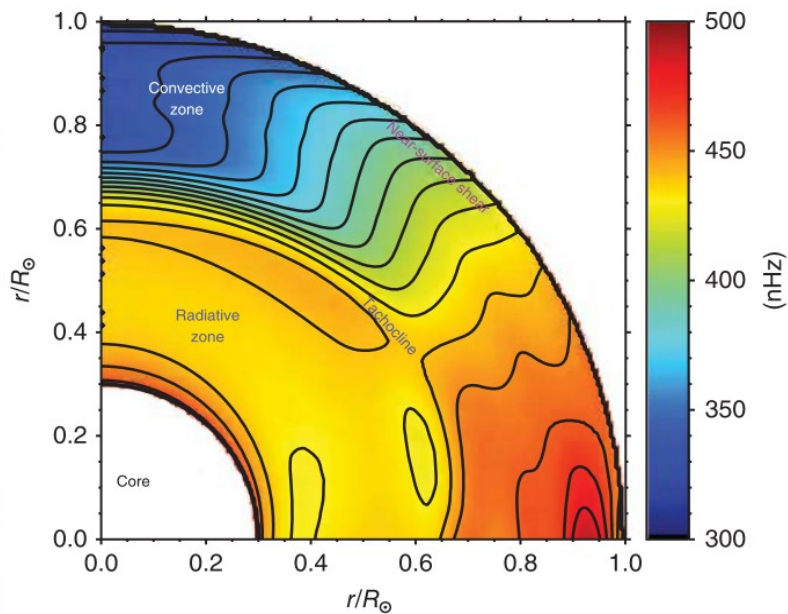
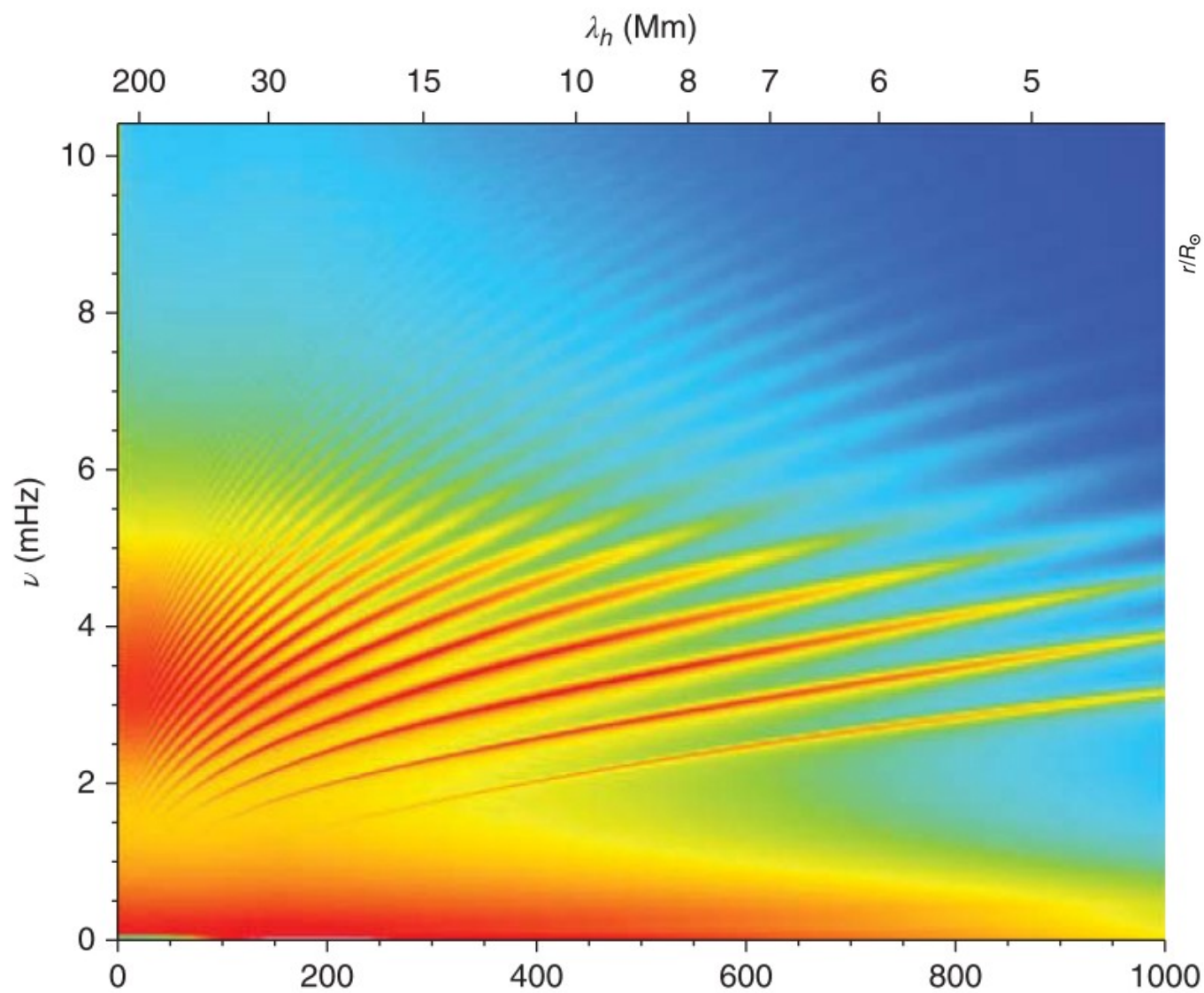


Typy pulzujících hvězd



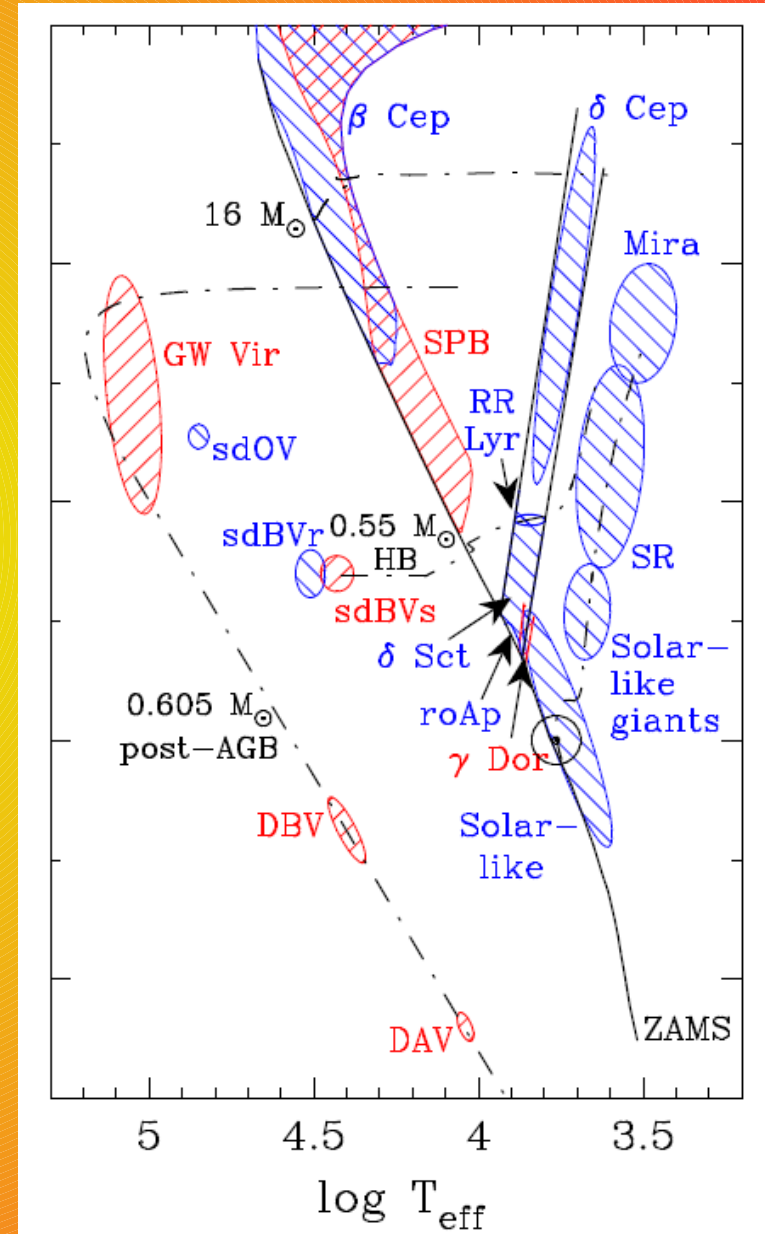
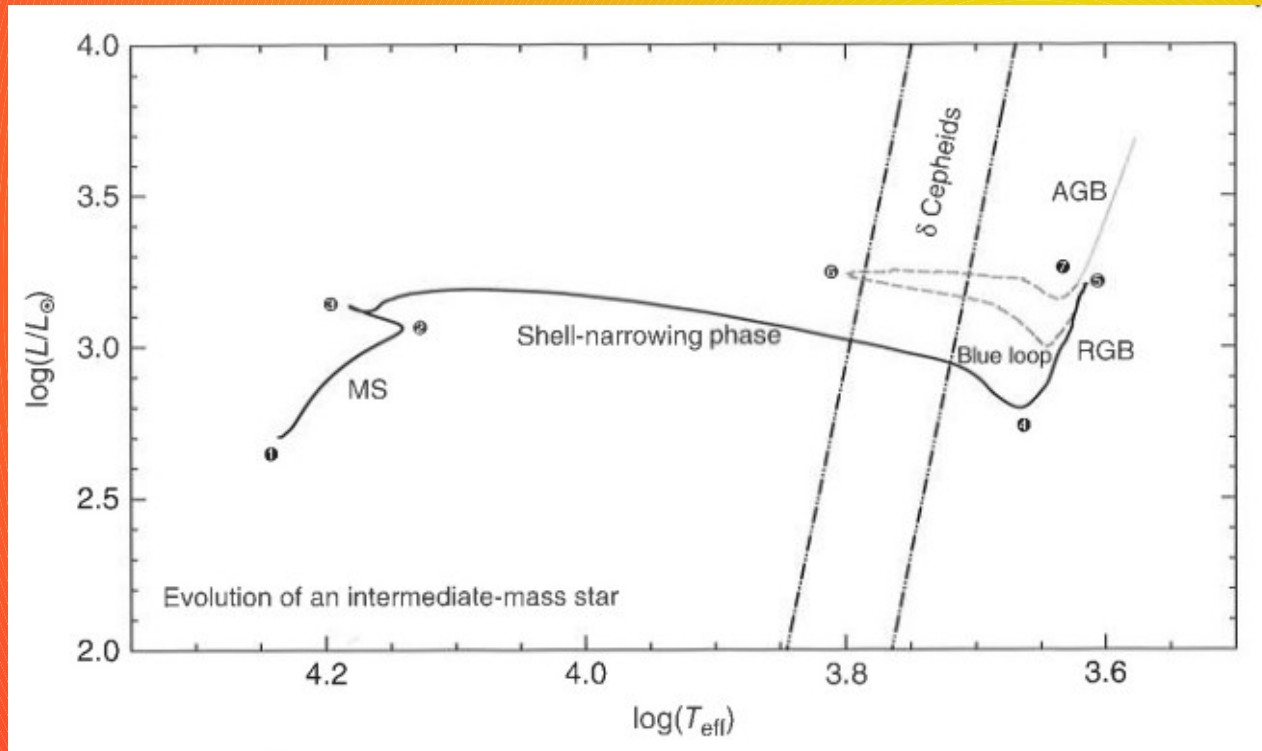
Sluneční oscilace

- 5-min oscilace, >10 miliónů módů



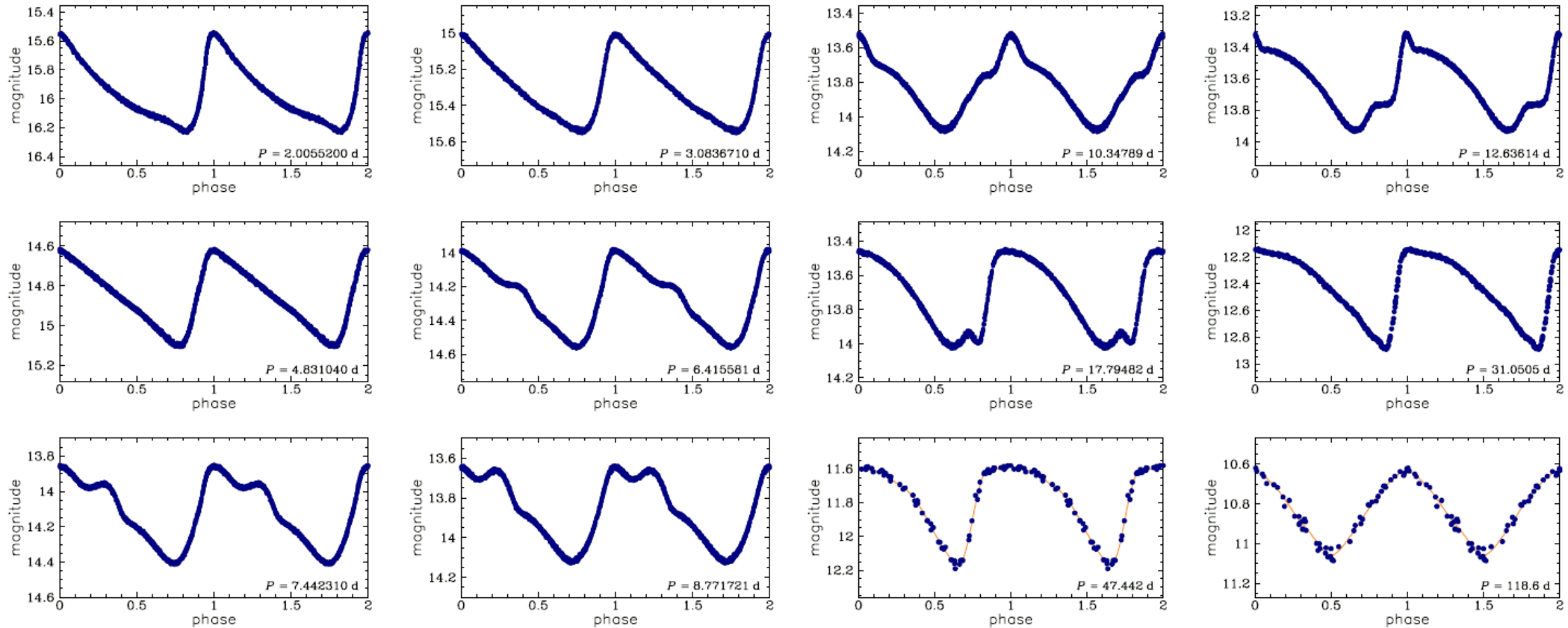
Cefeidy

- Radiálně pulzující mladé hvězdy (do 0.1 mld let) v pokročilém stadiu vývoje
- Periody 1-130 d, hmotnosti 5-20 hmotností Slunce
- Standardní svíčky



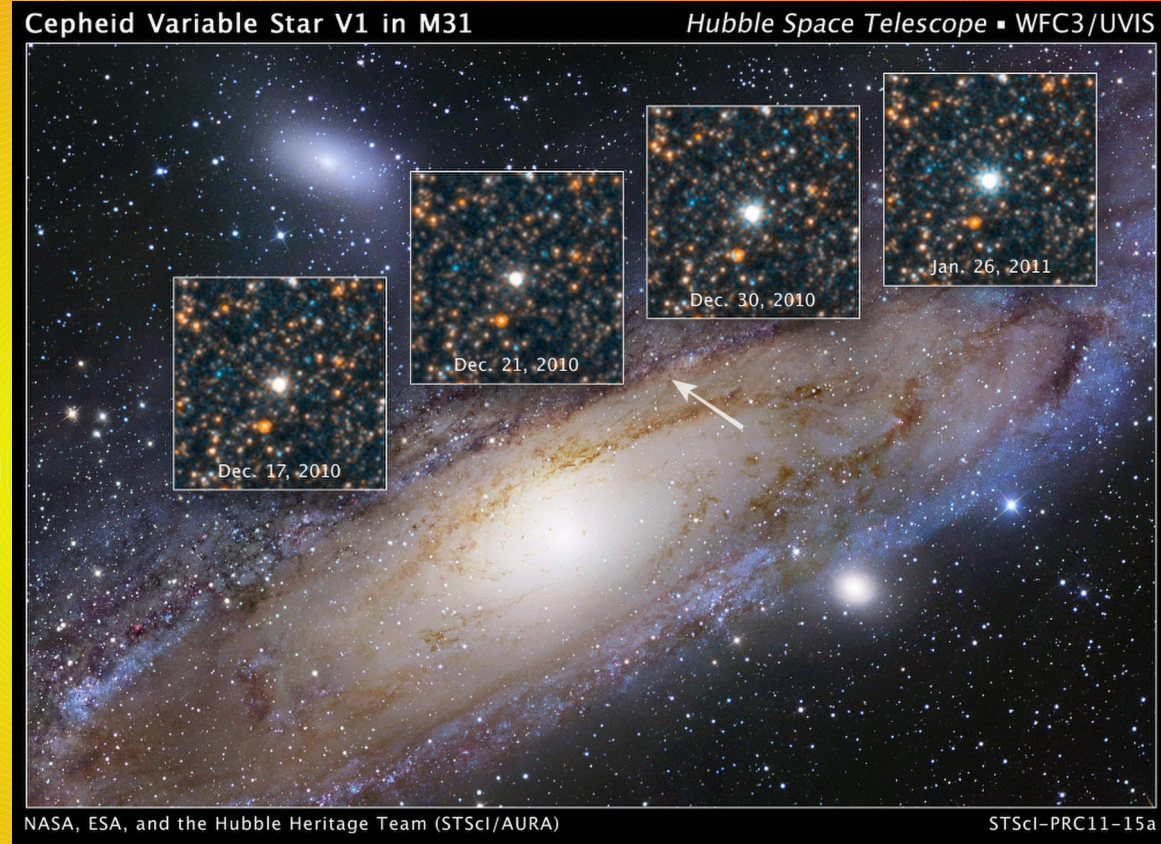
Cefeidy

- Radiálně pulzující mladé hvězdy (do 0.1 mld let) v pokročilém stadiu vývoje
- Periody 1-130 d, hmotnosti 5-20 hmotností Slunce
- Standardní svíčky

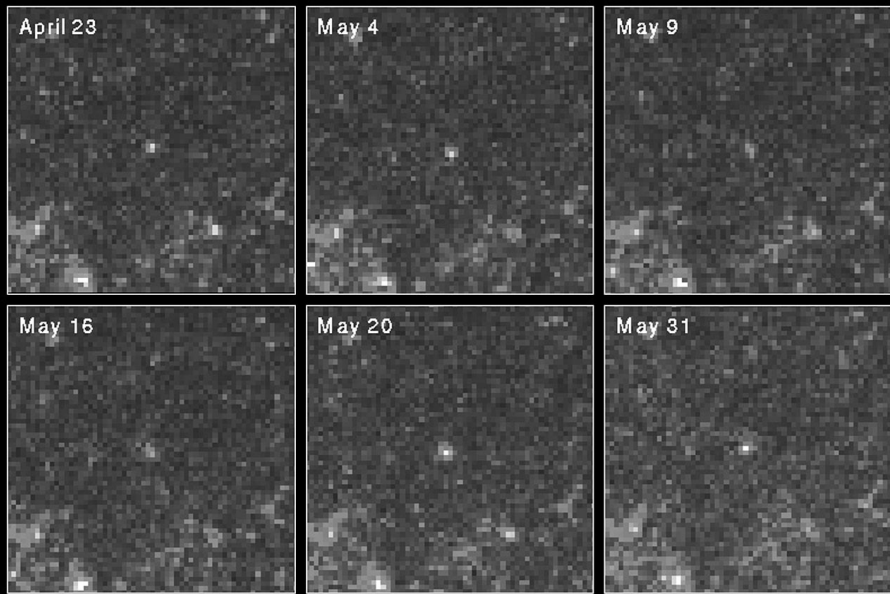


Cefeidy

- Radiálně pulzující mladé hvězdy (do 0.1 mld let) v pokročilém stadiu vývoje
- Periody 1-130 d, hmotnosti 5-20 hmotností Slunce
- Standardní svíčky

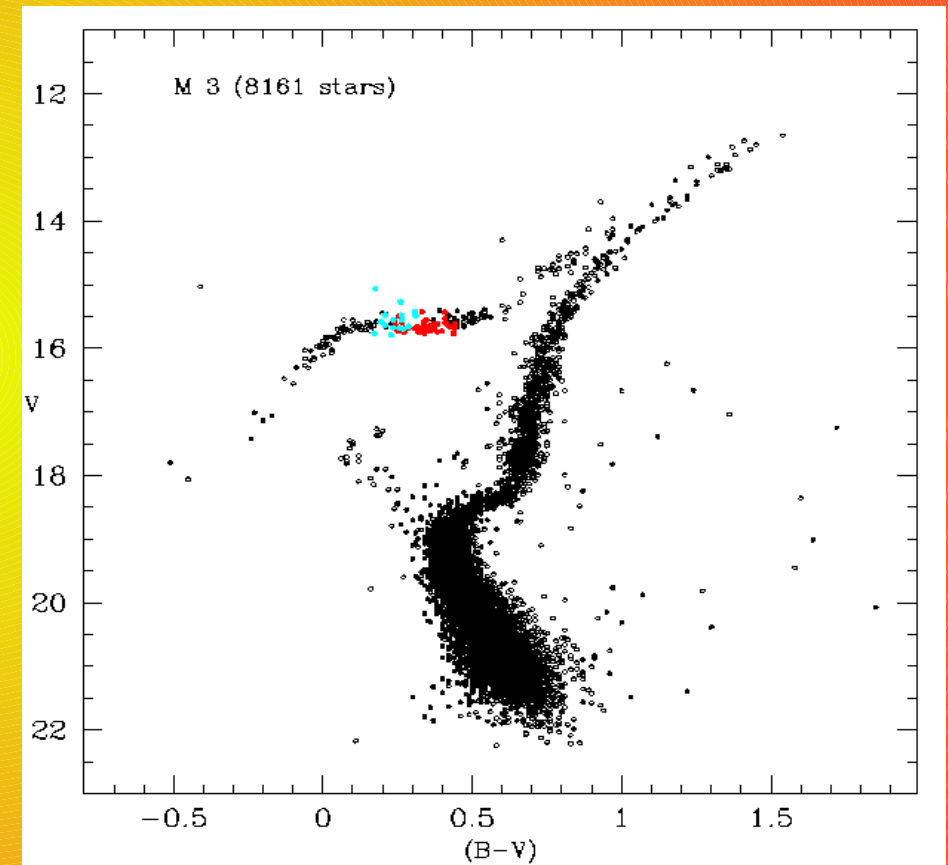
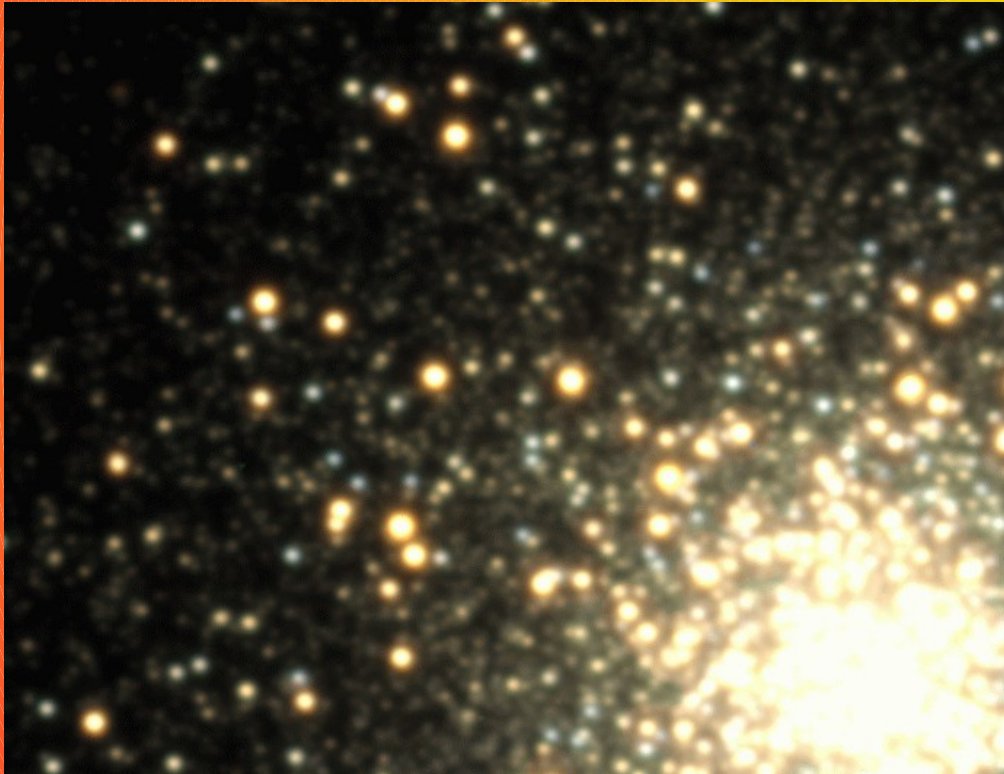


Cepheid Variable Star in Galaxy M100 HST-WFPC2



RR Lyrae

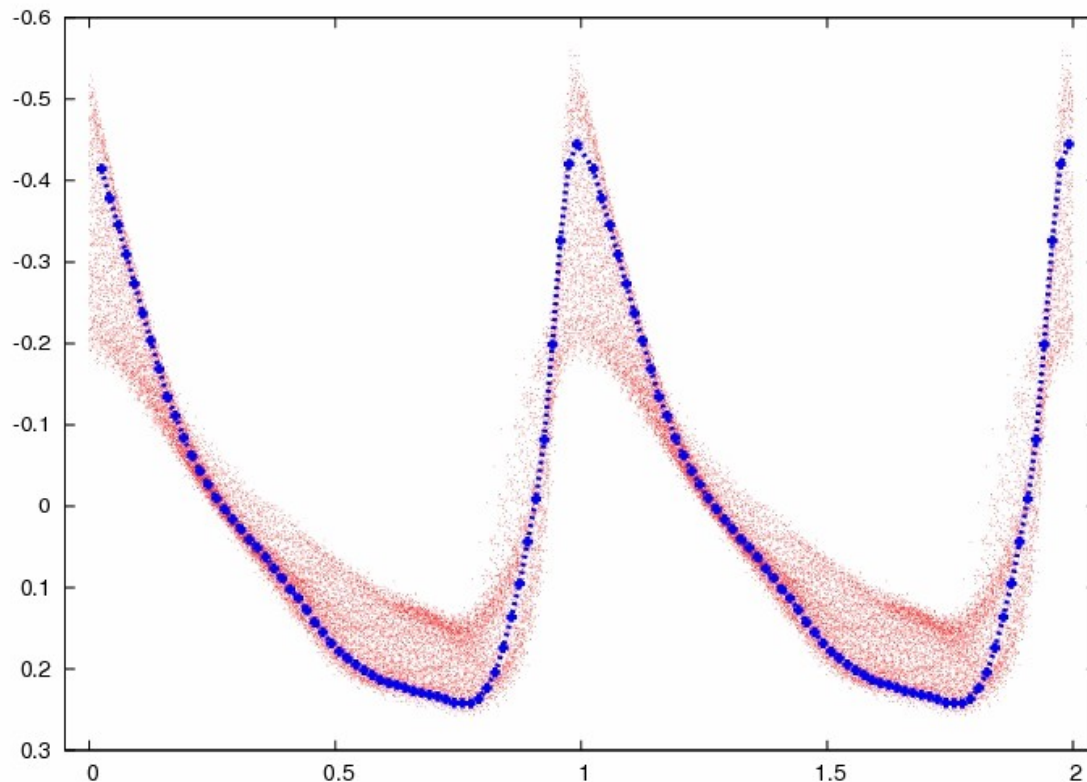
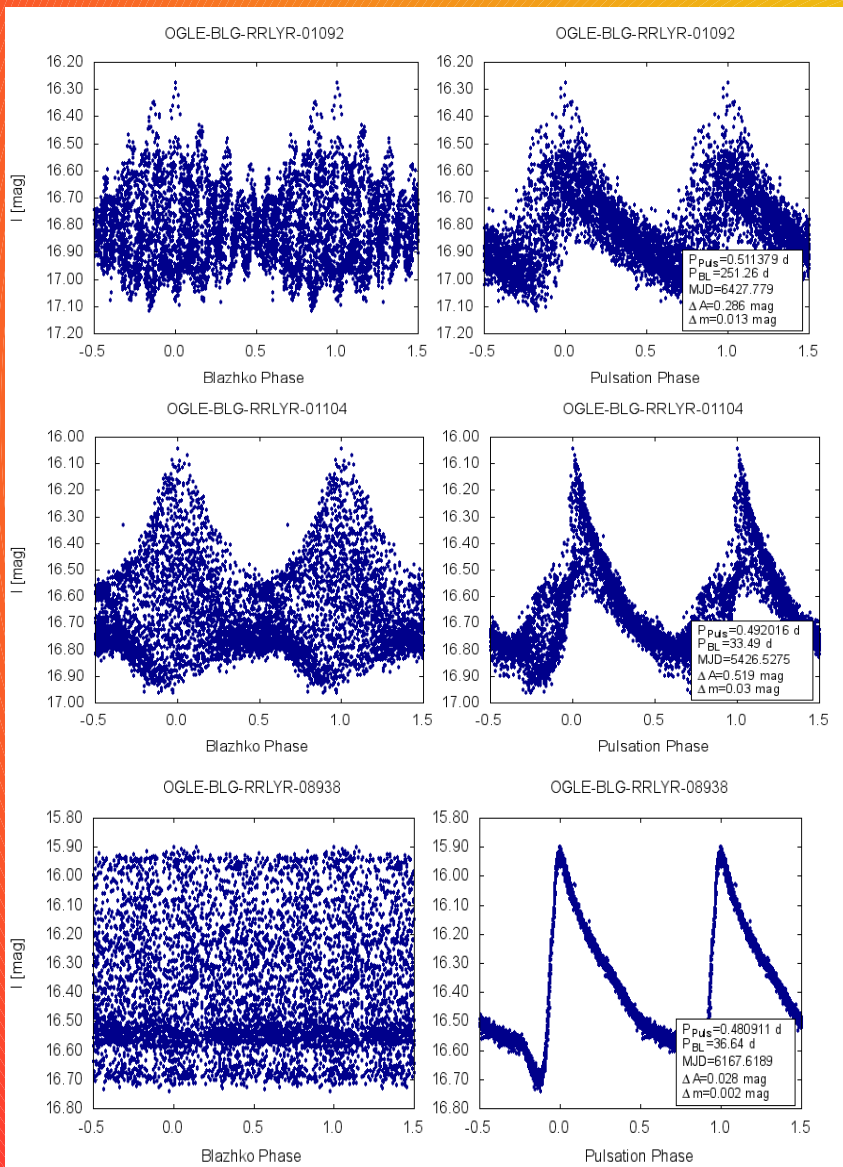
- (Ne)radiálně pulzující staré hvězdy (>9 mld let) horizontální větve obrů
- Periody 0.2-1 den, hmotnosti <0.8 Ms



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](#)

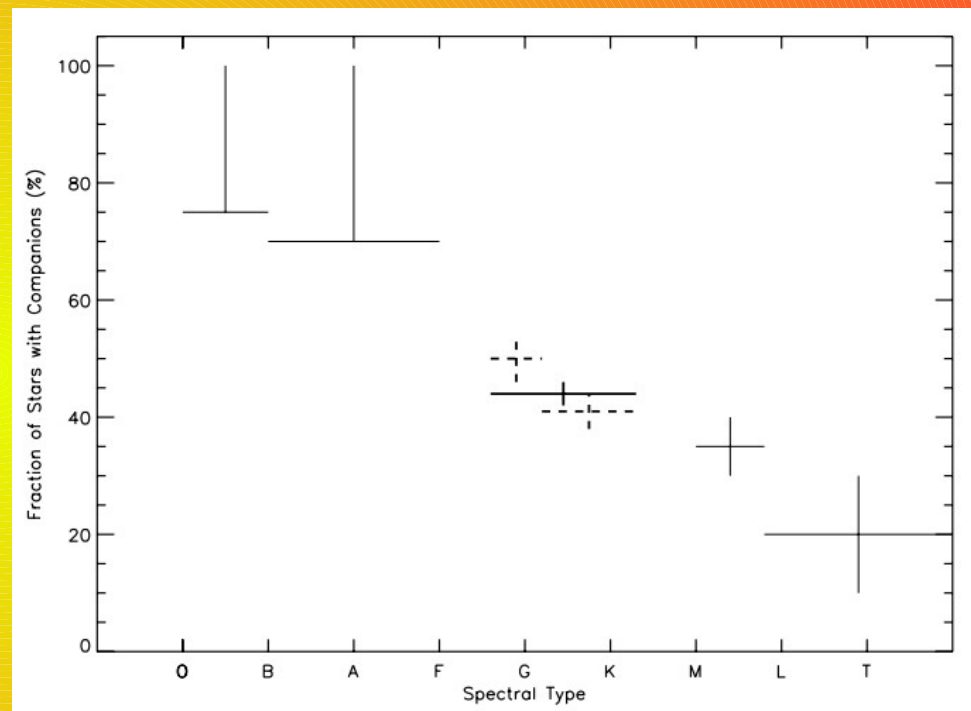
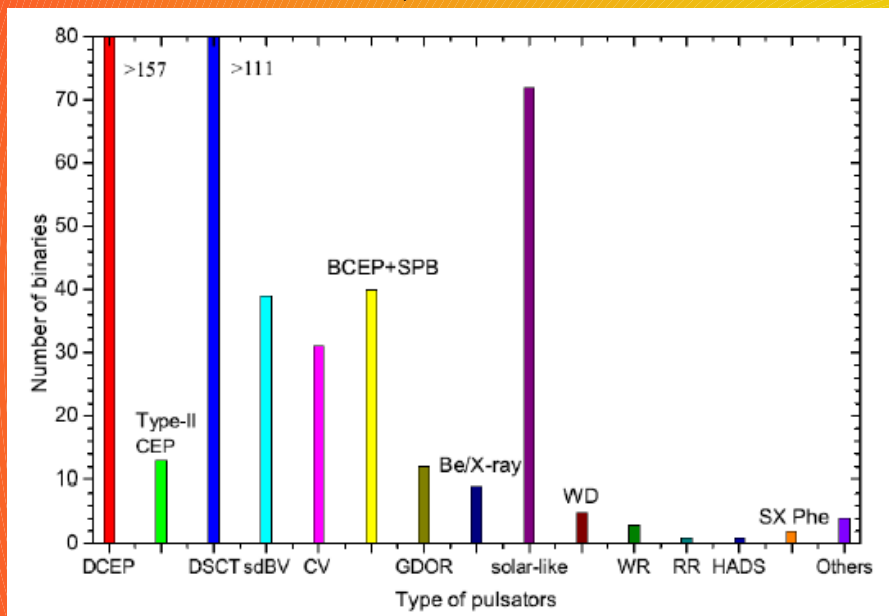


RR Lyrae

- (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)
- Nejsou známy dvojhvězdy

Raghavan et al. 2010, ApJSS, 190, 1

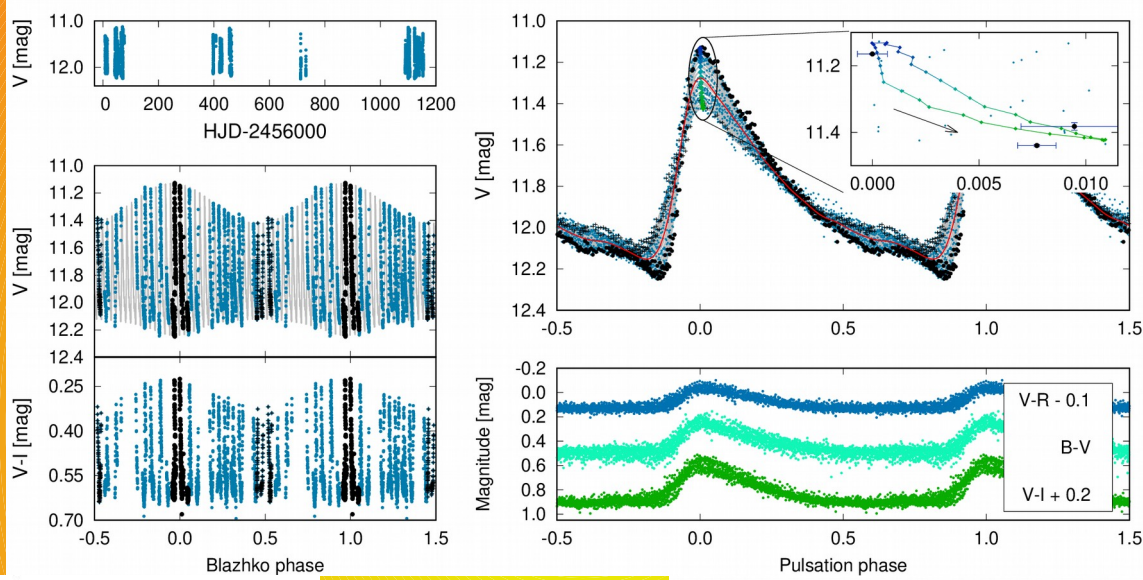
Zhou 2014, arXiv:1002.2729v5



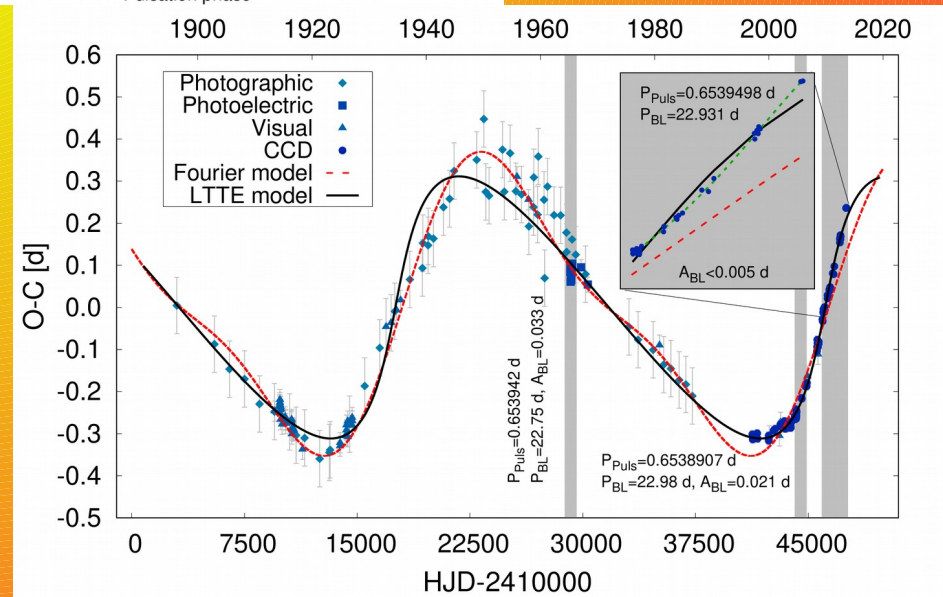
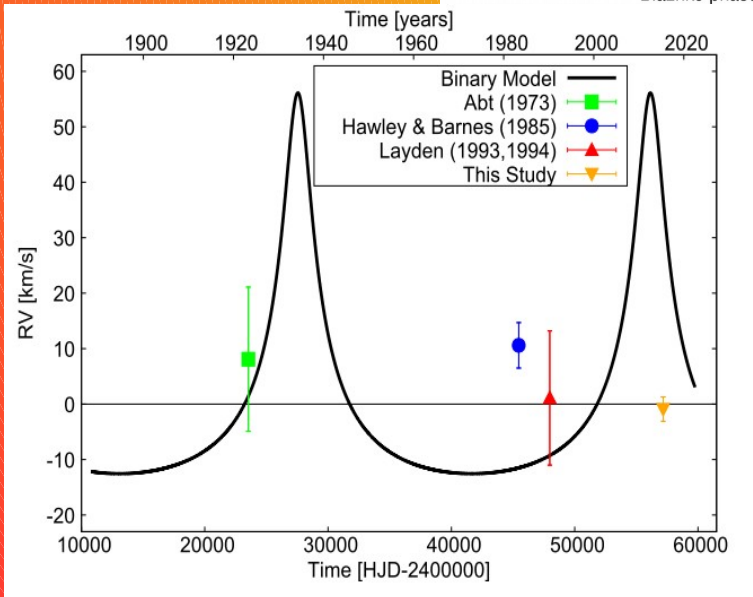
**Hmotnosti, poloměry a svítivosti známe
pouze nepřímo!!!**

RR Lyrae – spolupráce s amatéry

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

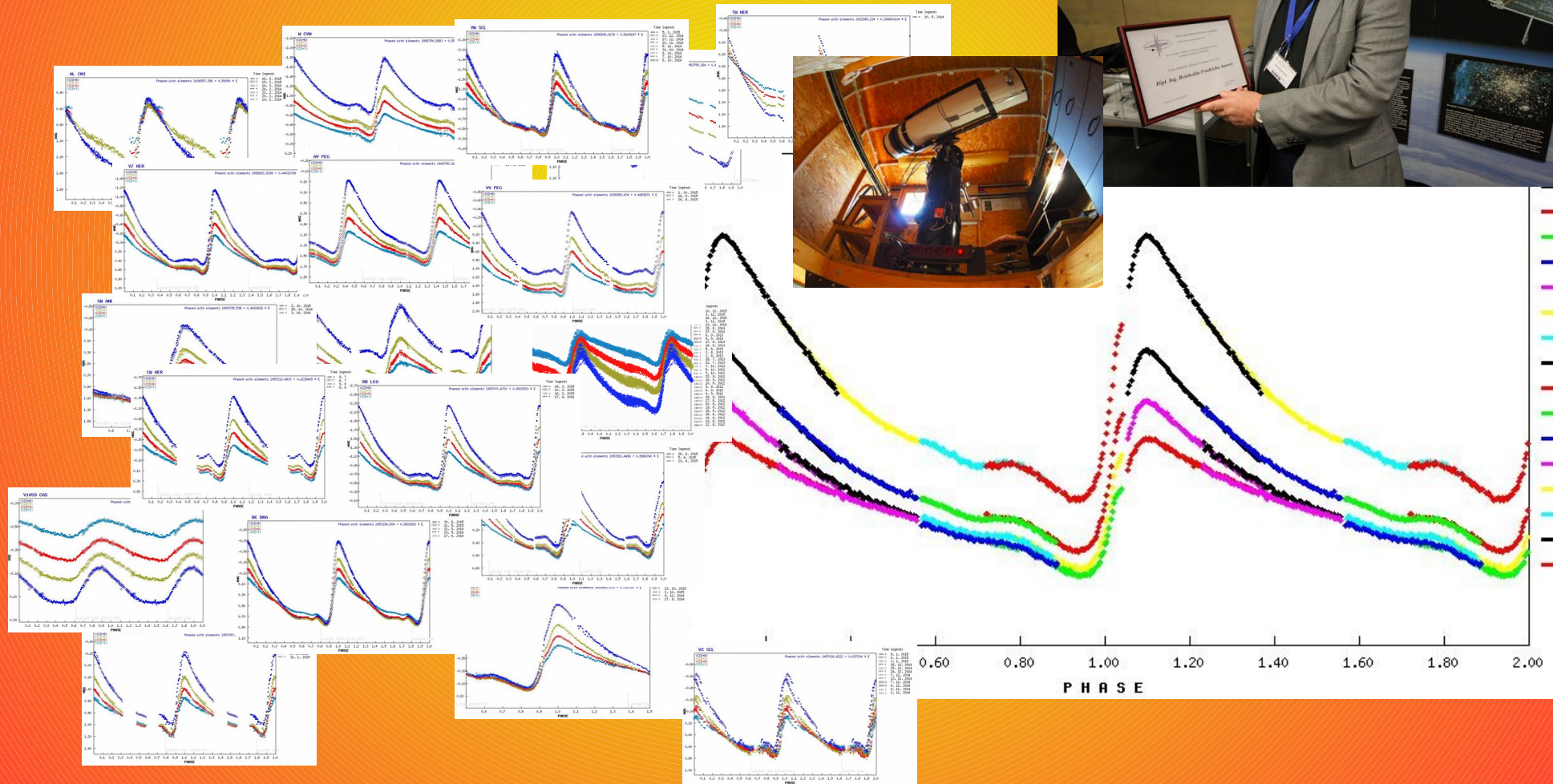


Skarka et al. 2018, MNRAS, 474, 824



RR Lyrae – spolupráce s amatéry

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



Děkuji za pozornost

Dotazy, komentáře?