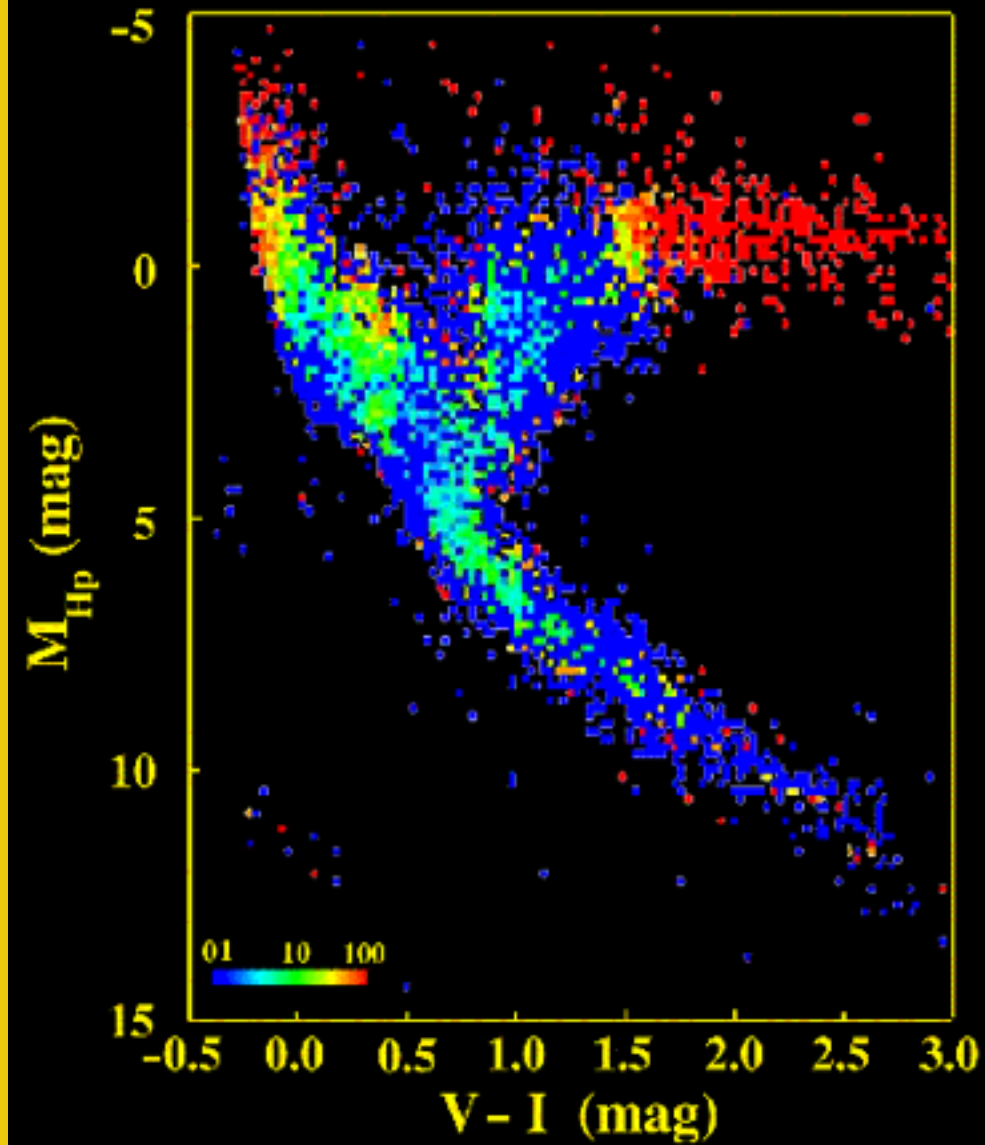


Pulzáló vörös óriáscsillagok

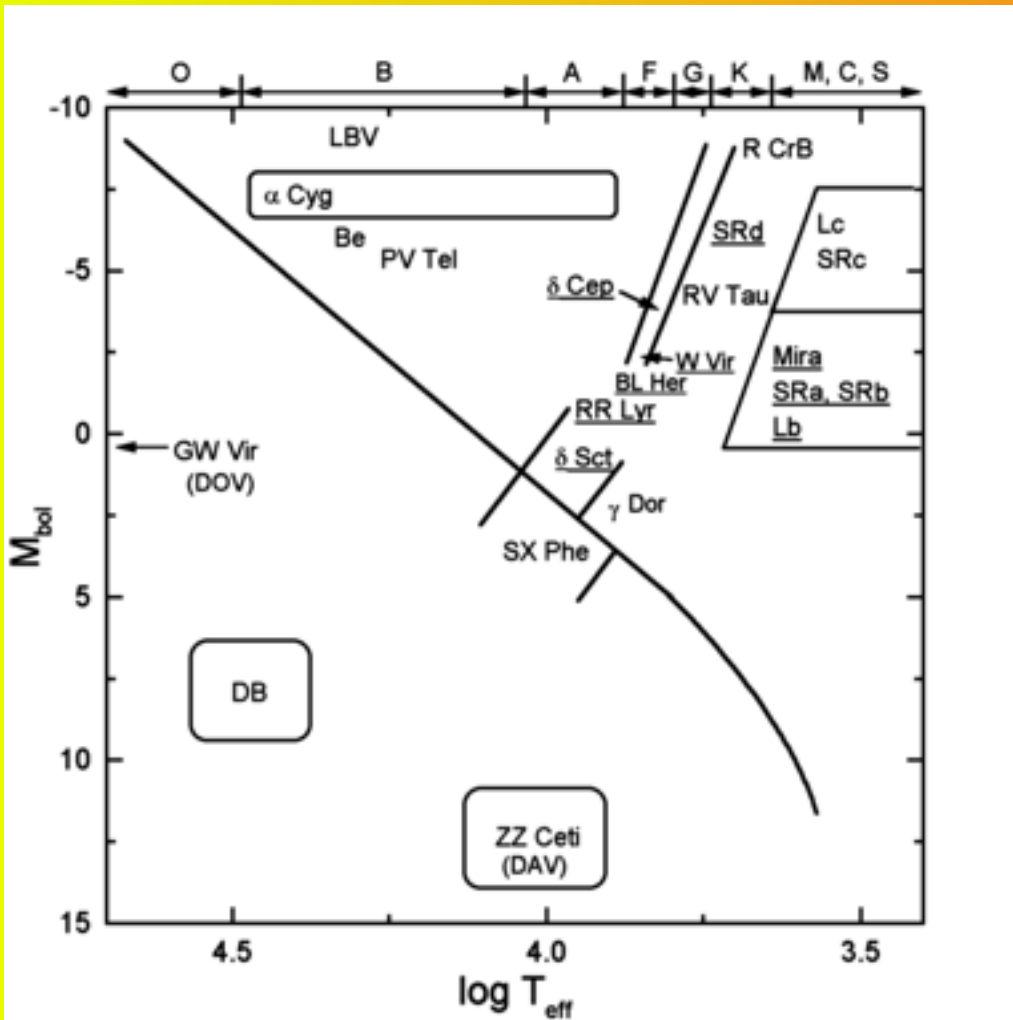
- Kiss L. László
- School of Physics, University of Sydney
- (SZTE Kísérleti Fizikai Tanszék)
- Az MTA doktora címre benyújtott értekezés
téziseinek nyilvános vitája
- Budapest, 2007. okt. 1.

Hertzsprung – Russell: Variability



Változékonyság a HRD-n: **minden** vörös óriás
változócsillag!

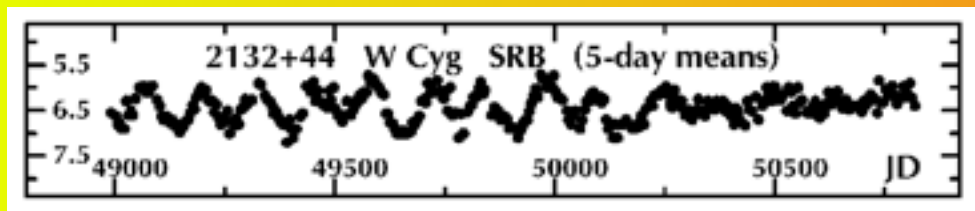
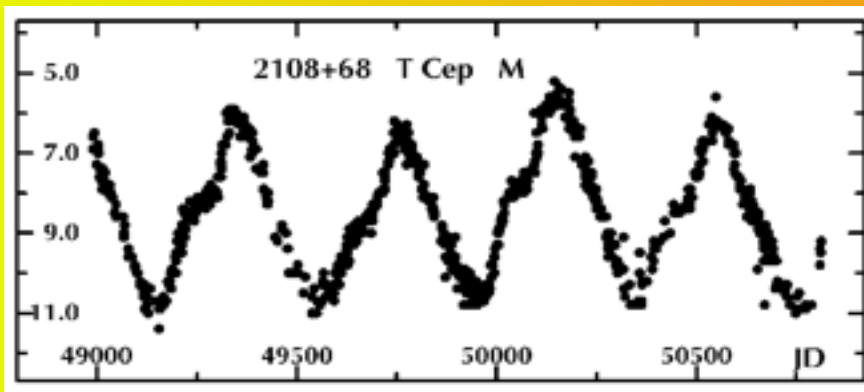
Csillagpulzáció: másodperces...éves időskálán lejátszódó ciklikus hőmérséklet- és sugárváltozások



- A “pulzáló állatkert”:
 - klasszikus pulzálók az instabilitási sávban (SX Phe, \square Sct, RR Lyr, \square Cep,...)
 - fényes kék változók (\square Cyg, LBV, hiperóriások,...)
 - szubtörpe és fehér törpe pulzátorok (GW Vir, ZZ Cet,...)
 - **vörös óriások (Mira, SR, L,...)**

Pulzáló csillagok a HRD-n (Becker 1998)

Pulzáló vörös óriások:



- **mirák**
periódus: 100 – 1000 nap
amplitúdó: >2,5 mag
(vizuális)
egyszeresen periodikus,
szabályos változások
- **félszabályos (SR)**
periódus: 10 – 1000 nap
amplitúdó: <2,5 mag
(vizuális)
kvázireguláris változások
(többszörösen periodikus,
sztochasztikus, kaotikus)

Fejlődési útvonal a vörös óriás fázisban (Iben 1967): a pulzációk elsődlegesen az AGB-n jelentkeznek (2003)

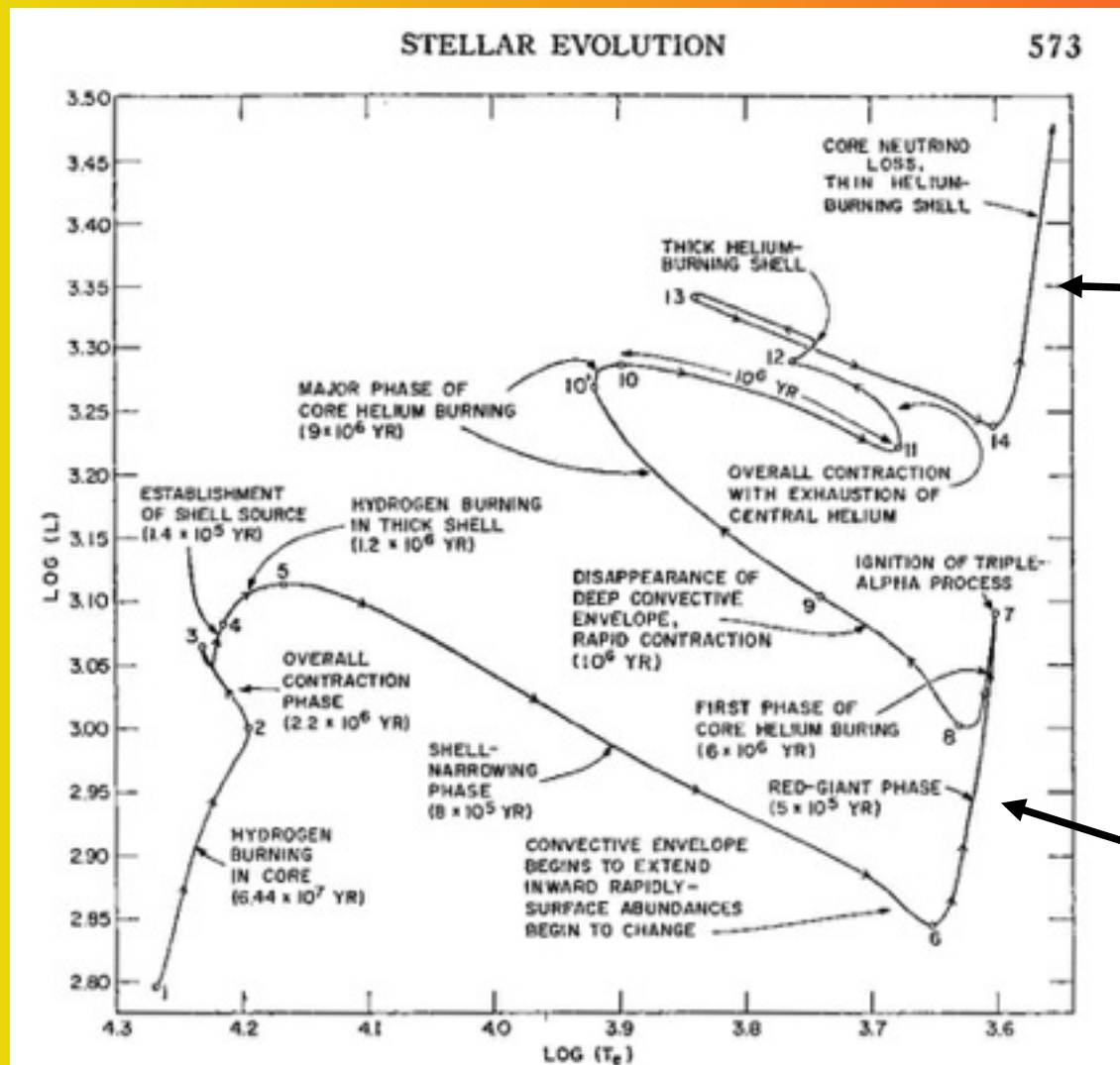
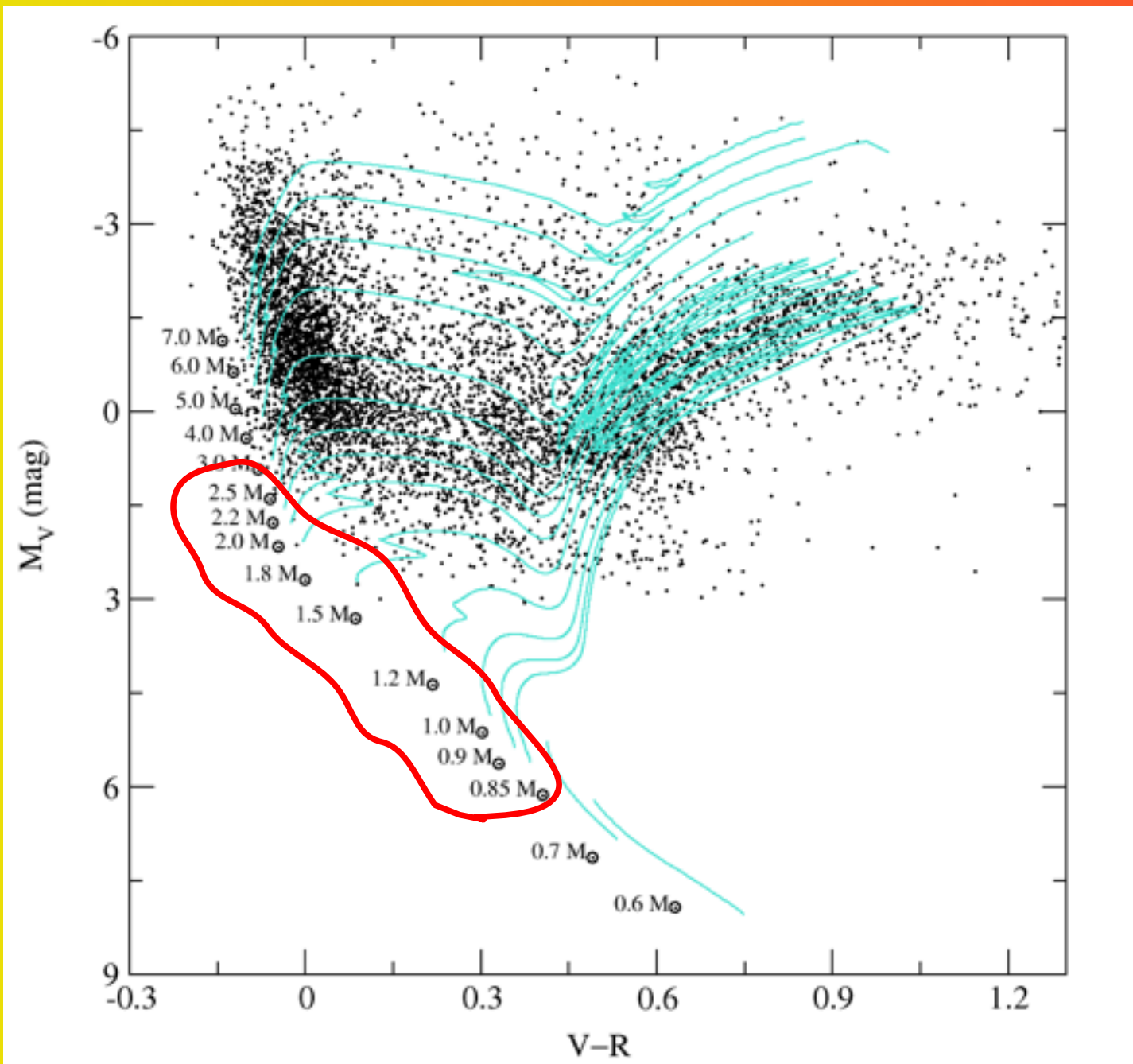


FIG. 1. The path of a metal-rich 5M_⊙ star in the Hertzsprung-Russell diagram. Luminosity is in solar units, L_⊙ = 3.86 × 10³³ erg/sec, and surface temperature T_e is in deg K. Traversal times between labeled points are given in years.

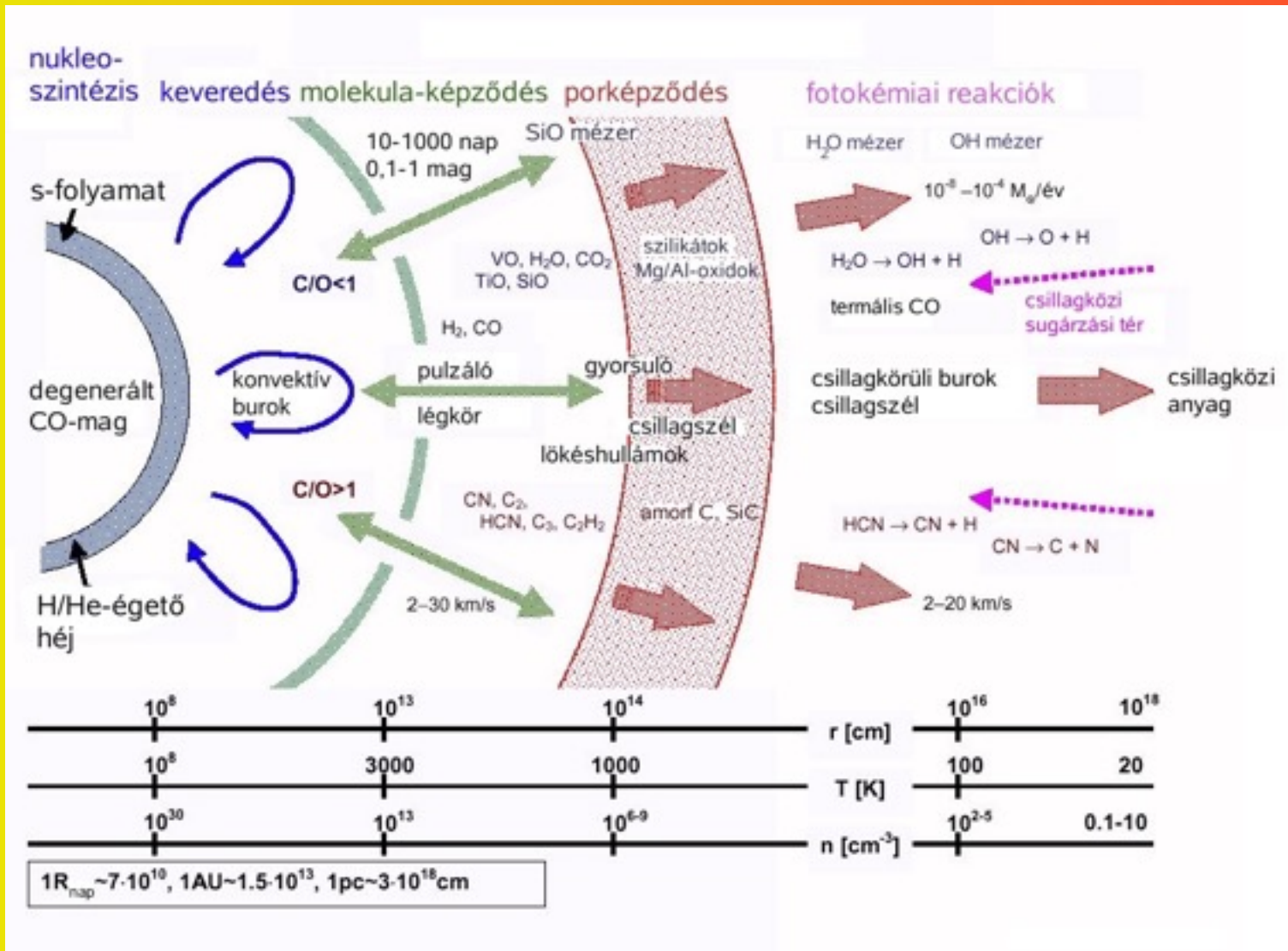
Aszimptotikus óriáság (AGB)

Első vörös óriáság (RGB)



MACHO változócsillagok az LMC-ben, ill. fémszegény csillag-fejlődési modellek (Derekas, Kiss & Bedding 2007)

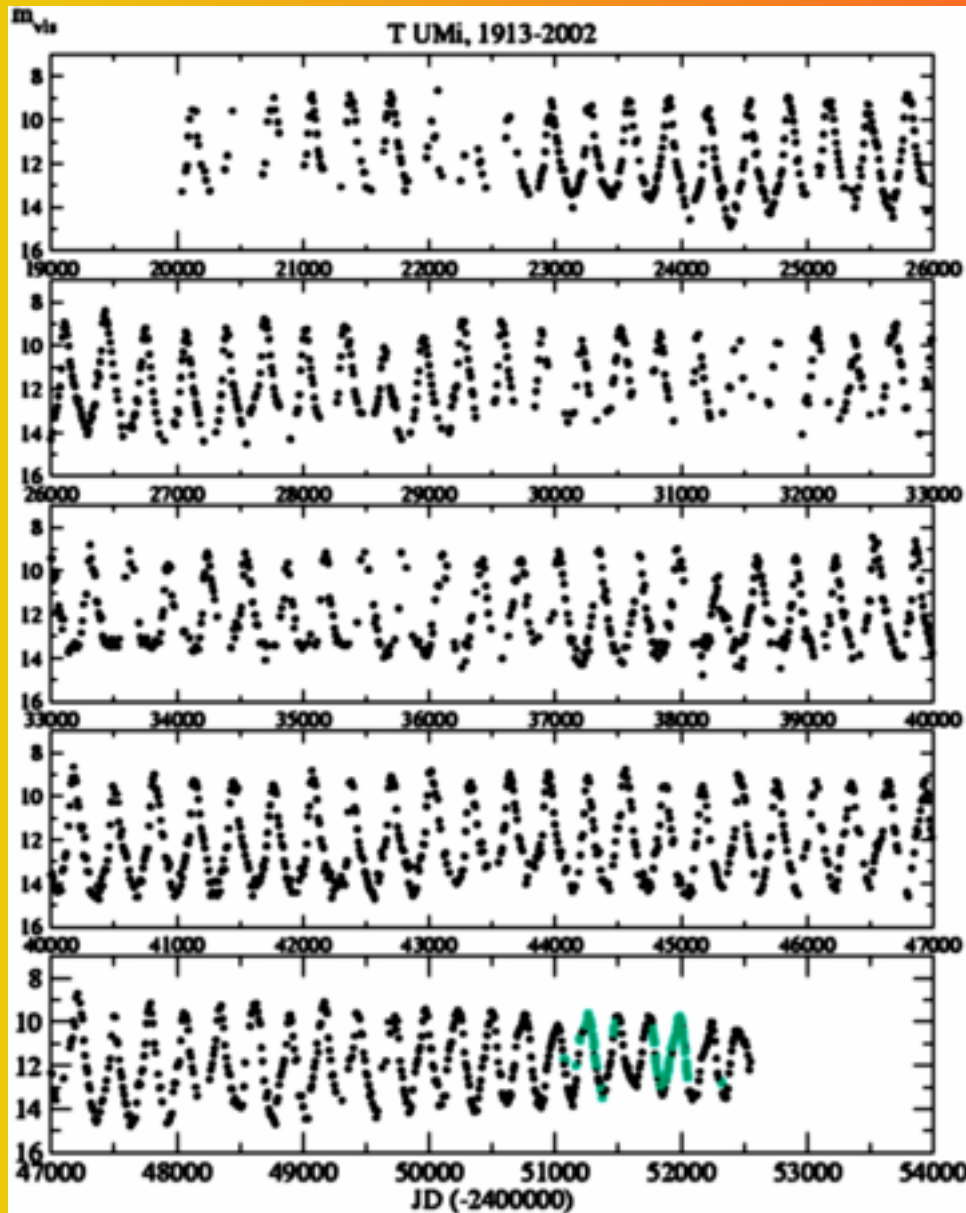
Egy AGB-csillag szerkezete



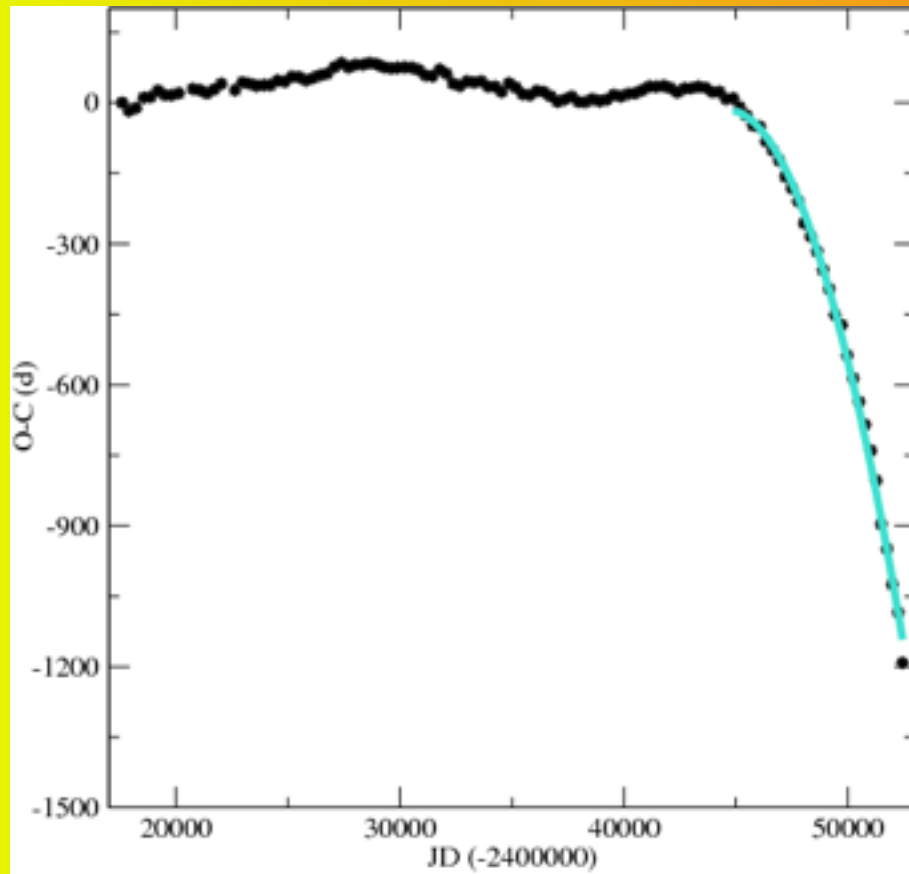
(J. Hron, Bécsi Egyetem nyomán)

A vizuális adatok felhasználása

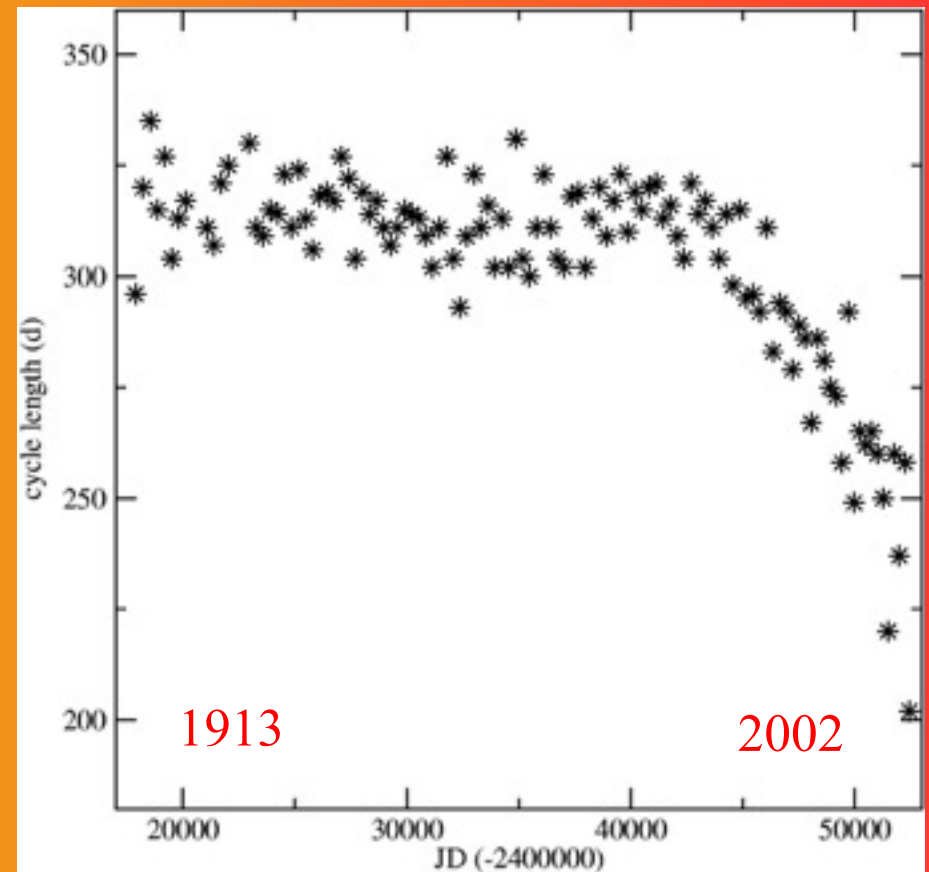
T Ursae Minoris: egy mira csillag drámai perióduscsökkenéssel
(Szatmáry, Kiss & Bebesi, 2003, A&A, 398, 277)



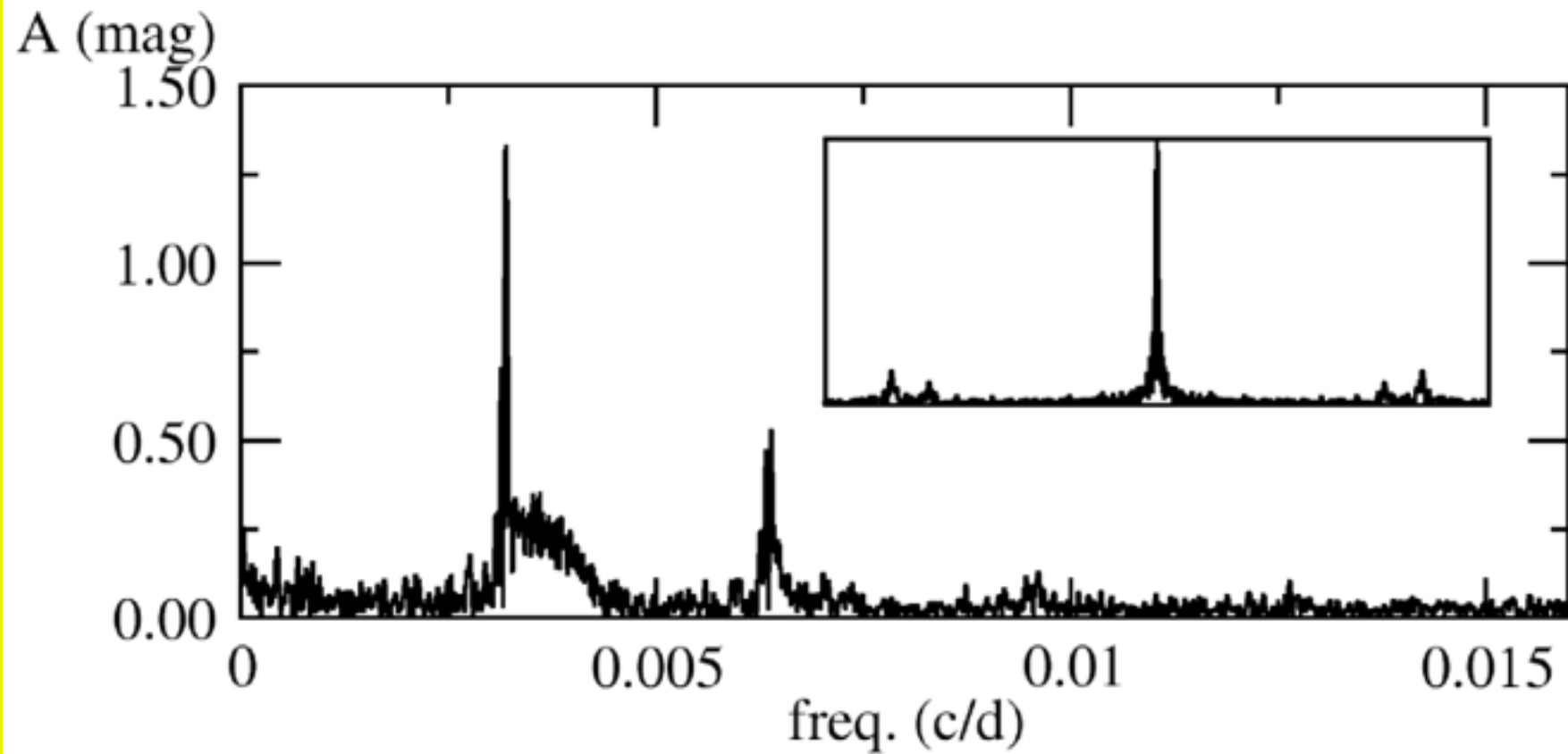
T UMi: O-C diagram



T UMi: ciklushossz változásai



T UMi: frekvenciaspektrum



AGB-csillagok termális pulzusai (Wood & Zarro 1981,...)

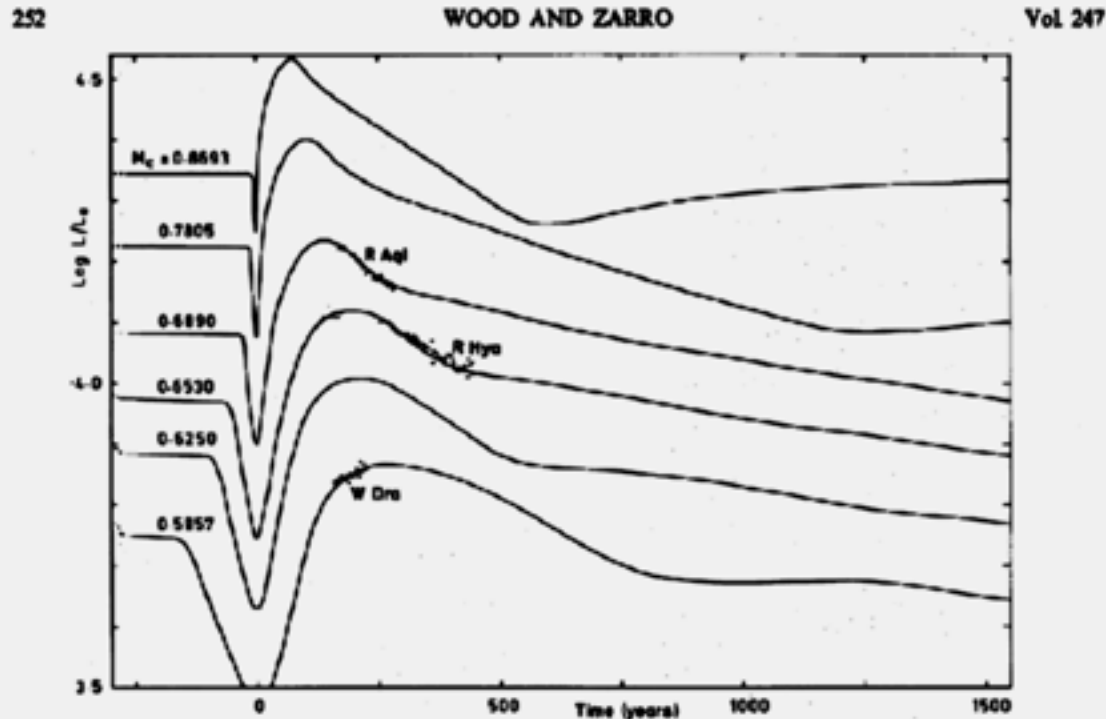


FIG. 3.—Behavior of surface luminosity L as a function of time for a number of different values of core mass M_c . The variation of the surface luminosity of the Mira variables R Hya, R Aql, and W Dra as deduced from changes in period is also shown (see text for details).

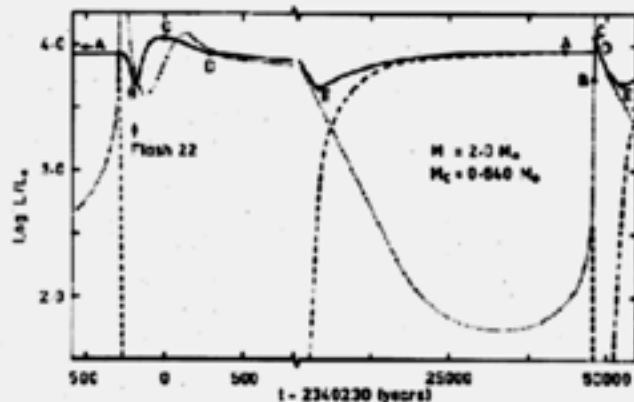
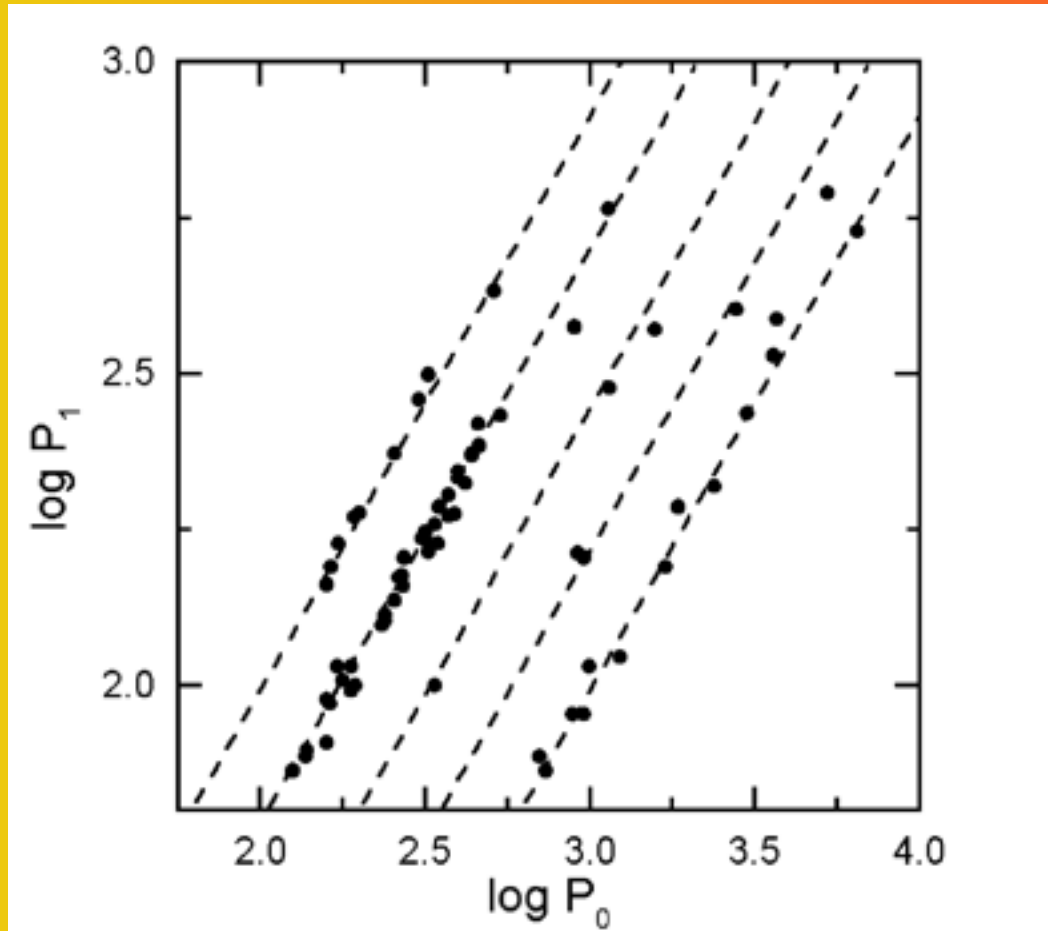


FIG. 1.—Variation with time during a flash cycle of surface luminosity (continuous line), hydrogen-burning luminosity (dashed line), and helium-burning luminosity (dotted line).

- termális pulzus: energiatermelési instabilitás a csillagmagot övező héjakban (H- és He-égetés közötti váltás)
- a változó luminozitás gyors sugárváltozást indukál [?] a csillag “elhangelődik”, a rezgés periódusa nyomjelzi a változásokat
- T UMi:
 - a He-villanás kezdete után azonnal (A és B között)
 - a gyors perióduscsökkenés pár évenkéntizeden belül periódusnövekedésre fog váltani

Többszörös periodicitás, káosz, sztochasztikus
gerjesztés

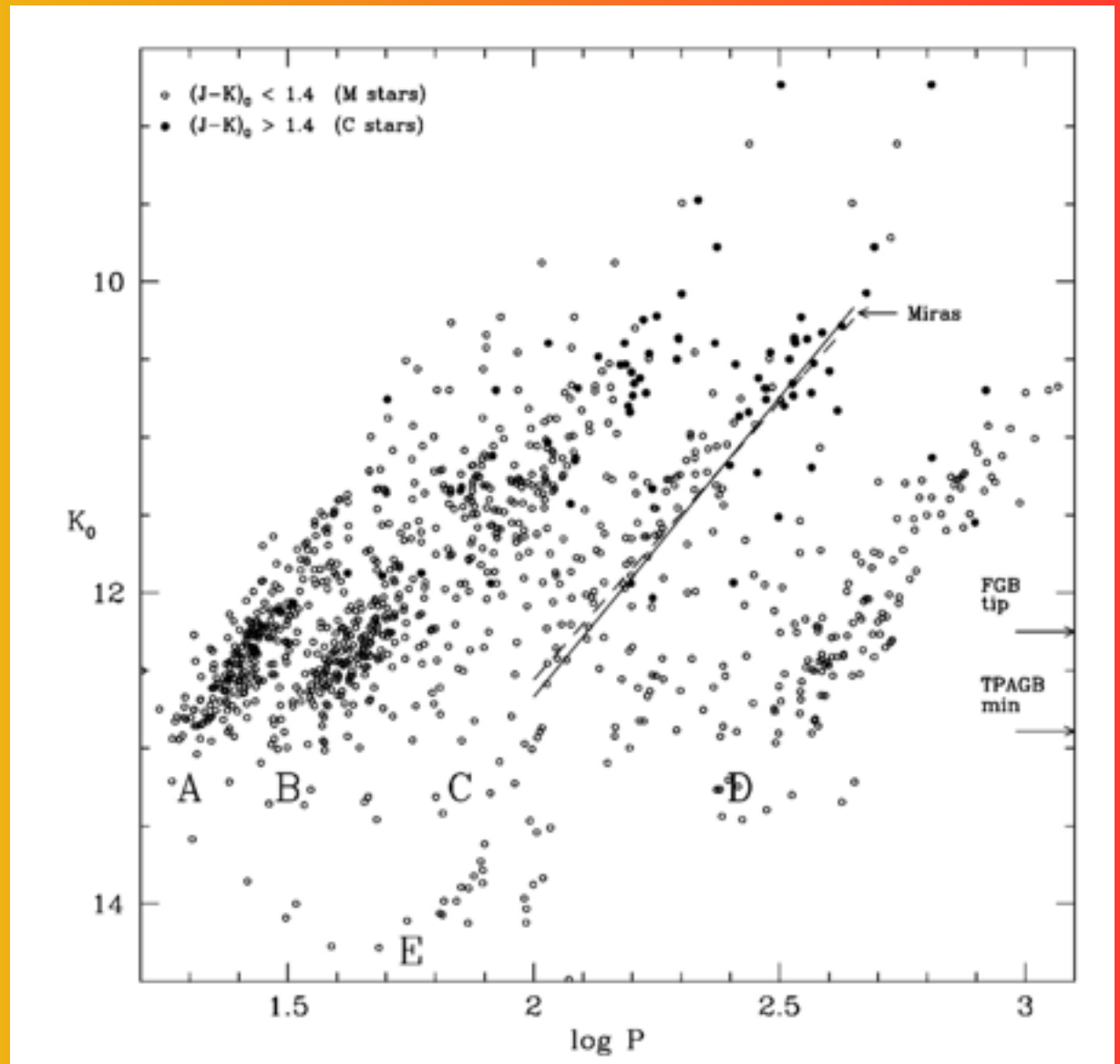
93 fényes galaktikus félszabályos változó többszörös periodicitása, 3(+2?) elkülönülő periódus-periódus szekvencia (Kiss et al. 1999)



Többszörös pulzáció

Pulzáló vörös óriáscsillagok a Nagy Magellán-felhőben

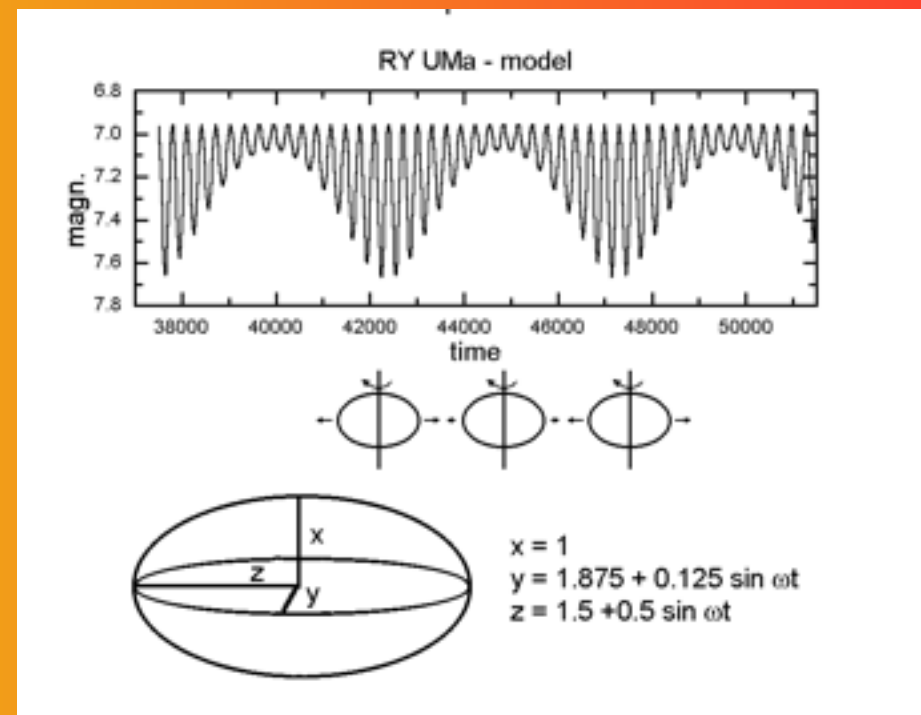
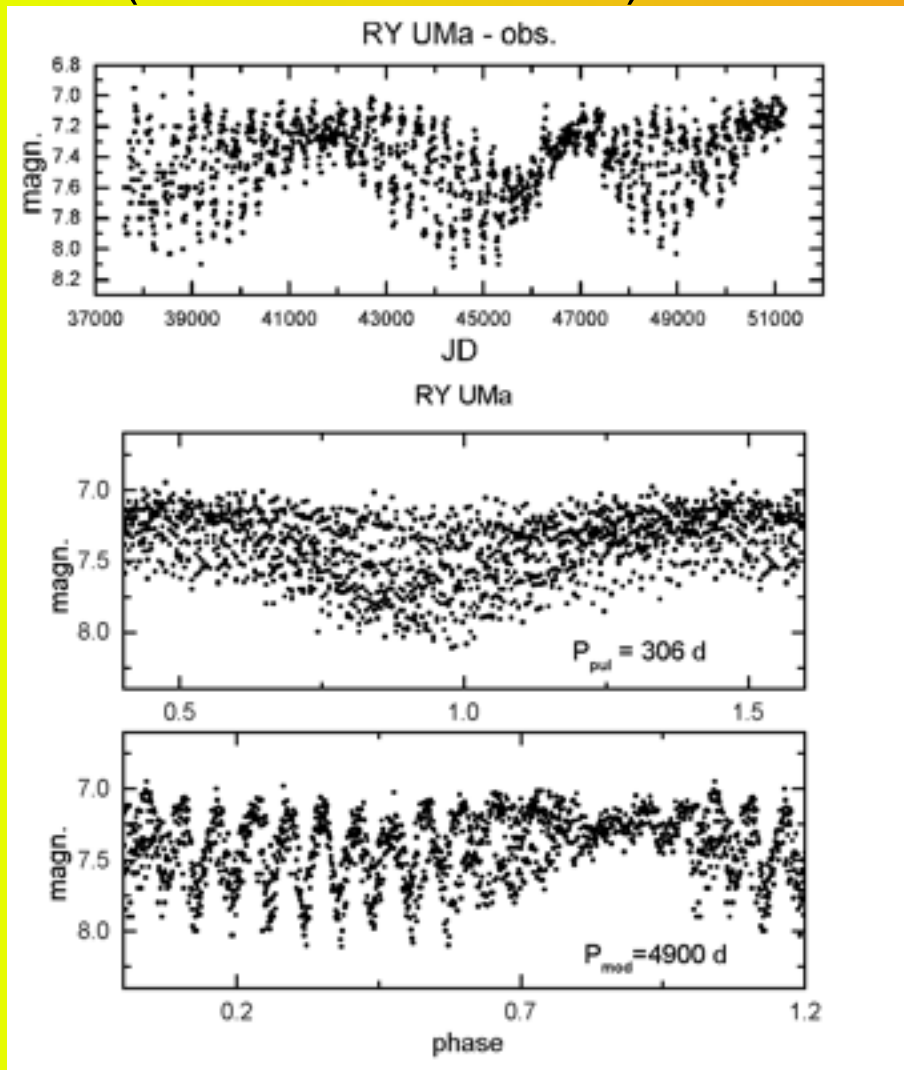
Wood et al. (1999),
Wood (2000)



Új paradigma születése

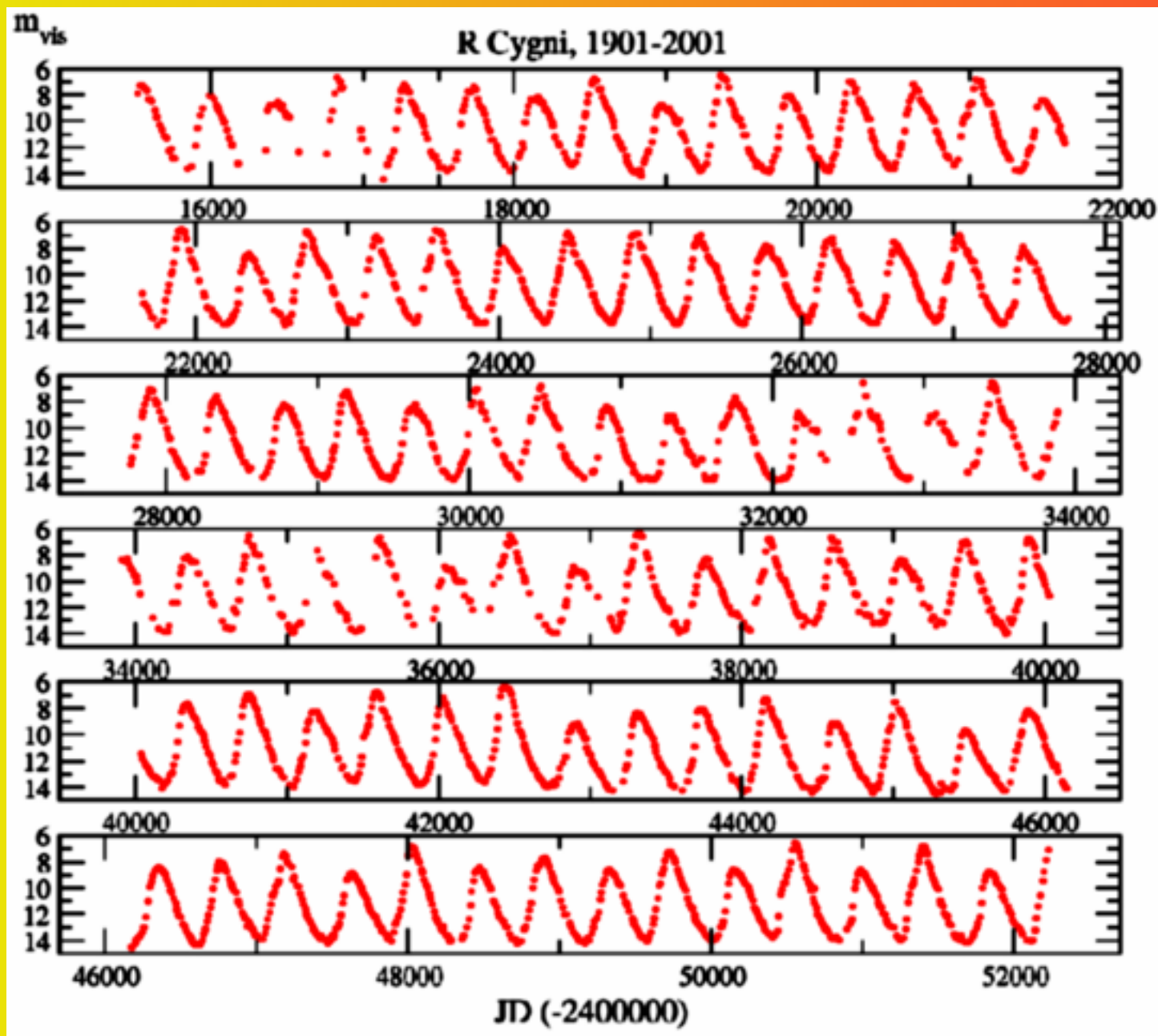
- Öt elkülönülő periódus–fényesség-reláció, négyben AGB-csillagok
- A mirák és bizonyos kis amplitúdójú SR-csillagok alapmódusú pulzátorok (C szekvencia)
- Más félszabályos változóknál felhangok gerjesztődnek, egészen a 2-3. felhangig (A és B szekvenciák)
- vörös óriás fedési kettőscsillagok (E szekvencia)
- hosszú másodperiódusok (D szekvencia)

RY Ursae Majoris: rotációs moduláció (rezonancia?) (C és D szekvencia)

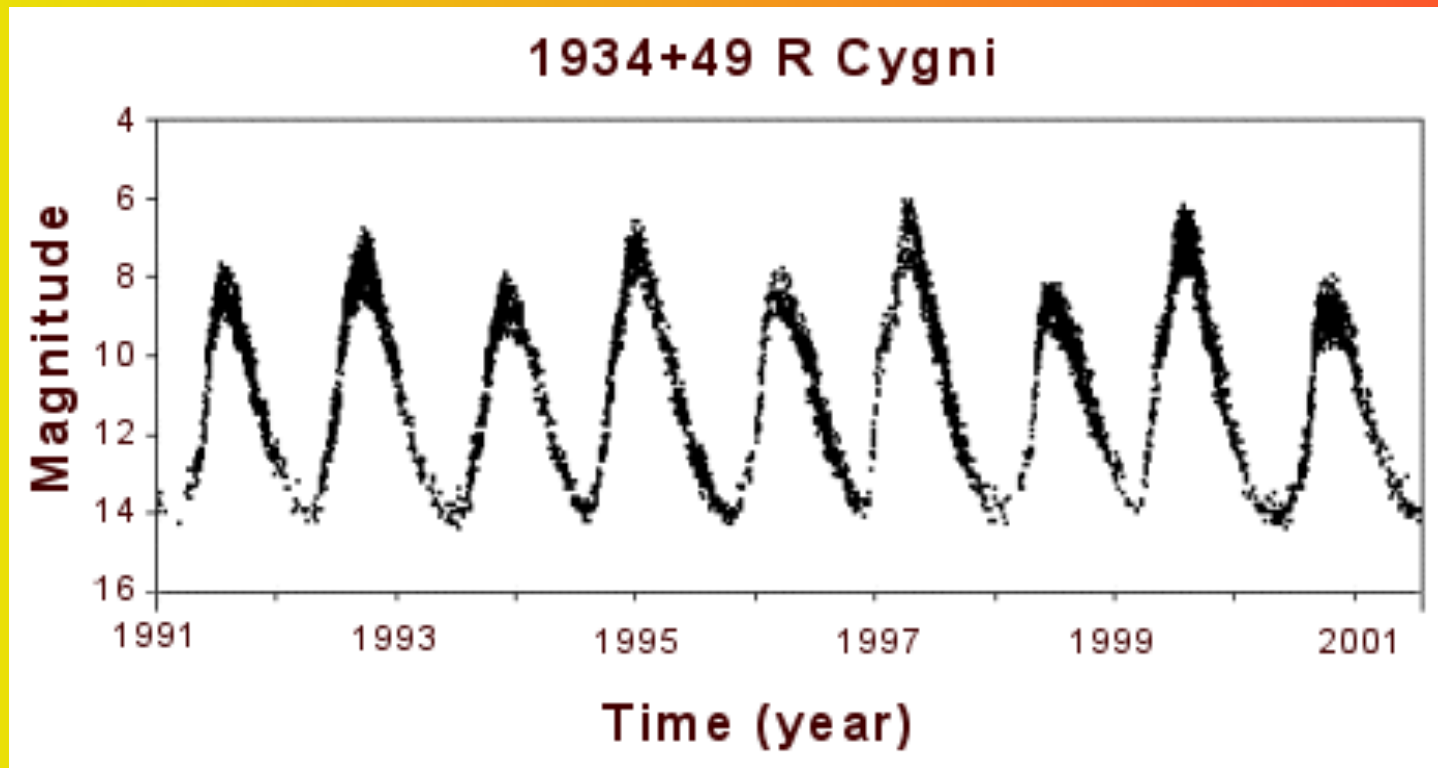


(Kiss et al., 2000, A&AS, 145, 283)

R Cygni: kaotikus pulzáció egy mira típusú változó-csillagban
(Kiss & Szatmáry 2002, A&A, 390, 585)

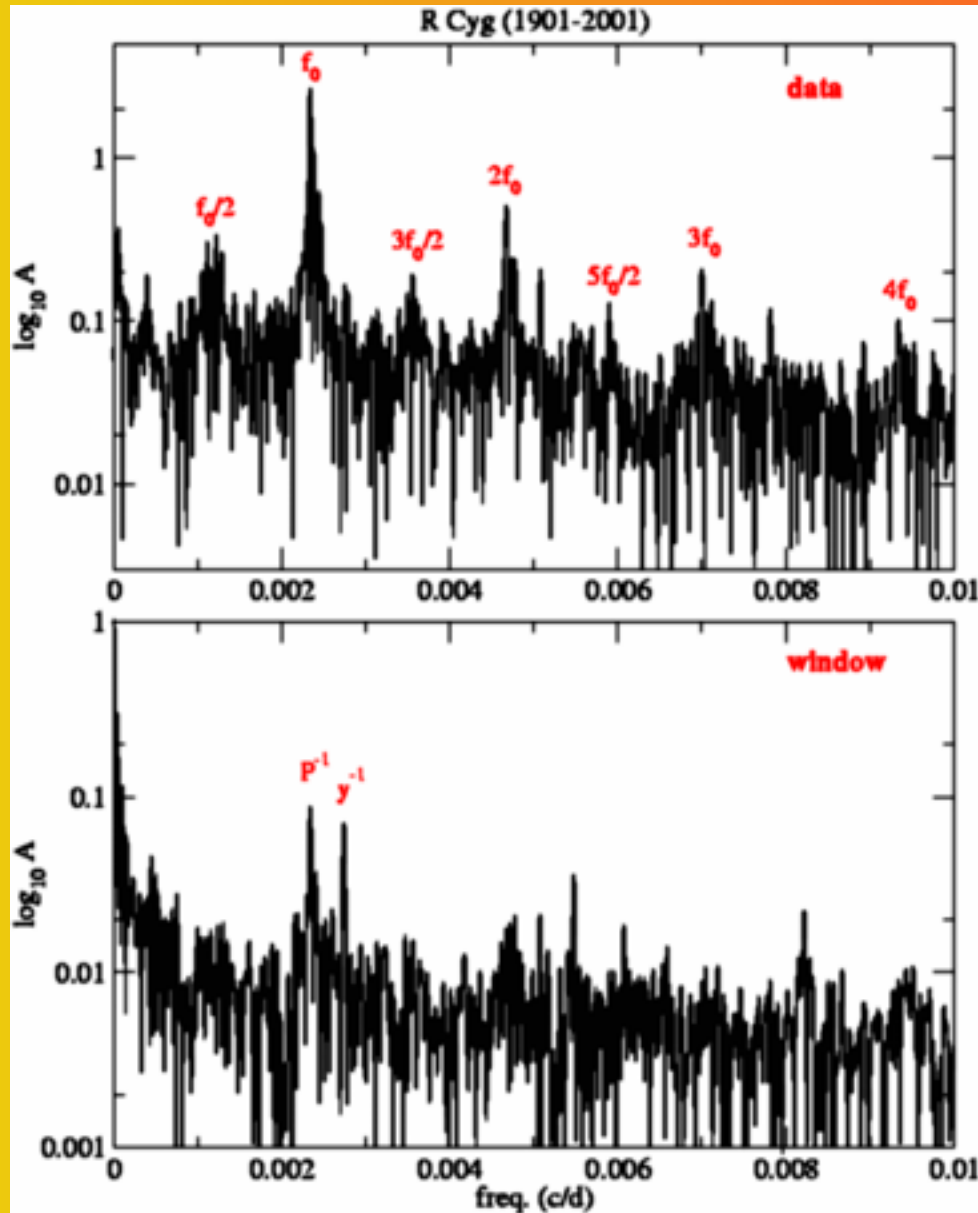


Változó maximumok: mennyi is a valódi periódus?

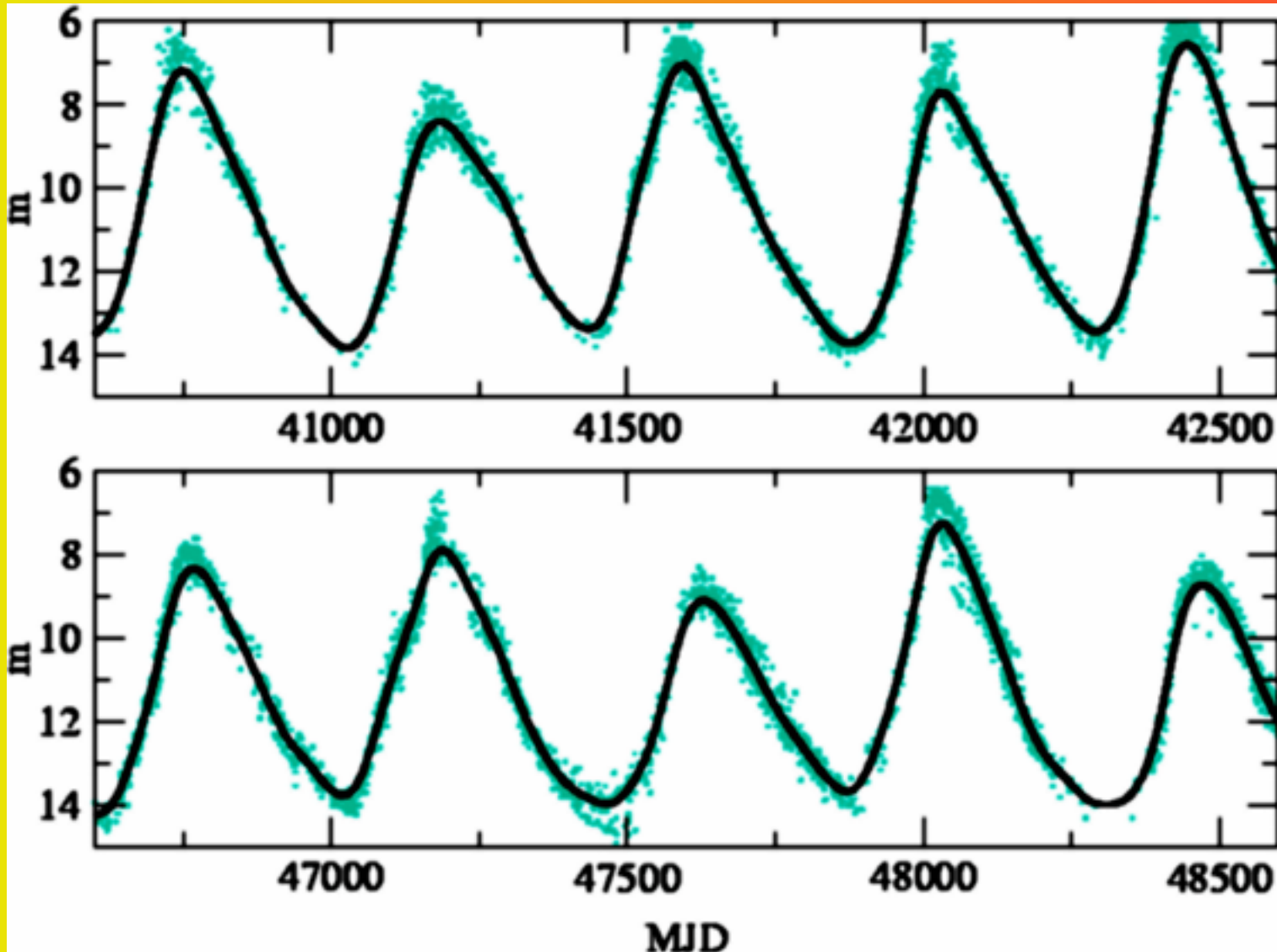


(<http://www.aavso.org>)

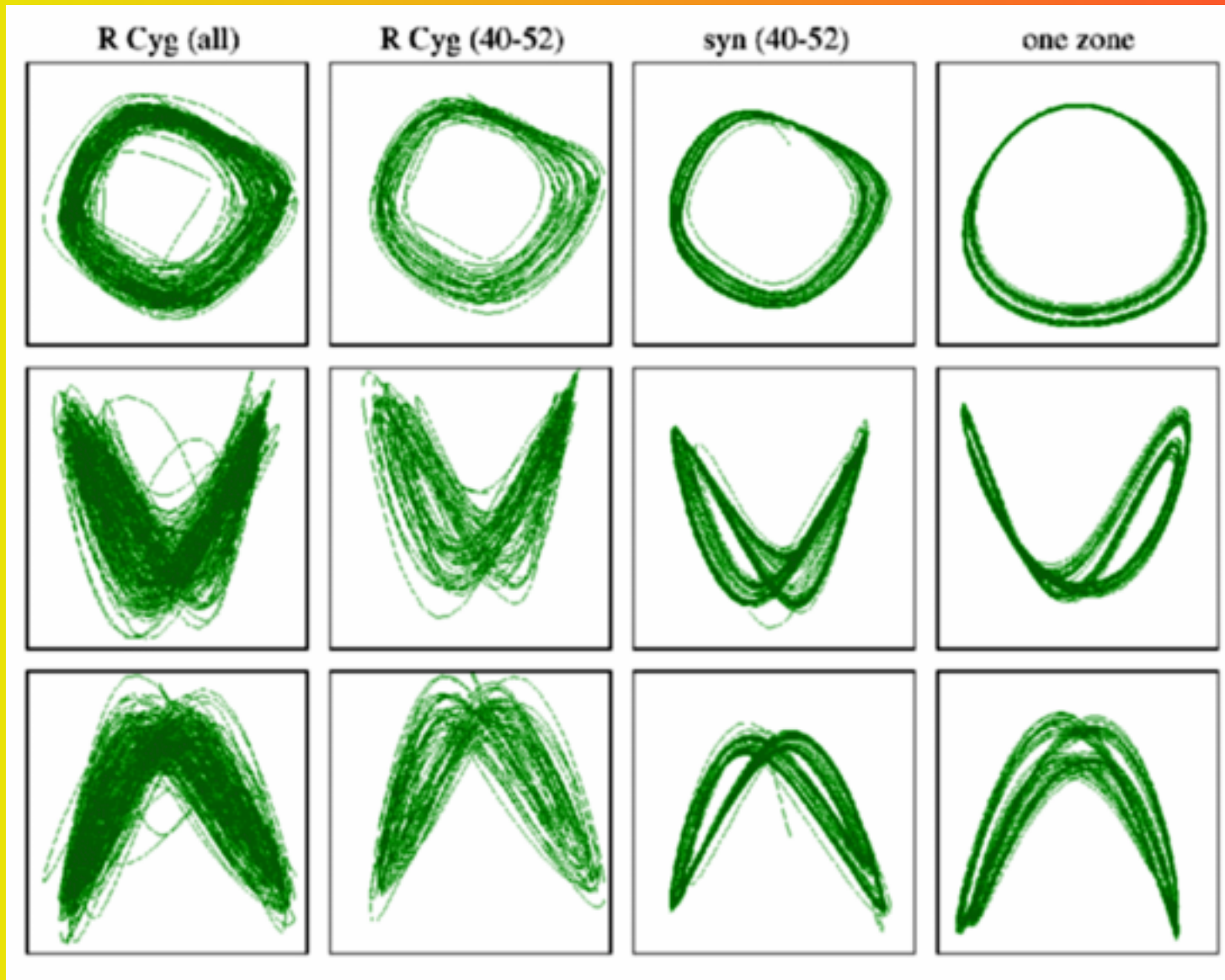
R Cyg: szubharmonikus komponensek a Fourier-spektrumban



Az adatok zajszűrése:



A négydimenziós rekonstruált fázistérbeli trajektóriák vetületei



Figyelemreméltó hasonlóság egy ismert kaotikus rendszerrel (“one zone”)!

R Cygni - matematikai összefoglalás

- a fázisportrék meglepően szabályos szerkezetűek; az optimális beágyazási dimenzió 4
- a legnagyobb Ljapunov-exponens pozitív, értéke $\lambda = 0.00244$ d^{-1} , azaz a rendszer egyértelműen kaotikus
- a fázistérbeli trajektóriák a perióduskétszerező bifurkáció jeleit mutatják; a rezgések egy periódus 2 határciklus közelében történnek
- a csillag viselkedését nagyon jól leírja egy harmadrendű differenciálegyenlettel leírt egyzóna modell:

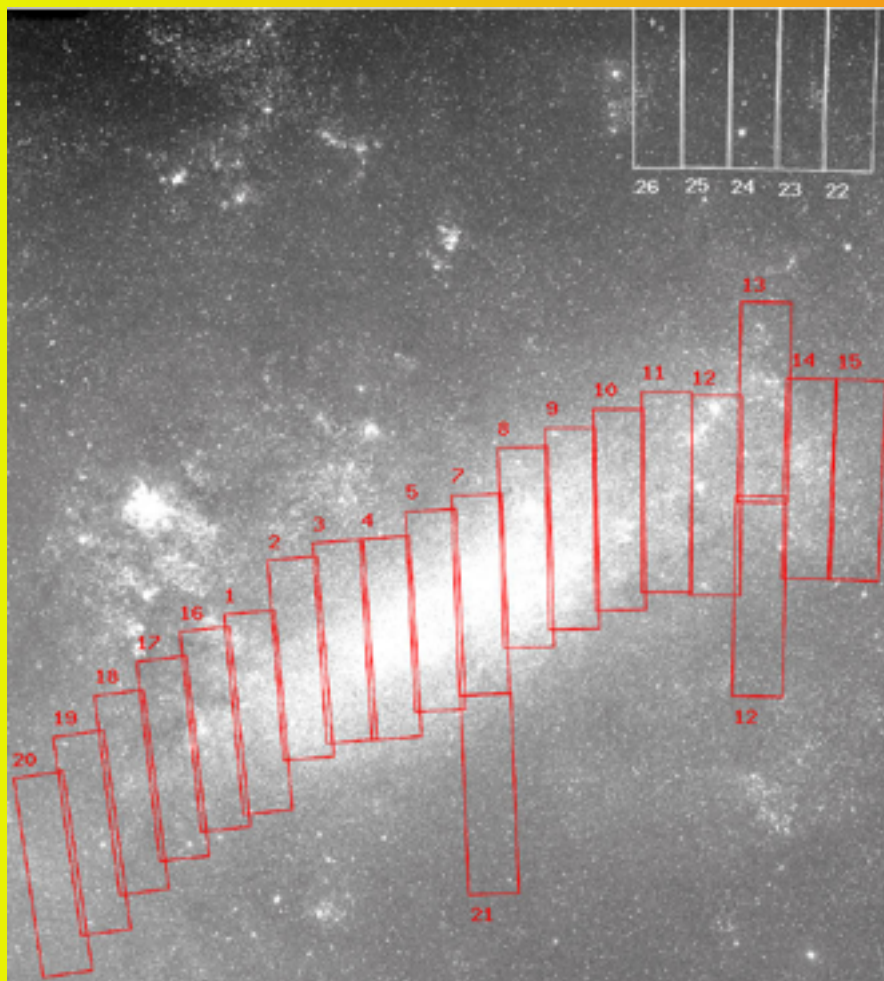
$$x''' + Kx'' + x' + K\mu x(1 + \beta x) = 0 \quad (1)$$

R Cygni: asztrofizikai következtetések

- a legelső mira típusú csillag kaotikus pulzációval (korábban néhány mira, nem egyértelmű eredmények)
- a fényváltozást nem lehet pontosan előrejelezni 10^{-1} -nál hosszabb időre, azaz kb. egy pulzációs periódusnyira
- a vörös óriás **nagyon összetett** szerkezete ellenére maguk a rezgések **nagyon egyszerű** fázistérben történnek, melynek becsült dimenziója 4.
- a látszólag szabálytalanul torzult fénygörbét valószínűleg két normál módus nemlineáris csatolása okozza.
- fontos kérdések: mi okozza a vörös óriások kaotikus viselkedését? hogyan lehet ezt asztrofizikai paraméterek meghatározására alkalmazni?

A “statisztikus asztroszeizmológia” alkalmazásai

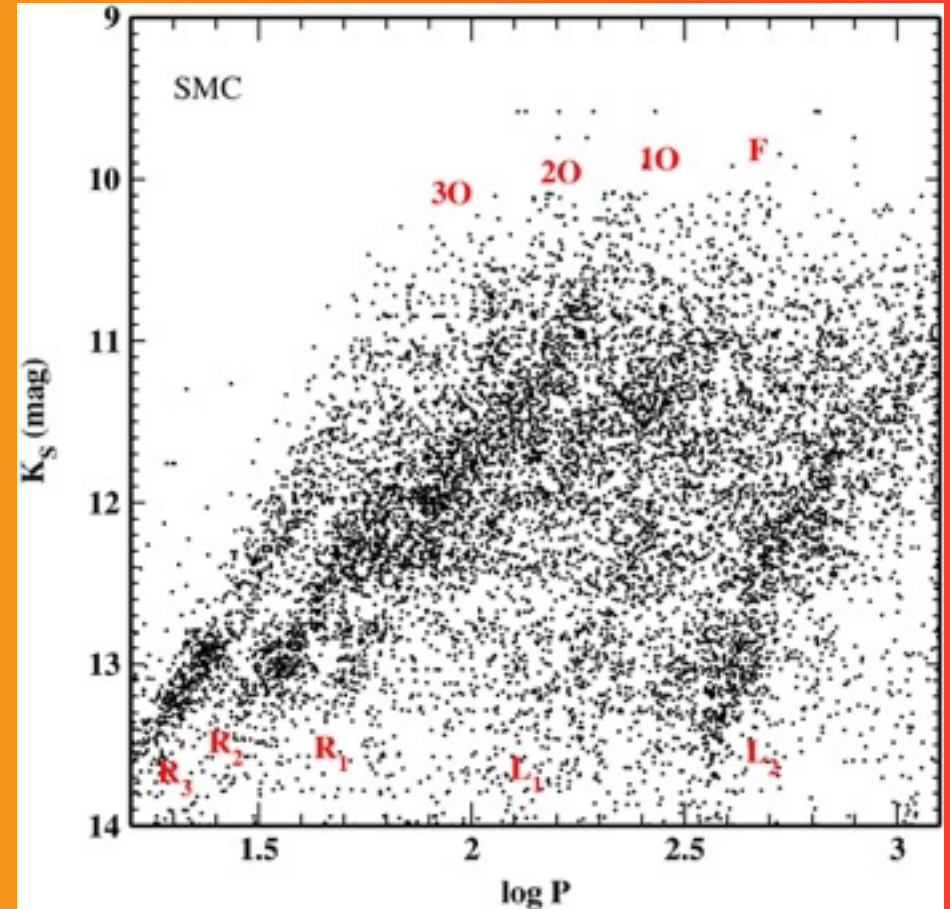
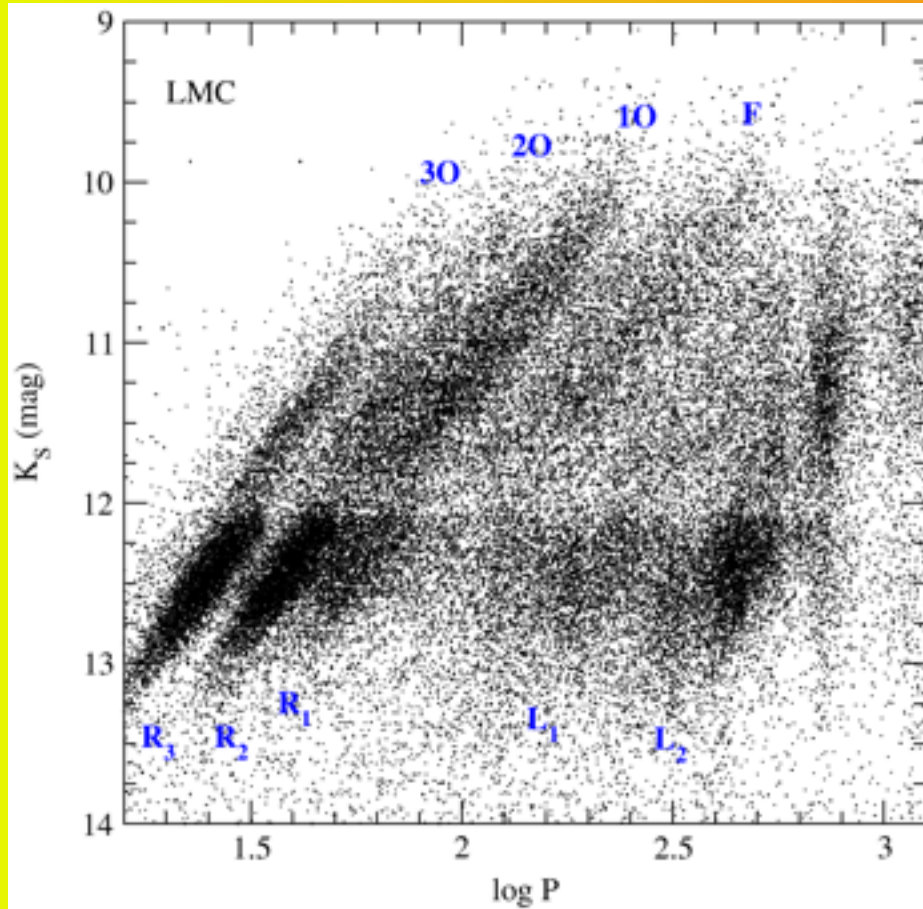
OGLE-II projekt: mikrolencse-jelenségek vadászata a Magellán-felhők és a galaktikus dudor irányában



OGLE-II látómezők az LMC-ben

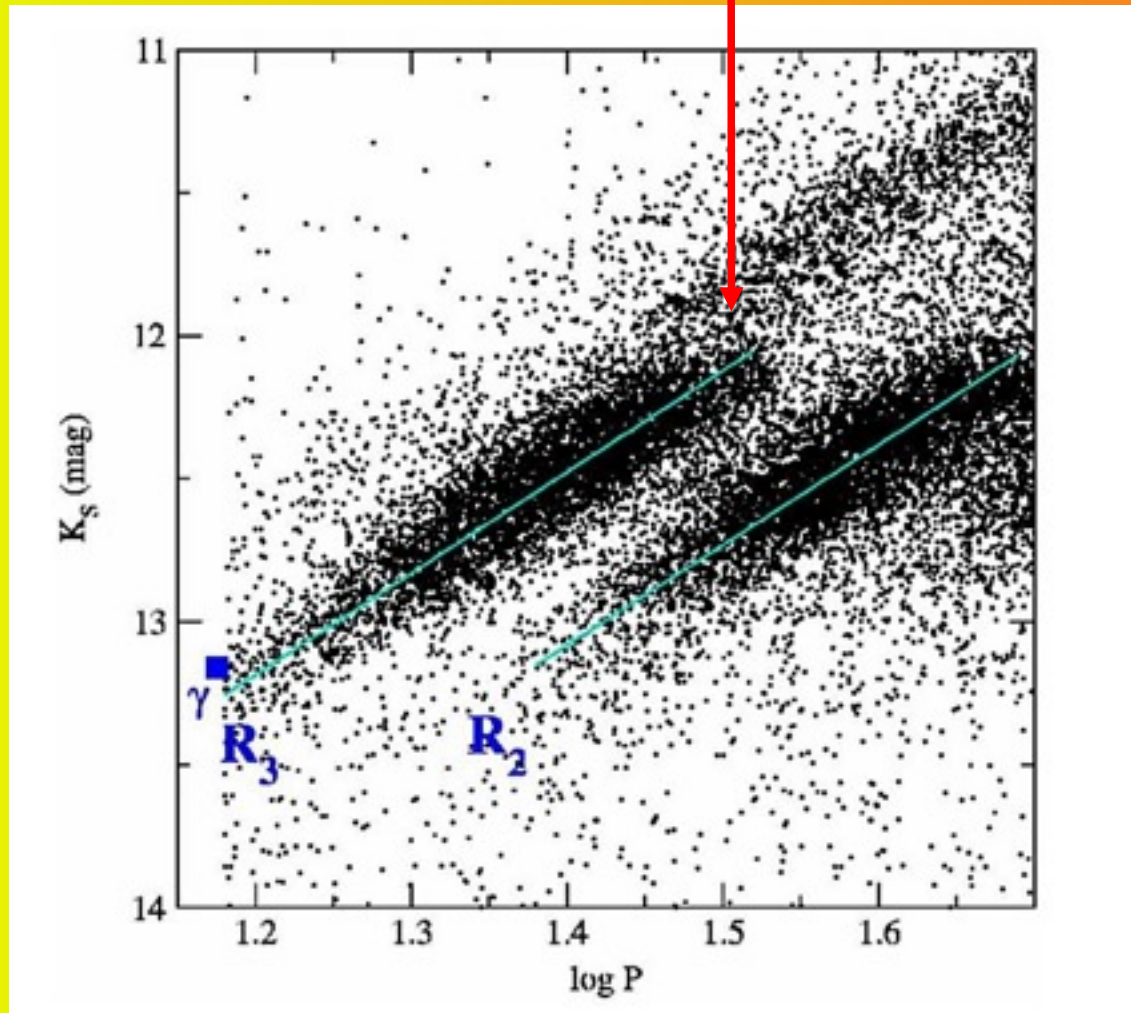
- 1997 - 2000: 21 mező az LMC-ben, 11 mező az SMC-ben
- 1,3m Warsaw-teleszkóp, Las Campanas, Chile
- I-sávban (900 nm) 20 millió csillag mérése
- 68000 változócsillag pontos fénygörbékkel
- Zebrun et al. (2001): az összes fénygörbe-adat publikus (2 GB)

Új struktúrák: több elkülönülő szekvencia, éles határ az első vörös óriáság tetejénél

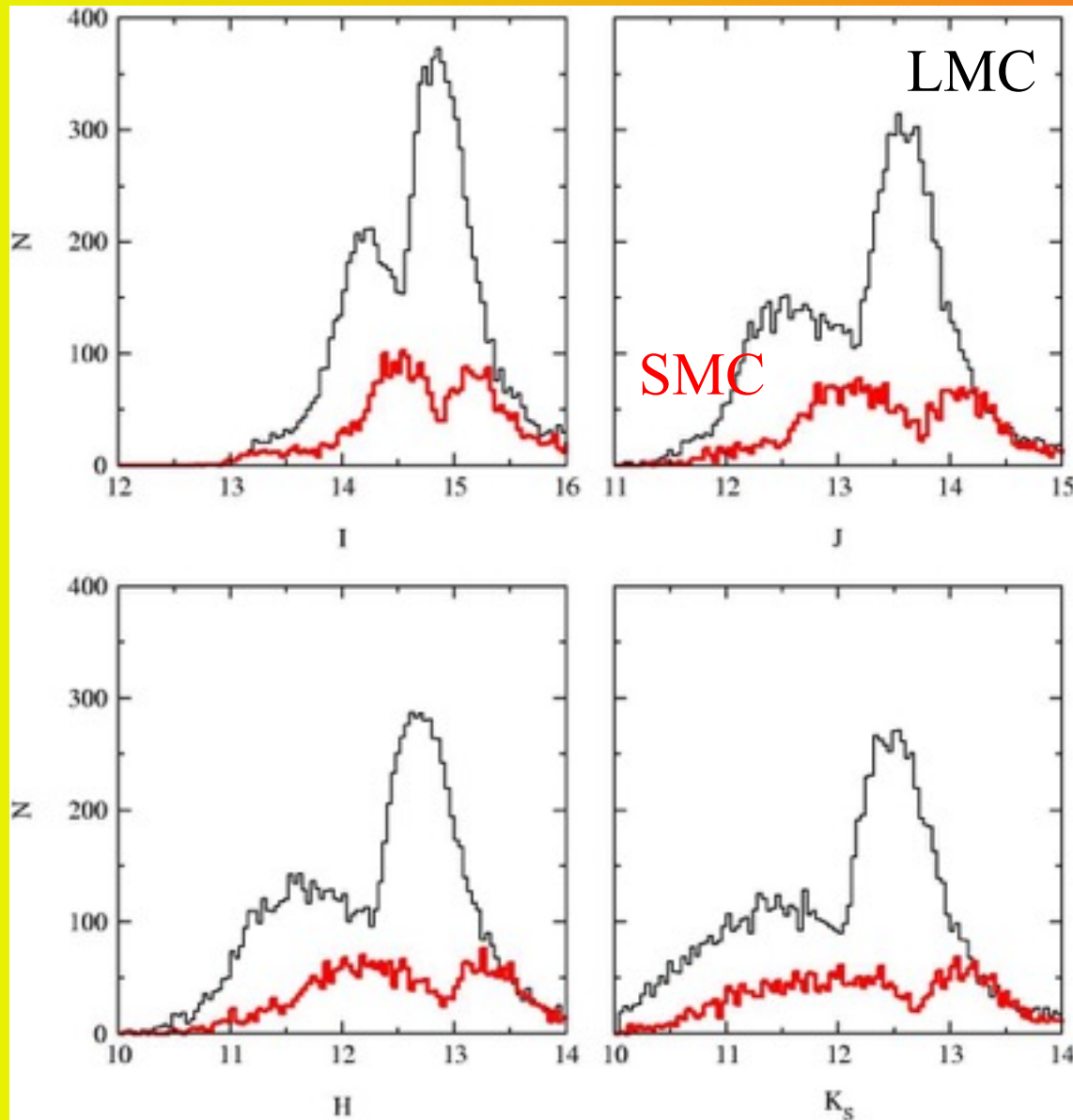


(Kiss & Bedding 2003, 2004)

perióduscsozás az RGB tetejénél (TRGB)
RGB/AGB hőmérséklet-különbség

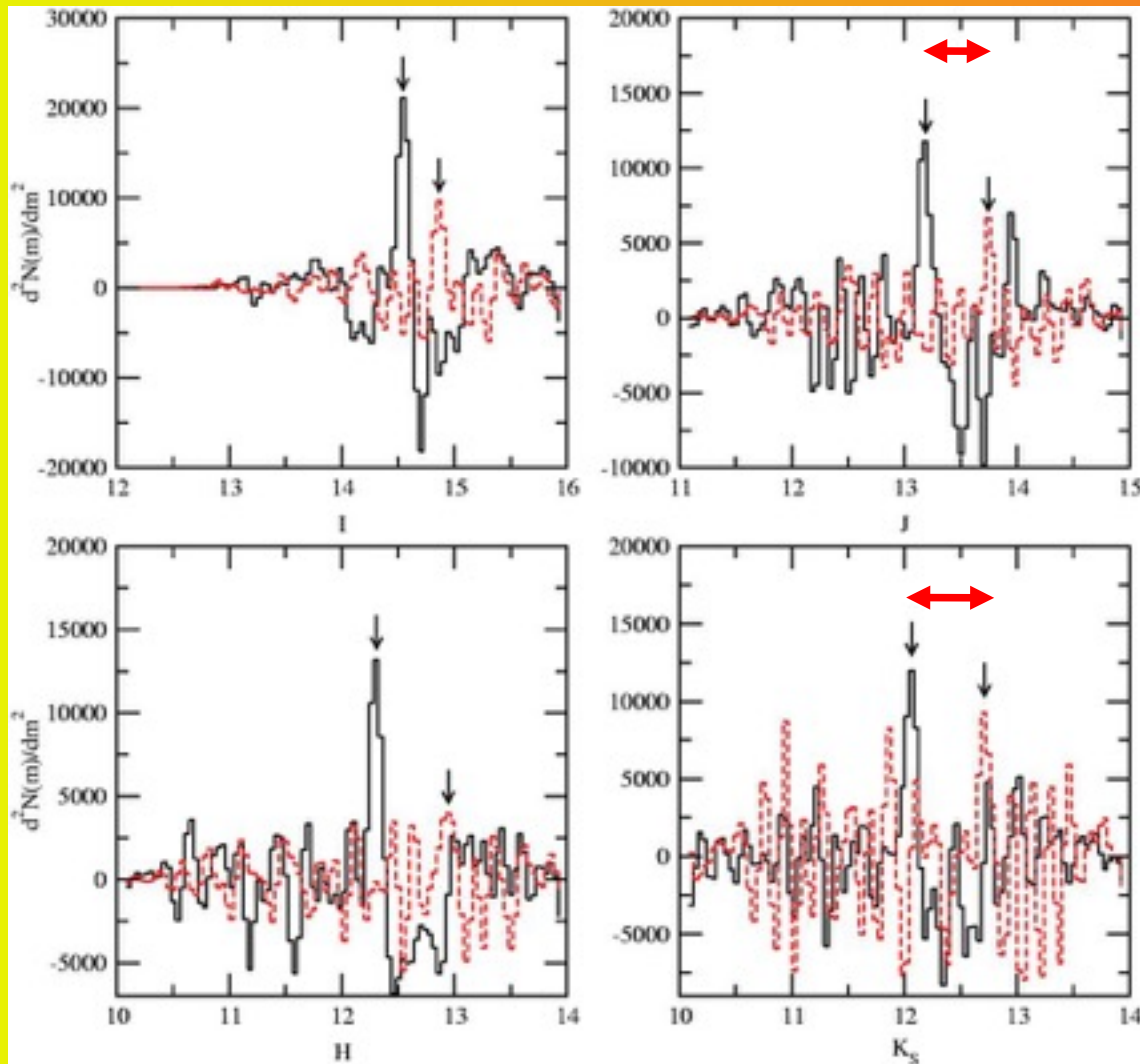


OGLE-II vörös óriás változók luminozitásfüggvényei...



(Kiss & Bedding 2004)

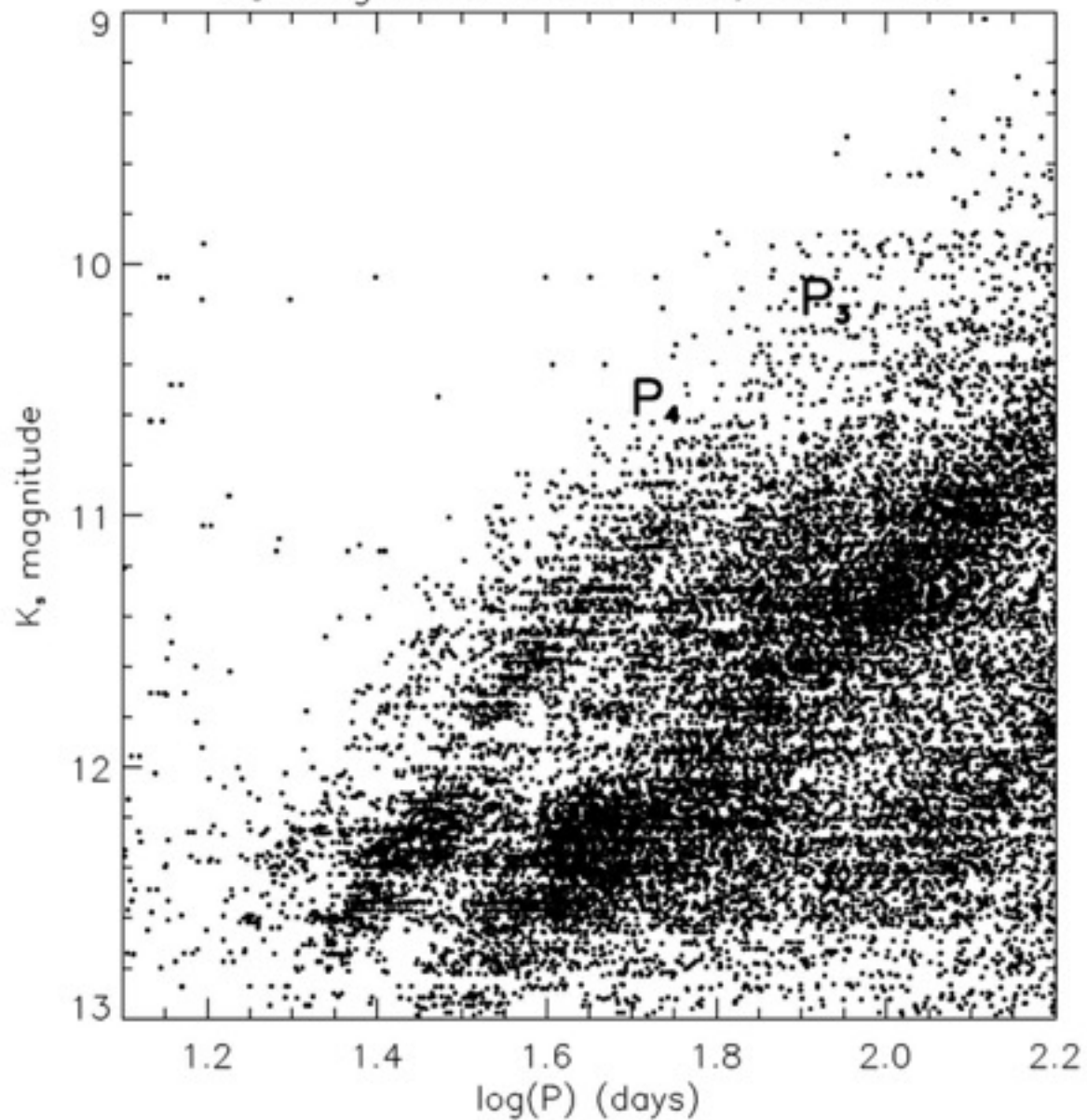
...és azok második deriváltjai.



$mag(?) \sim TRGB(GC)$

(Kiss & Bedding 2004)

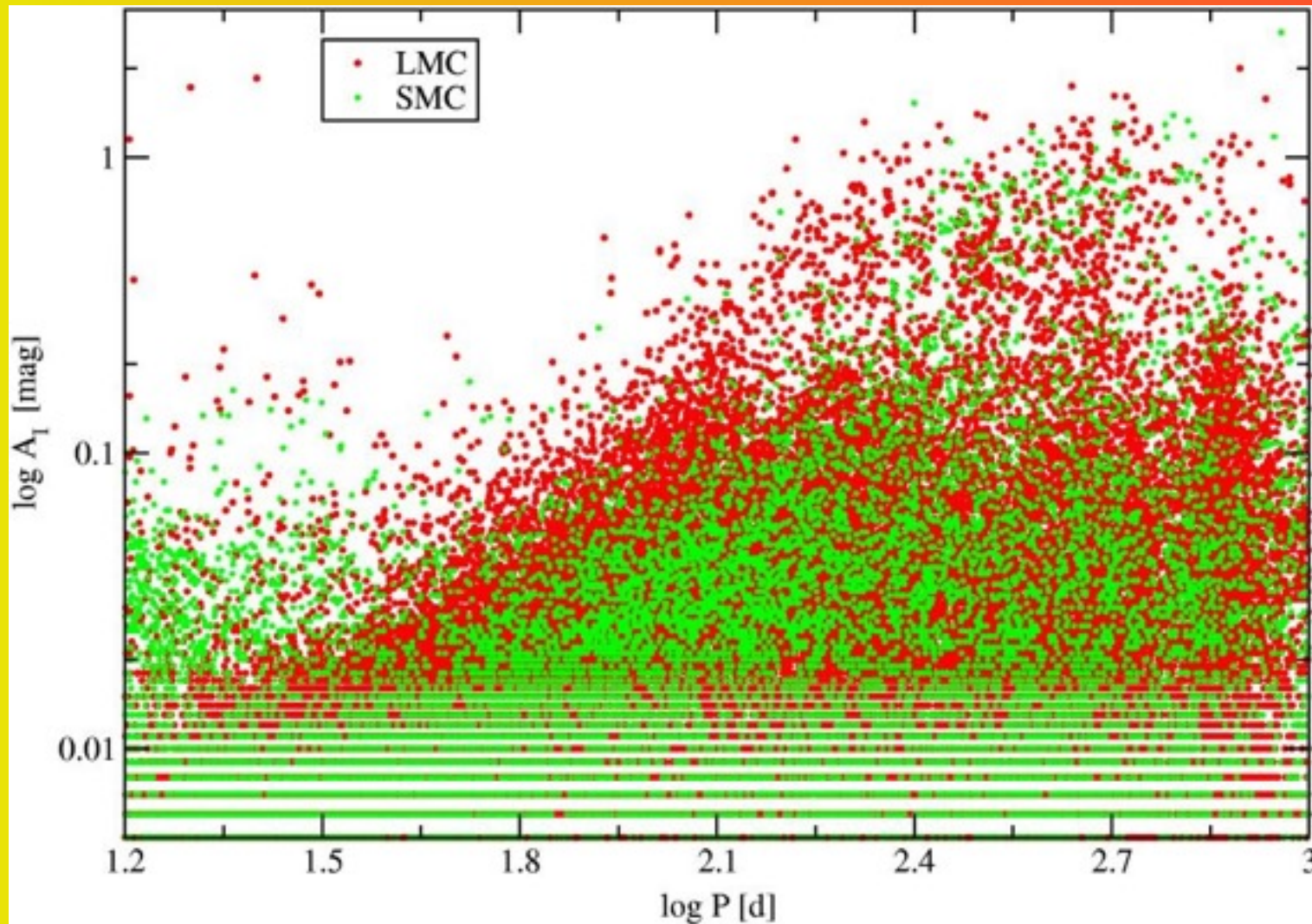
K_s magntiude vs. Period, $\text{SNR} \geq 2$



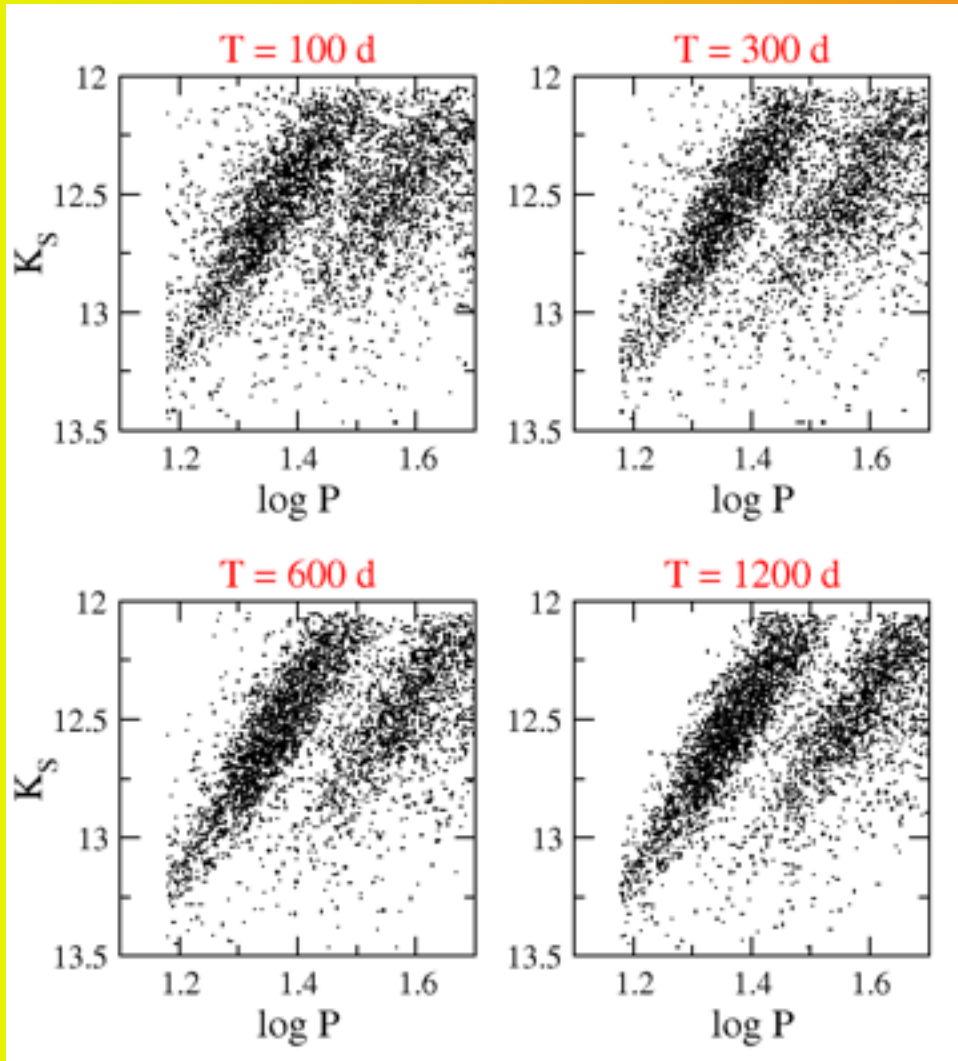
Kiss & Lah (2006)

Hol van az akusztikus határfrekvencia?

Periódus–amplitúdó-relációk az OGLE-II mintában



Galaktikus szerkezet vörös óriás P–L-relációkból

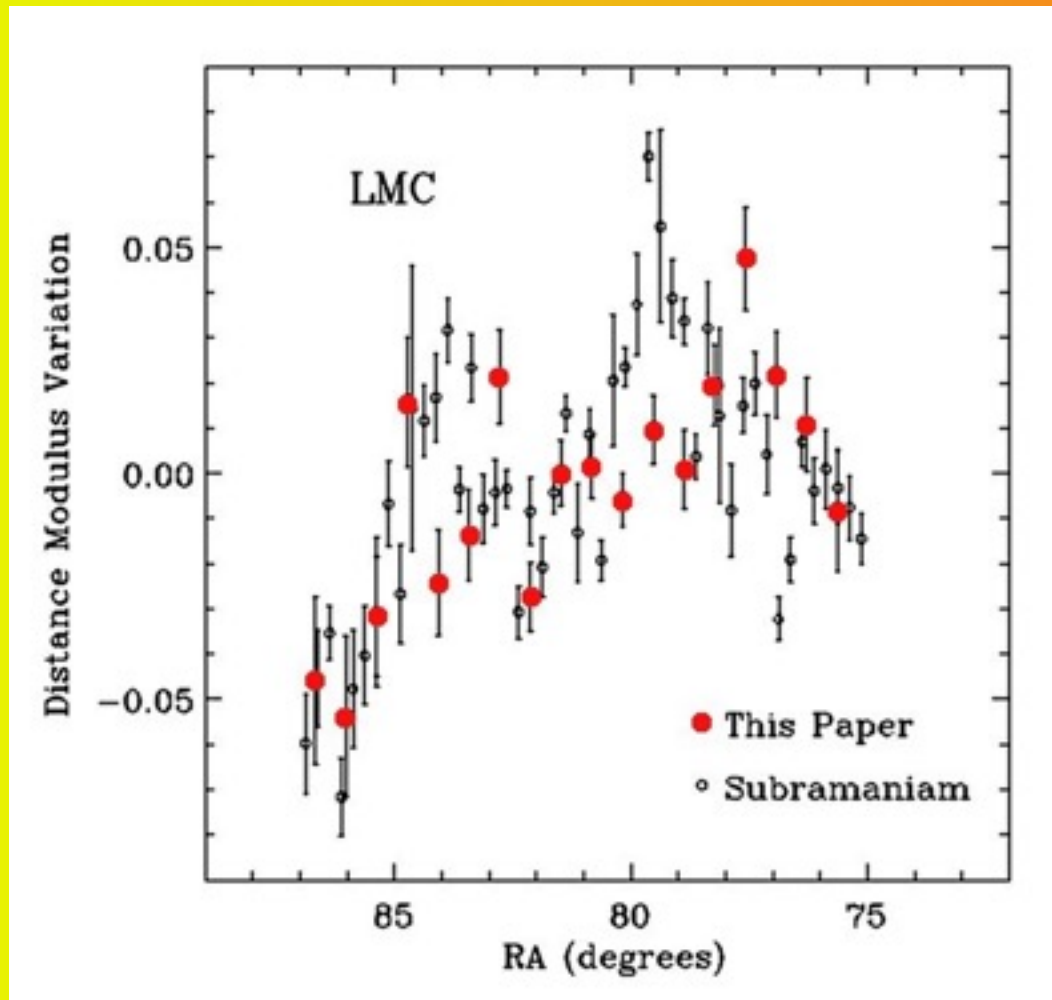


K.: Mekkora a P-L-relációk természetes szélessége?

V.: A TRGB alatt, ill. a legrövidebb periódusú szekvenciákra az OGLE-II magában felbontotta a relációkat.

Az LMC szerkezete: az átlagos P–L-relációktól mért távolságot feleltessük meg távolságmodulus-változásnak

4276 RGB csillag, két P-L-reláció alapján (s.d. 0.01-0.02 mag)



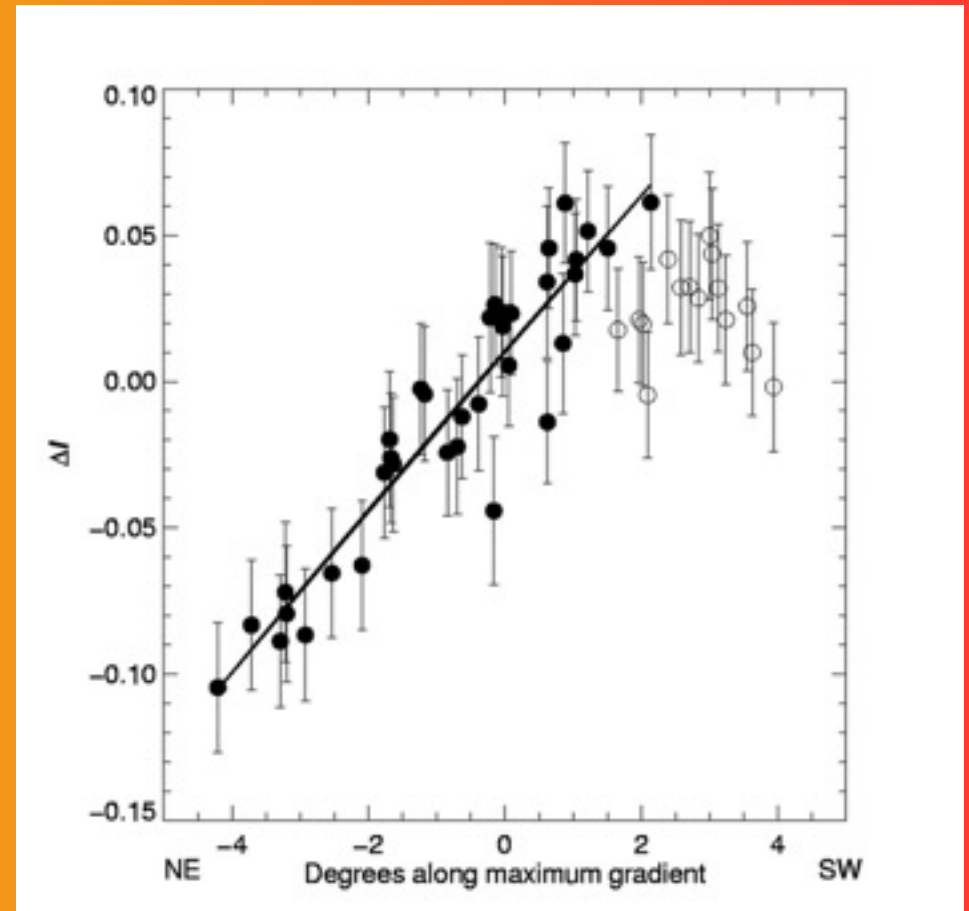
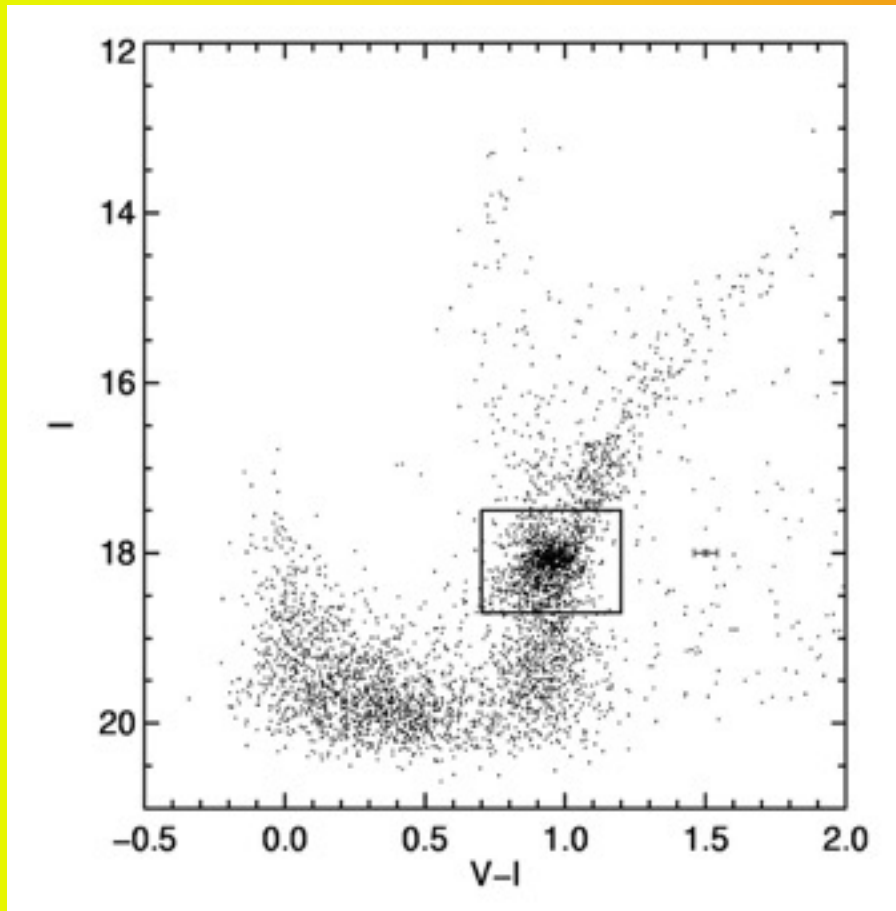
Subramaniam (2003):
a vörös csomó (red clump)
csillagai az OGLE-II adataiban



(megegyező LM)

(Lah, Kiss & Bedding 2005)

A vörös csomó fényességeloszlása (Olsen & Salyk 2002,
Subramaniam 2003)



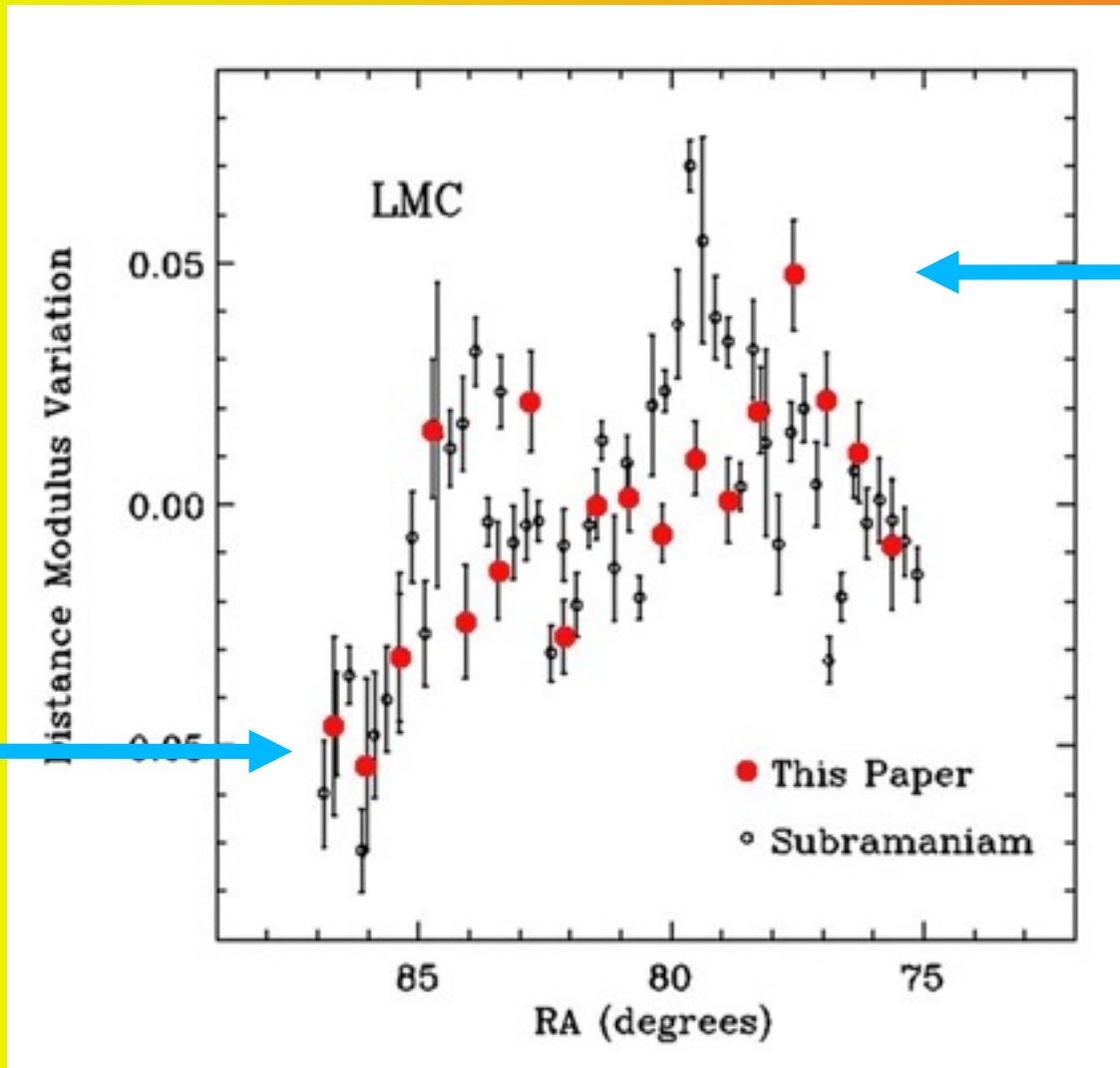
☐ (V-I): vörösödés

☐ I: távolság

Görbület a korongban?

LMC eredmények:

4276 RGB csillag, két P-L-reláció alapján (s.d. 0.01-0.02 mag)



$\square \square \approx 0.10$ mag

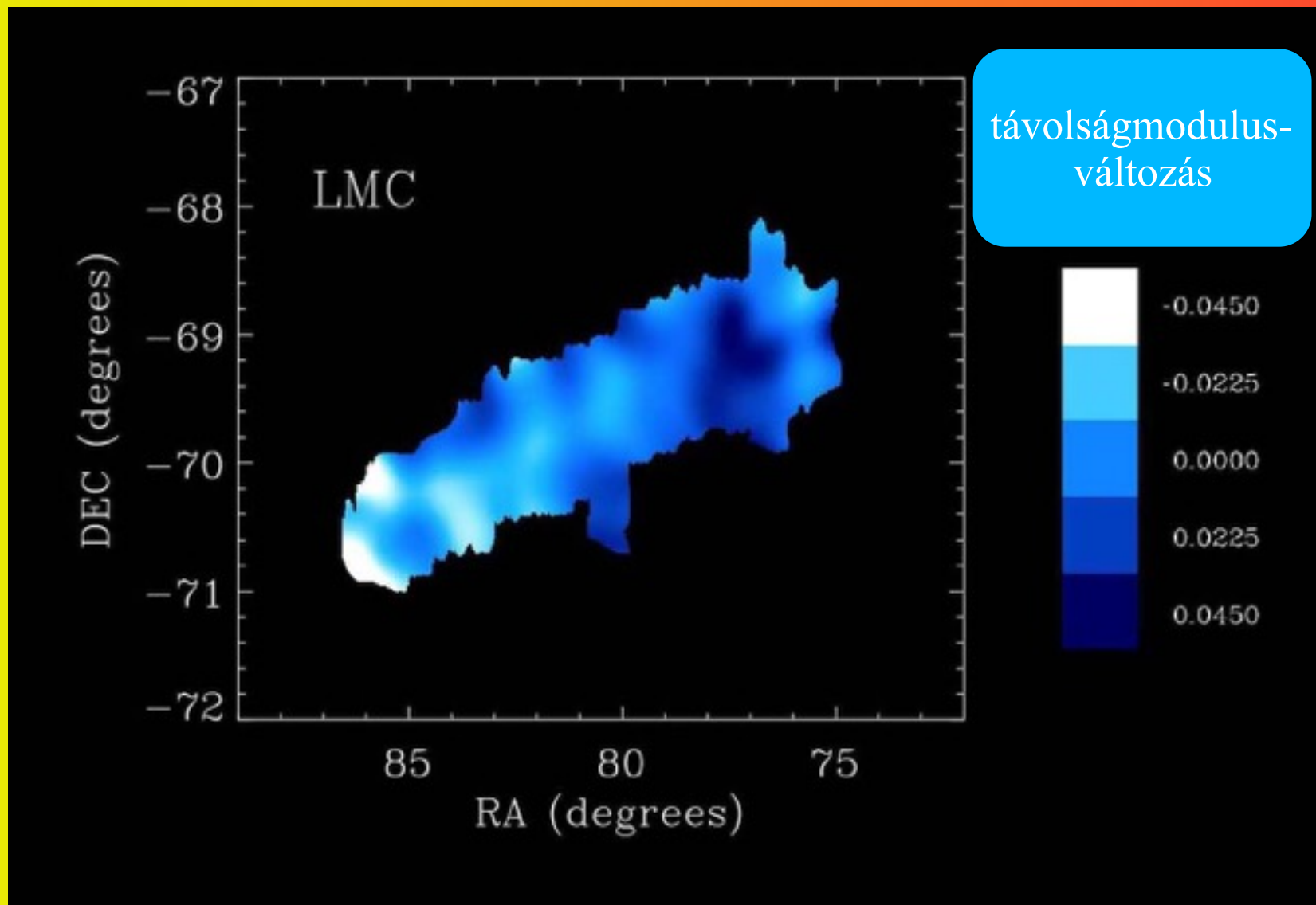
$\square d \approx 2.4$ kpc

$i \approx 29^\circ$

$(\square) = 18.50$ mag

(pl. Groenewegen 2000;
van der Marel & Cioni 2001;
Olsen & Salyk 2002;
Nikolaev et al. 2004;
Subramaniam 2003, 2004)

3-D ábrázolás



Köszönetnyilvánítás

- Szatmáry Károly, SZTE Kísérleti Fizikai Tanszék
- Tim Bedding (Sydney), Csák Balázs (Szeged), Hans Kjeldsen (Aarhus), Kolláth Zoltán (Budapest), Philip Lah (Canberra), Thomas Lebzelter (Bécs), John Percy (Toronto), Alon Retter (Penn State U.), Michael Scholz (Heidelberg), Brian Skiff (Flagstaff), Petr Sobotka (Brno), Szabados László (Budapest), Szabó M. Gyula (Szeged), Szatmári Sándor (Szeged), Székely Péter (Szeged), Vinkó József (Szeged), Peter Wood (Canberra)
- Mizser Attila, Tepliczky István, Sárneczky Krisztián, Kereszturi Ákos (MCSE)
- AFOEV, AAVSO, VSOLJ, BAAVSS
- MTA Bolyai János Kutatói Ösztöndíj, Magyar Állami Eötvös Ösztöndíj, OM FKFP 2001/10, OTKA F022249, T022259, T032258, T034615, F043203, T042509, Australian Research Council, Univ. of Sydney Postdoctoral Research Fellowship
- Derekas Aliz, Kiss Lajos és Kiss Eszter (1945. január 16. - 2004. február 14.)