

Pulzáló változócsillagok és megfigyelésük I.

1. Bevezetés

Bognár Zsófia
Sódor Ádám

ELTE – MTA CSFK CSI
2017.10.10.



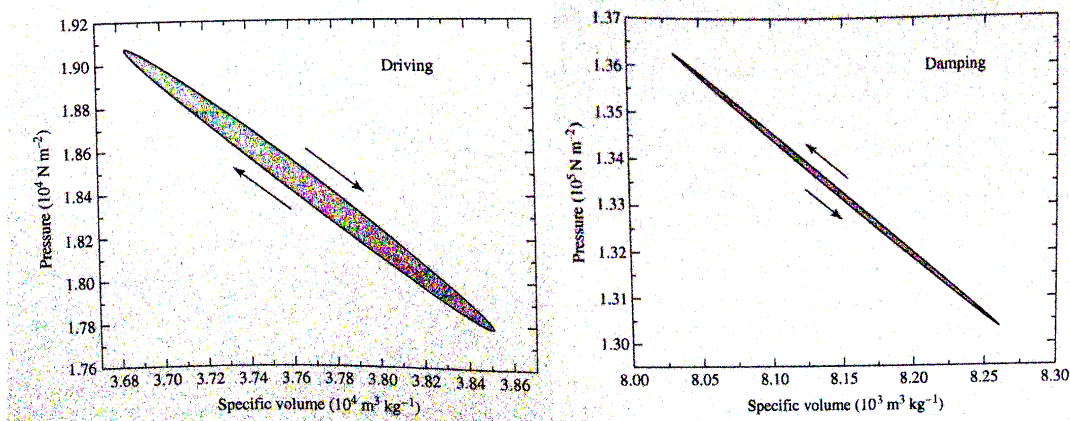
Csillagpulzáció – mitől?

κ -mechanizmus – klasszikus instabilitási sáv, β Cep, SPB, sdB instab. régió

A csillag bizonyos rétegei összenyomás hatására többelthőt nyelnek el - κ nő

PdV körintegrál pozitív adott rétegre

PdV körintegrált minden rétegre összeintegrálva ha pozitív értéket kapunk, a csillag instabil a pulzációval szemben.

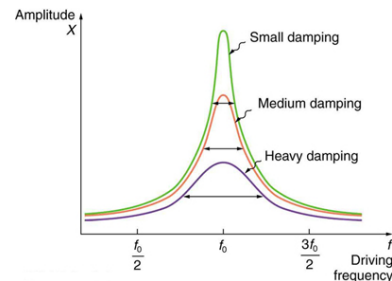


Sztochasztikus gerjesztés

A csillag felszínéhez közeli konvekció akusztikus energiája gerjeszti az alapvetően stabil, csillapított oszcillációs módusokat.

Külső gerjesztés

Excentrikus kettős rendszerekben árapály erők révén pályapulzáció rezonancia – kényszerrezgés.



Csillagpulzáció – hogyan?

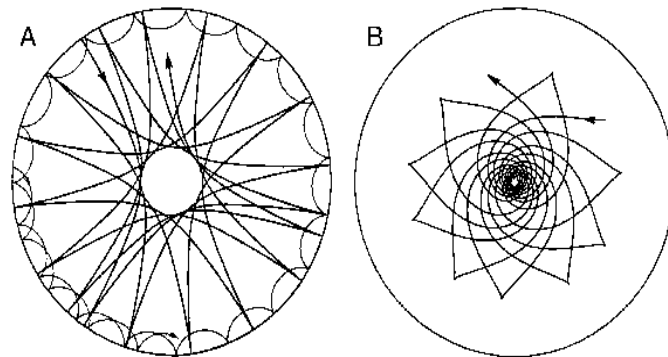
A visszatérítő hatás szempontjából megkülönböztetünk p -és g -módusokat.

p -módus

A visszatérítő erő a nyomás – A

g -módus

A visszatérítő erő a gravitáció – B



Radiális és nemradiális pulzáció

A radiális pulzáció gömbszimmetrikus.

Radiális nódusfelületek – n (radiális rend)

A nemradiális pulzáció gömbfelületi függvényekkel,

szférikus harmonikusokkal írható le: $Y_\ell^m(\theta, \varphi)$

felszíni nódusvonalak – l, m (horizontális fok, azimutális rend)

$$|m| \leq l$$

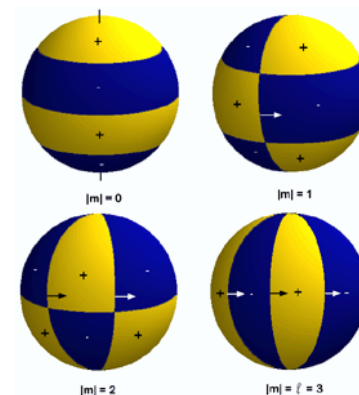
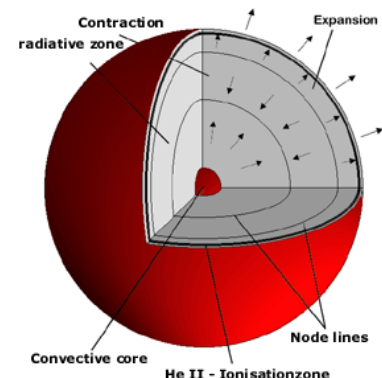
$m > 0$ prográd

$m < 0$ retrográd

$m = 0$ zonális módus

$|m| = l$ szektorális

$0 < |m| < l$ tesszerális

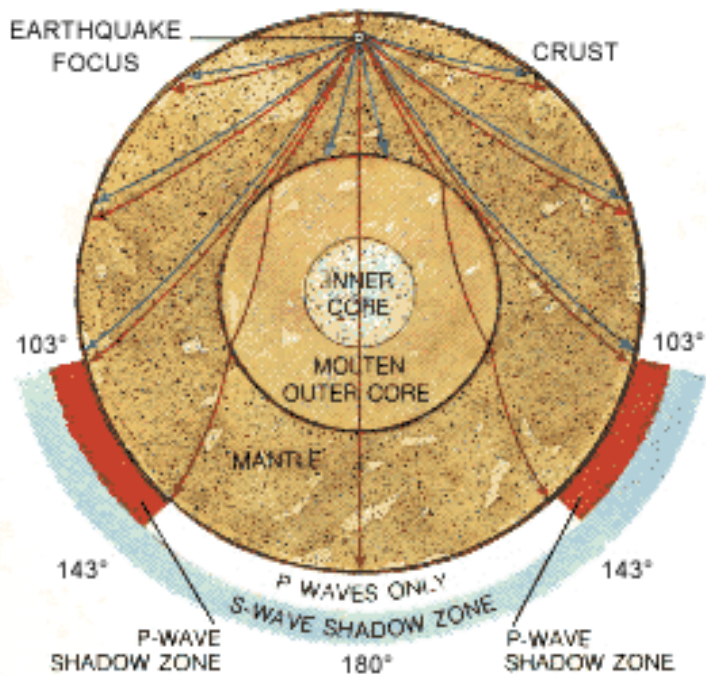


Csillagpulzáció – mire jó?

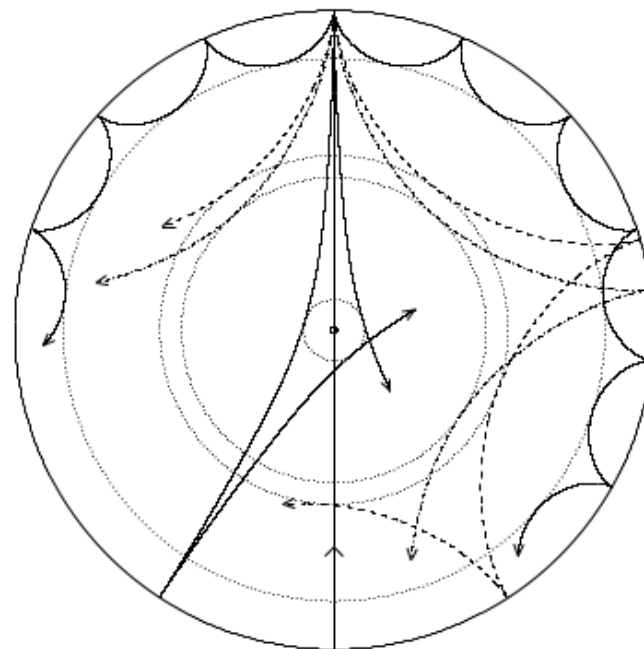
Asztroszeizmológia / asteroseismology

A csillagbelső részletes vizsgálatának egyetlen jelenleg rendelkezésünkre álló módja.

szeizmológia



asztroszeizmológia

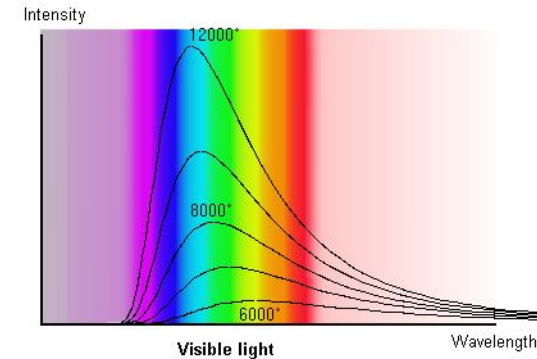


A csillagrezgések különböző frekvenciájú módusainak hullámai különböző mélységekig hatolnak le, így a csillag belsejének különböző rétegeiről (az ottani hangsebességről) hordoznak információt.

A csillagpulzáció megfigyelése I

Fotometriai módszerrel vizsgálható

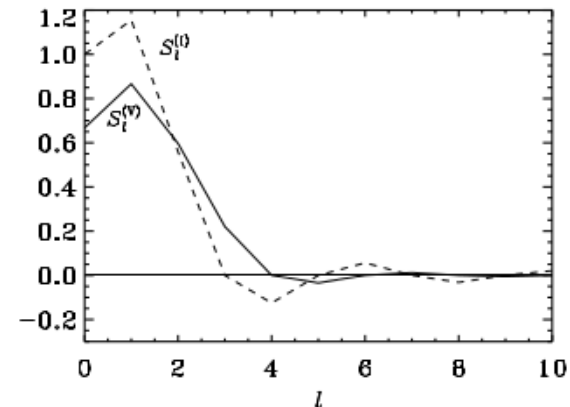
- A fényességváltozások amplitúdója különböző hullámsávokban
- A hullámsávok közötti amplitúdóarányok és fáziskülönbségek



A fényességváltozást a felszín méretének és hőmérsékletének változása okozza.

A nemradiális módusok megfigyelhető amplitúdóját a geometriai kioltás befolyásolja, ami függ a látóiránytól és a horizontális foktól.

A horizontális foktól függenek a hullámsávok közötti amplitúdóarányok és fáziskülönbségek.

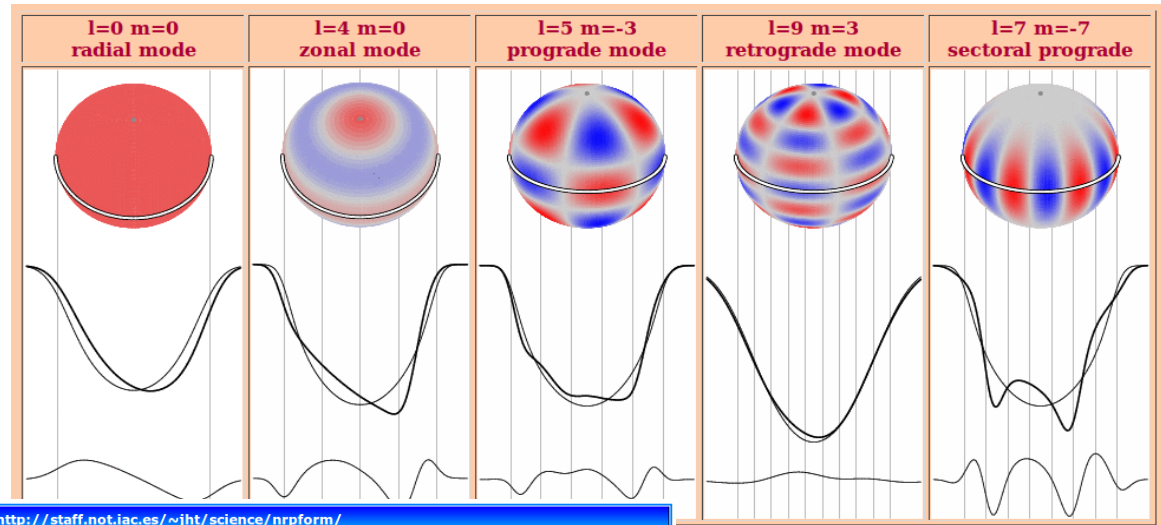


A csillagpulzáció megfigyelése II

Spektroszkópai módszerrel vizsgálható

- A felénk forduló félgömb integrált radiális sebessége
- A nemradiális módusok vonalprofiltorzító hatása

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

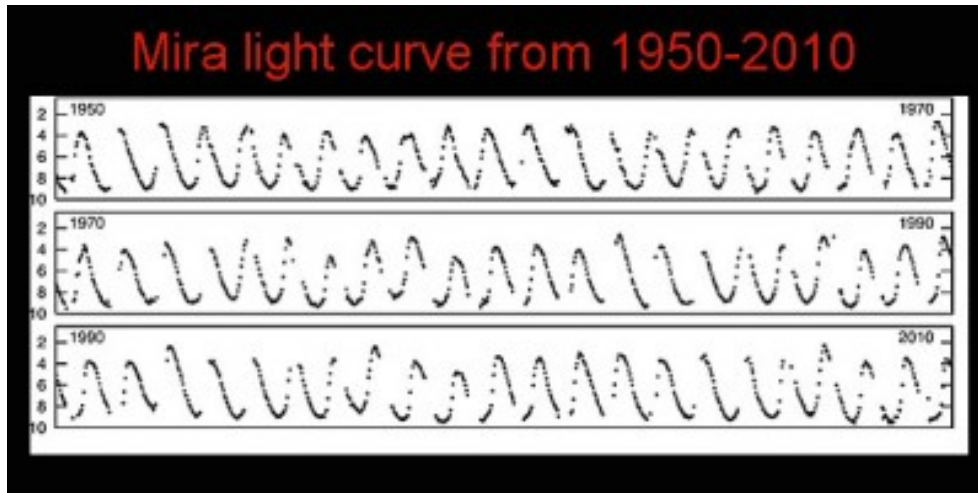


NRP animation creator		http://staff.not.iac.es/~jht/science/nrpform/	
Timings	Total number of time steps (max 40)	Time step [days]	
	<input type="text" value="20"/>	<input type="text" value="0.0125"/>	
Stellar input	Mass [M_{sun}]	Radius [R_{sun}]	Inclination angle [degrees]
	<input type="text" value="5.0"/>	<input type="text" value="5.0"/>	<input type="text" value="65"/>
	$V_{\text{eq}} \sin(i)$ [km/s]		
	<input type="text" value="50.0"/>		
Line input	Gaussian line width σ [km/s]	Line depth	
	<input type="text" value="5.0"/>	<input type="text" value="4.5"/>	
Plotting things	Animation delay	Colour cut [km/s] (use 0.0 for automatic)	Mode for $V_{\text{eq}} \sin(i)$ indicators (i.e. vertical lines)
	<input type="text" value="20"/>	<input type="text" value="0.0"/>	<input type="text" value="L dependent"/>
Modes	Number of modes		
	<input type="text" value="1"/>		
Mode 1	L	M	3D vector velocity amplitude [km/s]
	<input type="text" value="4"/>	<input type="text" value="-4"/>	<input type="text" value="4.0"/>
			Apparent pulsation frequency [cycles/day]
			<input type="text" value="8.0"/>
<input type="button" value="Make animation"/>			

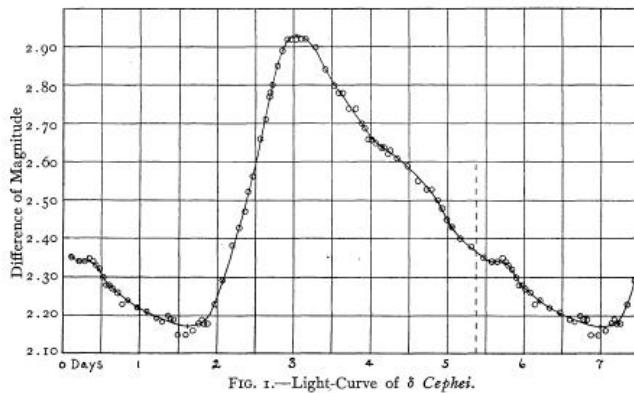
Történelmi áttekintés I

1595 augusztus–október David Fabricius o Ceti 11 hónapos periódus, 8 mag amplitúdó

→ Mira



1784 John Goodricke δ Cephei 5 nap 8 óra 48 perc periódus, 0,8 mag amplitúdó



Történelmi áttekintés II

A fotometriai megfigyelési technika fejlődése

- vizuális (~ 0.1 mag)
- fotografikus (~ 0.01 mag)
- fotoelektromos (~ 0.001 mag)
- CCD a földfelszínről (~ 0.001 mag)
- CCD a világútból (< 0.001 mag)

Történelmi áttekintés – folyt.

A fotometriai megfigyelési technika fejlődése

- vizuális (~0.1mag)
- fotografikus (~0.01 mag)
- fotoelektromos (~0.001 mag)
- CCD a földfelszínről (~0.001 mag)
- CCD a világűrből (<0.001 mag)

Asztroszeizmológiai szempontból jelentős fotometriai programok

- **Hipparcos** – 1989-1993 – parallaxis, sajátmozgás
- **MACHO** – 1992-1994 – gravitációs lencsézés, a Tejútrendszer középpontja
- **OGLE I, II, III, IV** – 1992- – gravitációs lencsézés, a Tejútrendszer középpontja, LMC
- **ASAS** – 1997- – fénygörbék, teljes égbolt
- **NSVS** (Rotse) – 1999-2000 – fénygörbék, északi égbolt (gamma-kitörések)
- **HAT Net** – 2003- – exobolygó, teljes égbolt, kiszemelt területek
- **MOST** – 2003-2014 – asztroszeizmológia, egyedi célpontok
- **CoRoT** – 2007-2013 – exobolygó, asztroszeizmológia, kiszemelt területek
- **Kepler** – 2009-2013, K2: 2014- – exobolygó, pulzáció, miegymás. Egy terület 4 évig, majd K2: kiszemelt területek

Technikák – JD, O–C

JD – Julian Date

A változócsillagászati megfigyelésekkel szemben alapvető követelmény a jelenségek idejének pontos rögzítése.

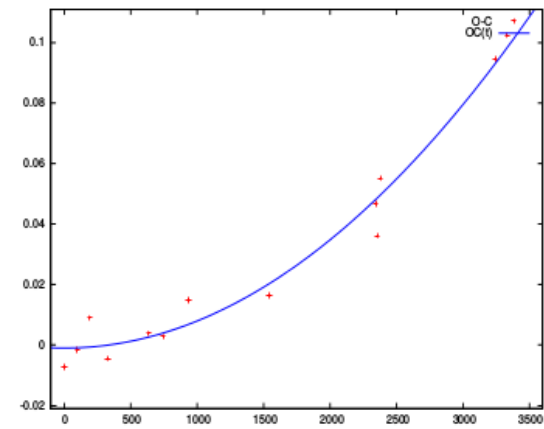
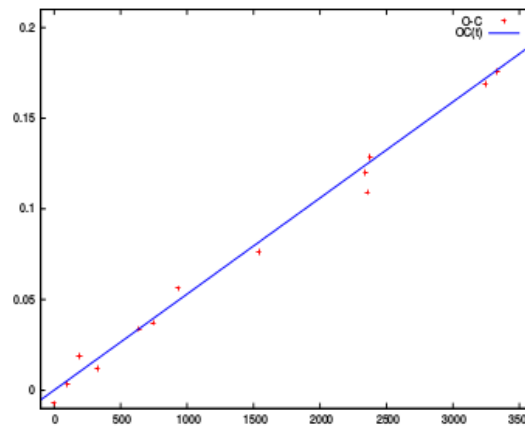
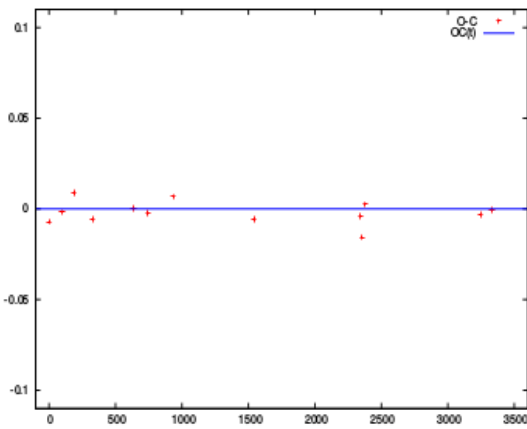
A JD az i.e. 4712 január 1 dél óta eltelt napokat méri.

Értéke a mai óra kezdetén, 2015.10.13. 11:00 UTC: 2457308.958333

Fontos: az adott égitestnek megfelelő baricentrikus korrekció elvégzése: $jd \rightarrow BJD$

Observed – Calculated: periodikus jelenségek időpontjai

$$t_{\max} = t_0 + P_e \cdot E$$



Állandó periódus, jó becslés

állandó periódus, hibás becslés

egyenletesen növekvő periódus

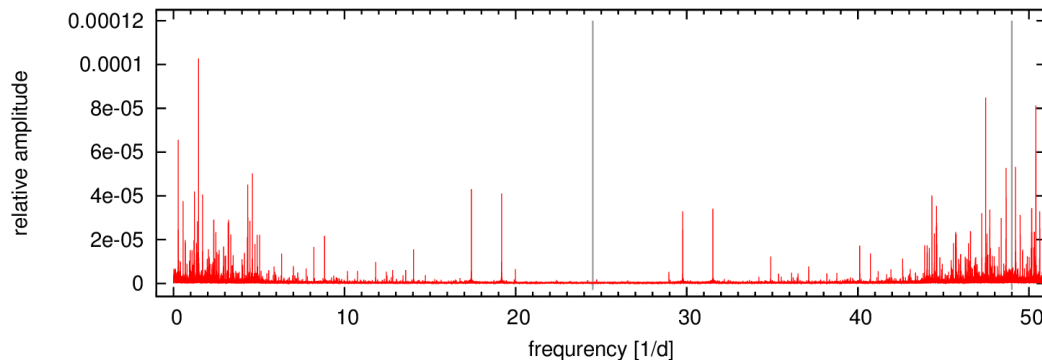
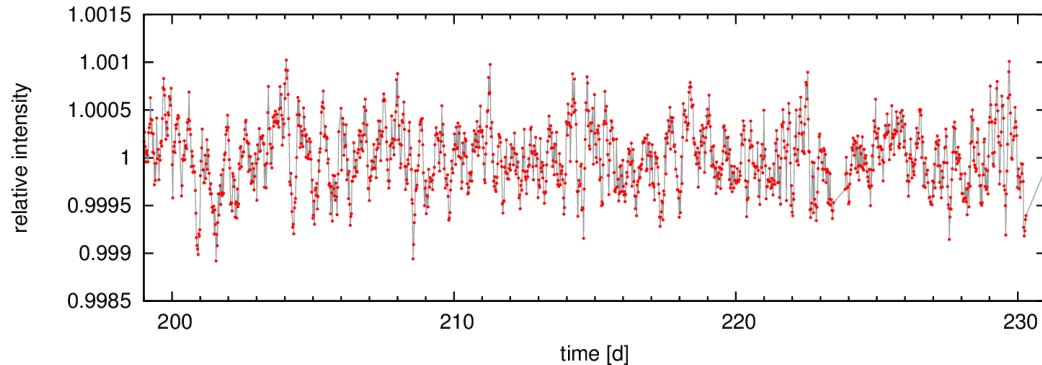
Technikák – Fourier-analízis I

A Fourier-transzformáció (FT)

$$\text{direkt: } \hat{f}(\xi) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-2\pi i x \xi} dx, \quad \text{inverz: } f(x) = \int_{-\infty}^{\infty} \hat{f}(\xi) e^{2\pi i \xi x} d\xi,$$

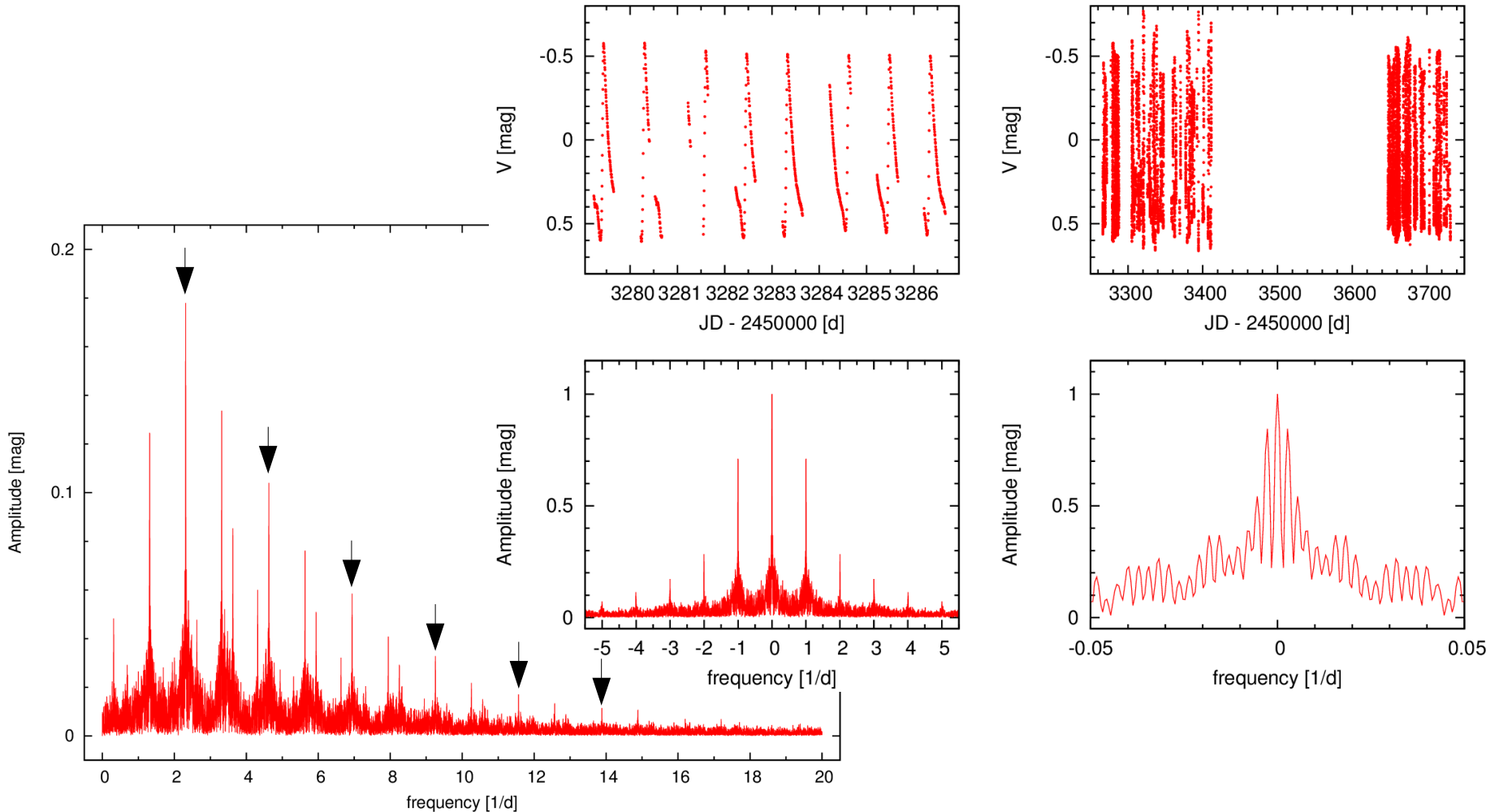
Legyen F a FT operátora

- linearitás: $F[f(x)+g(x)] = F[f(x)] + F[g(x)]$
- konvolúció-szorzás: $F[f(x)g(x)] = F[f(x)] * F[g(x)]$ és $F[f(x)*g(x)] = F[f(x)] F[g(x)]$
ahol * a konvolúció operátora



Módszerek – Fourier-analízis II

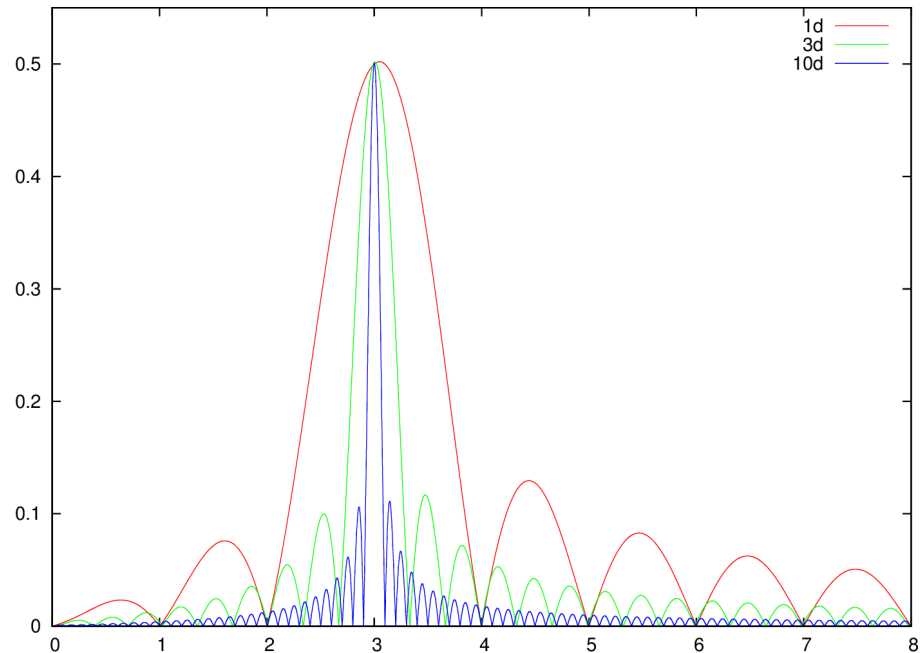
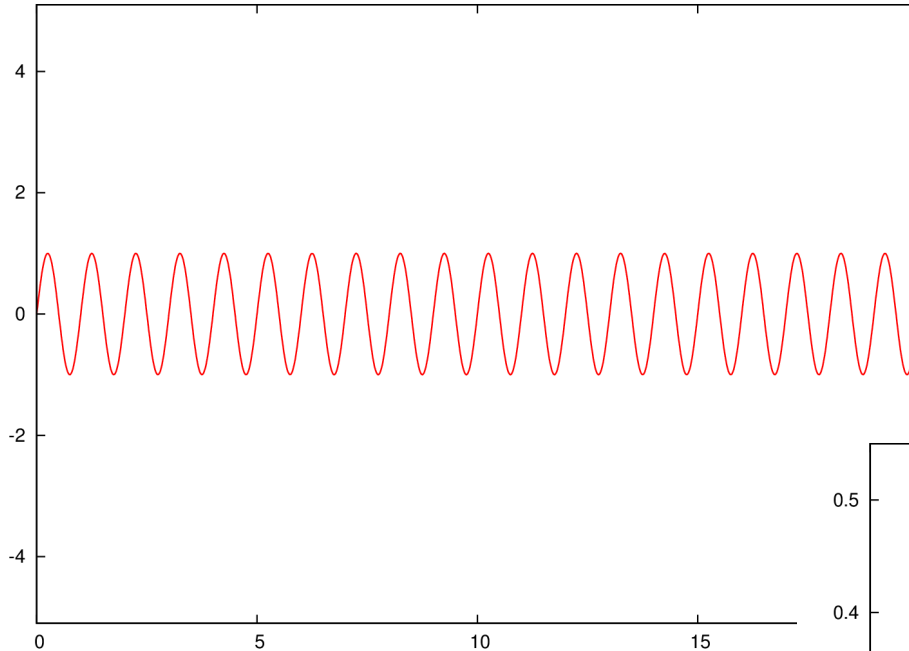
A mintavételezés, illetve az abban lévő egyenetlenségek hatása: Az *ablakfüggvény*



A mintavételezés óhatatlanul többé-kevésbé periodikus, ami interferálhat a vizsgált jelek periódusával.

Módszerek – Fourier-analízis III

Az idősor hosszának hatása: a frekvenciafelbontás javul: $\Delta f \sim 1/T$



Módszerek – Fourier-analízis IV

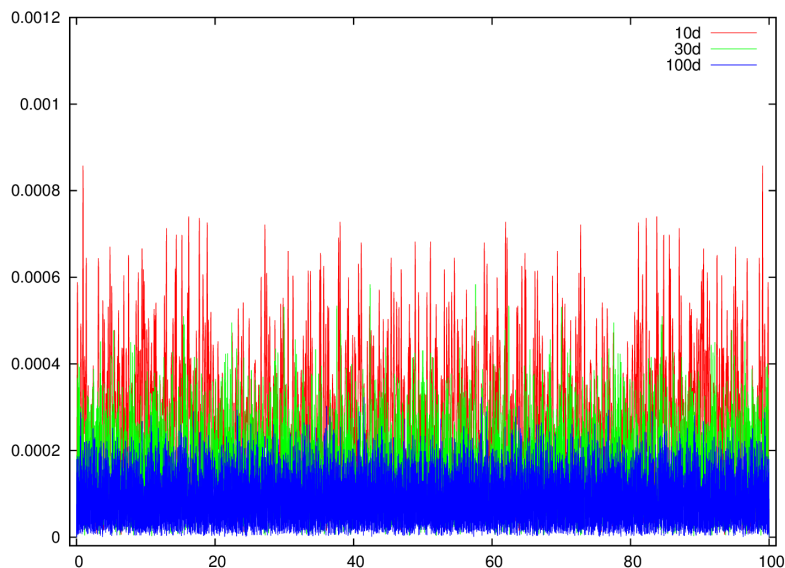
Az adatsűrűség hatása: Nyquist-frekvencia nő: $f_N = 0.5/\Delta T$

ám ez szigorúan csak egyenközű mintavételezésre érvényes

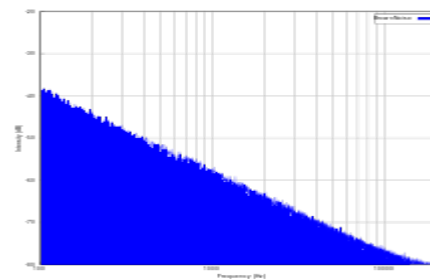
A zaj hatása: spektrális zaj

A való világbeli zajforrások sajnos a legritkábban korrelálatlanok, így nem fehér, hanem színezett zajt keltenek

fehér zaj



barna zaj



Módszerek – Fourier-analízis IV

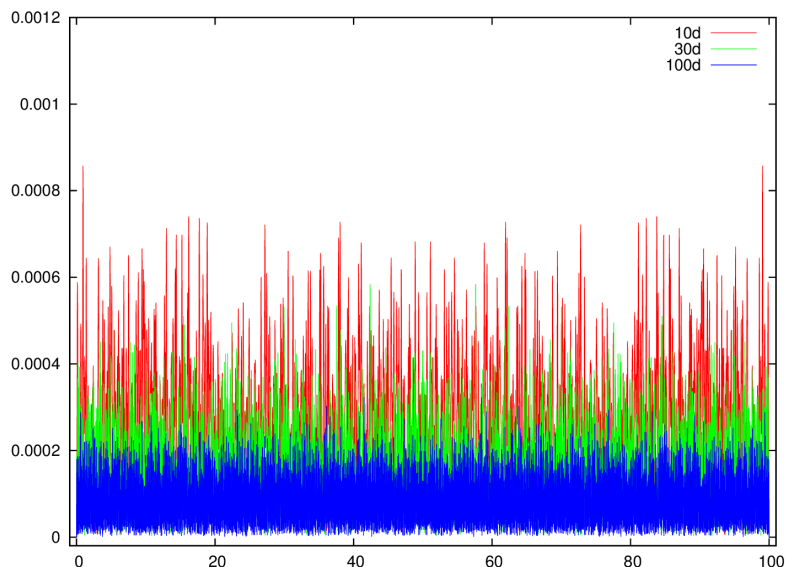
Az adatsűrűség hatása: Nyquist-frekvencia nő: $f_N = 0.5/\Delta T$

ám ez szigorúan csak egyenközű mintavételezésre érvényes

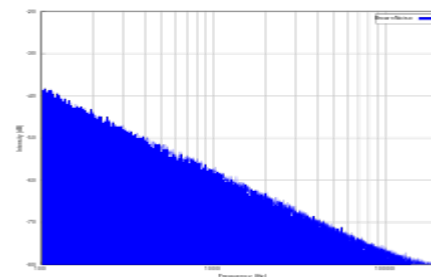
A zaj hatása: spektrális zaj

A való világbeli zajforrások sajnos a legritkábban korrelálatlanok, így nem fehér, hanem színezett zajt keltenek

fehér zaj



barna zaj



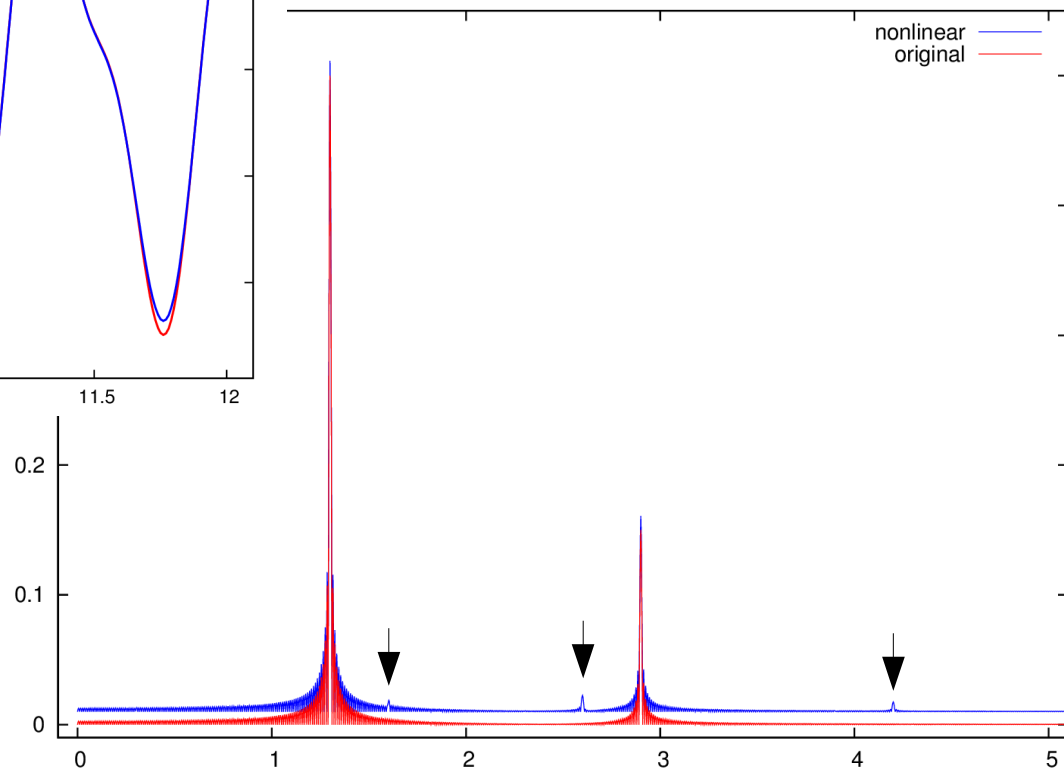
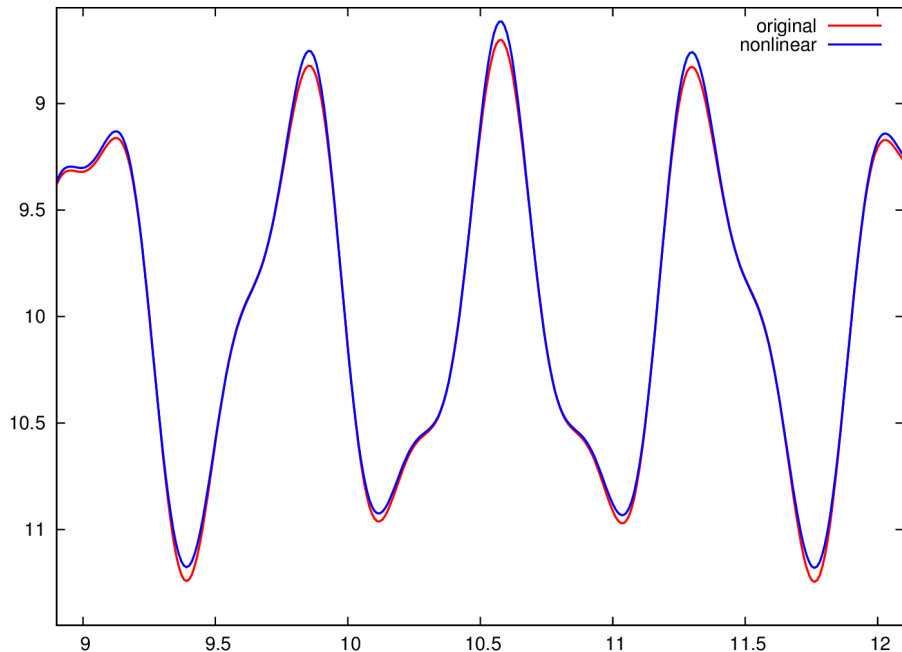
NEM barna hang! (South Park 3. évad 13. rész)



Módszerek – Fourier-analízis V

Nemlineáris oszcilláció

frekvenciák közötti nemlineáris kölcsönhatás → felharmonikusok, kombinációs frekvenciák



Módszerek – Fourier-analízis VI

Modulált jel → modulációs csúcsok

Egy f_0 frekvenciájú harmonikus jel amplitúdóját f_m frekvenciával modulálva a jelalak:

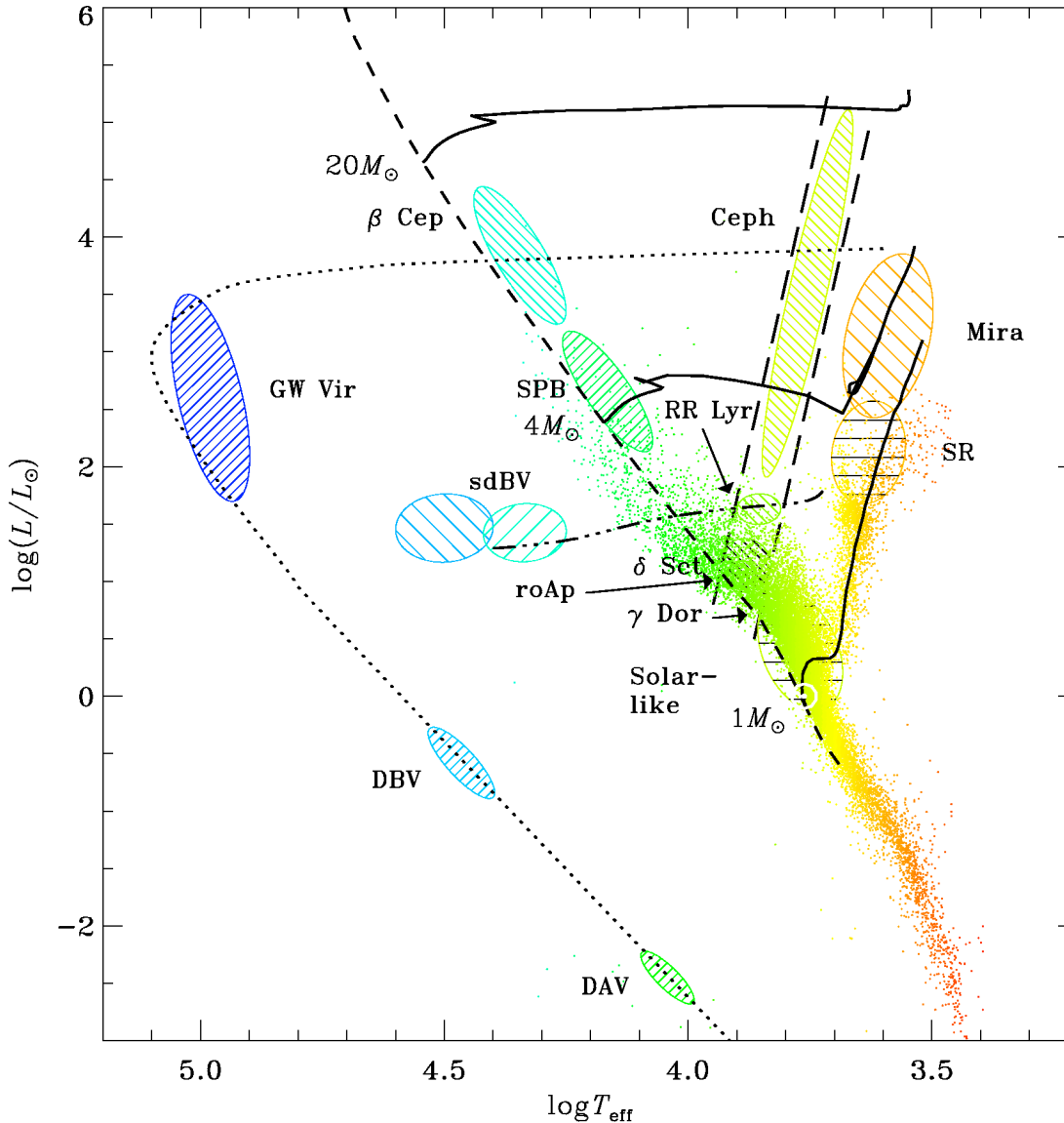
$$f(t) = [A_0 + A_m \cdot \sin(2\pi f_m \cdot t)] \cdot \sin(2\pi f_0 \cdot t),$$

felhasználva a $\sin \alpha \sin \beta = \frac{1}{2}[\cos(\alpha - \beta) - \cos(\alpha + \beta)]$ trigonometrikus addíciós tételt kapjuk, hogy

$$f(t) = A_0 \cdot \sin(2\pi f_0 \cdot t) + \frac{A_m}{2} \cos[2\pi(f_0 - f_m) \cdot t] - \frac{A_m}{2} \cos[2\pi(f_0 + f_m) \cdot t].$$

Tehát a jel Fourier-spektruma egyenközű triplett, a modulált jel középső csúcsa mellett kétoldalt f_m távolságban két egyenlő amplitúdójú modulációs csúcs jelenik meg. Ha a modulált jelnek felharmonikusai is vannak, akkor e felharmonikusok csúcsai mellett kétoldalt is megjelennek a modulációs csúcsok a spektrumban a $k \cdot f_0 \pm f_m$ helyeken, azonos amplitúdóval.

Pulzáció a HRD-n



A pulzációs egyenlet

$$P \sqrt{\langle \rho \rangle} = Q$$

Kifejezi, hogy egy adott módus, pl. a fundamentális radiális módus periódusa (P) az átlagos sűrűség ($\langle \rho \rangle$) négyzetgyökével fordítottan arányos. Q a pulzációs konstans.

Pulzátorok típusai I

Table A.1. The names and basic properties of main sequence, giant and compact pulsators.

Class name adopted here	Other names in the literature	Mode Type	Period Ranges	Amplitudes (brightness)	Amplitudes (velocity)	log T_{eff} (K) approx. range	log L/L_{\odot} approx. range
Solar-like pulsator	main sequence red giants	p	3 to 10 min	few ppm	$< 50 \text{ cm s}^{-1}$	[3.70, 3.82]	[-0.5, 1.0]
		p	few hours	few 10 ppm	few m s^{-1}	[3.65, 3.70]	[-0.5, 2.0]
γ Dor	slowly pulsating F	g	8 h to 5 d	$< 50 \text{ mmag}$	$< 5 \text{ km s}^{-1}$	[3.83, 3.90]	[0.7, 1.1]
δ Sct	SX Phe (Pop. II)	p	15 min to 8 h	$< 0.3 \text{ mag}$	$< 10 \text{ km s}^{-1}$	[3.82, 3.95]	[0.6, 2.0]
roAp	—	p	5 to 22 min	$< 10 \text{ mmag}$	$< 10 \text{ km s}^{-1}$	[3.82, 3.93]	[0.8, 1.5]
SPB	53 Per	g	0.5 to 5 d	$< 50 \text{ mmag}$	$< 15 \text{ km s}^{-1}$	[4.05, 4.35]	[2.0, 4.0]
β Cep	β CMa, ζ Oph (SpT O) 53 Per	p&g	1 to 12 h (p) few days (g)	$< 0.1 \text{ mag}$ $< 0.01 \text{ mag}$	$< 20 \text{ km s}^{-1}$ $< 10 \text{ km s}^{-1}$	[4.25, 4.50]	[3.2, 5.0]
pulsating Be	λ Eri, SPBe	p&g	0.1 to 5 d	$< 20 \text{ mmag}$	$< 20 \text{ km s}^{-1}$	[4.05, 4.50]	[2.0, 5.0]
pre-MS pulsator	pulsating T Tauri	p	1 to 8 h	$< 5 \text{ mmag}$			
	pulsating Herbig Ae/Be	p	1 to 8 h	$< 5 \text{ mmag}$			
	pulsating T Tauri	g	8 h to 5 d	$< 5 \text{ mmag}$			
p-mode sdBV	EC14026, V361 Hya	p	80 to 800 s	$< 0.1 \text{ mag}$		[4.20, 4.50]	[1.2, 2.2]
g-mode sdBV	PG1716+426, Betsy star, lpsdBV	g	0.5 to 3 h	$< 0.01 \text{ mag}$		[4.40, 4.60]	[1.2, 2.6]
PNNV	ZZ Lep, [WCE]	g	5 h to 5 d	$< 0.3 \text{ mag}$			
GW Vir	DOV, PG1159	g	5 to 80 min	$< 0.2 \text{ mag}$		[4.80, 5.10]	[1.5, 3.5]
DBV	V777 Her	g	2 to 16 min	$< 0.2 \text{ mag}$		[4.40, 4.60]	[-1.0, 0.7]
DAV	ZZ Ceti	g	0.5 to 25 min	$< 0.2 \text{ mag}$		[3.95, 4.15]	[-2.6, -2.2]

Pulzátorok típusai II

Class name adopted here	Other names in literature	Mode Type	Period Ranges	Amplitudes (brightness)	Amplitudes (velocity)	log T_{eff} (K) approx. range	log L/L_{\odot} approx. range
RR Lyr	RRab	F	~ 0.5 d	< 1.5 mag	< 30 km s $^{-1}$	[3.78, 3.88]	[1.4, 1.7]
	RRc	FO	~ 0.3 d	< 0.5 mag	< 10 km s $^{-1}$		
	RRd	F+FO	0.3 to 0.5 d	< 0.2 mag	< 10 km s $^{-1}$		
Type II Cepheid	W Vir	F	10 to 30 d	< 1 mag	< 30 km s $^{-1}$	[3.70, 3.90]	[2.0, 4.0]
	BL Her	F	1 to 5 d	< 1 mag	< 30 km s $^{-1}$		
RV Tauri	RVa, RVb	F?	30 to 150 d	< 3 mag	< 30 km s $^{-1}$	[3.60, 3.90]	[3.2, 4.2]
Type I Cepheid	—	F	1 to 50 d	< 1 mag	< 30 km s $^{-1}$	[3.55, 3.85]	[2.0, 5.5]
	s-Cepheid	FO	< 20 d	< 0.1 mag	< 10 km s $^{-1}$		
Mira	SRa, SRb	$l = 0$	> 80 d	< 8 mag		[3.45, 3.75]	[2.5, 4.0]
	SRc	$l = 0$	> 80 d	< 1 mag			
	SRd	$l = 0$	< 80 d	< 1 mag			
PVSG (SpT A)	α Cyg	g,S?	10 to 100 d	< 0.3 mag	< 20 km s $^{-1}$	[3.45, 4.00]	[2.5, 4.5]
PVSG (SpT B)	SPBsg	g	1 to 10 d	< 0.3 mag	< 20 km s $^{-1}$	[4.00, 4.50]	[4.3, 5.8]
LBV	S Dor	g,S	2 to 40 d	< 0.1 mag		[3.80, 4.20]	[5.5, 6.5]
WR	WC, WN	g,S	1h to 5 d	< 0.2 mag		[4.40, 4.70]	[4.5, 6.0]
HdC eHe	R CrB	g?	40 to 100 d	< 0.05 mag	< 10 km s $^{-1}$	[3.50, 4.20]	[3.5, 4.5]
	PV Tel	S	~ 20 d				
	V652 Her	g,S?	~ 0.1 d				
	V2076 Oph	g,S?	0.5 to 8 d				