

Pulzáló változócsillagok és megfigyelésük I.

9. Spektroszkópia, fotometria és adatelemzés

Sódor Ádám
Bognár Zsófia

ELTE – MTA CSFK CSI
2017.12.12.



Pulzáló vcsk megfigyelése

Idősor spektroszkópia – radiális sebesség-görbe, légköri paraméterek illetve a vonalprofil változásai

A spektrális felbontás

$$R = \lambda / \Delta\lambda$$

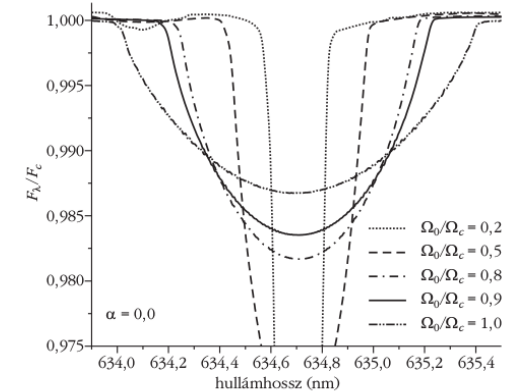
lehetőleg nagy ($> 30\,000$) legyen,
de leglább közepes ($> 10\,000$).

Radiális sebesség-felbontás

$$\Delta v = c / R$$

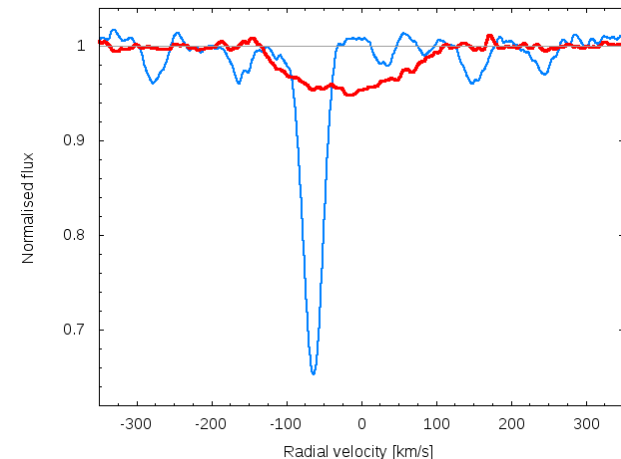
de az elérhető pontosság ennél lényegesen jobb lehet.

A radiális sebesség-információ a vonalprofil szélében van, ahol a legmeredekebben fut. Ezért a rotációsan kiszélesedett vonalakat kevésbé szeretjük.



5. ábra. A csillag forgásának hatása a vonalprofilra. A rotációs sebesség (Ω_0) a kritikus, azaz a szétszakadás nélkül még lehetséges legnagyobb rotációs sebességhez (Ω_c) viszonyítva (forrás: Zorec et al. 2011, *Astronomy and Astrophysics*, 526, 87).

Sódor 2015, *Fiz. Szemle*, 2015/1, 2



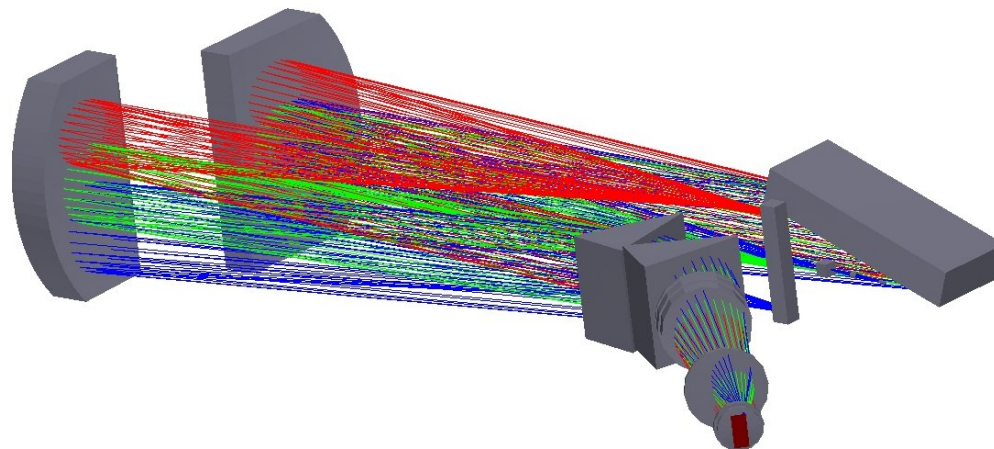
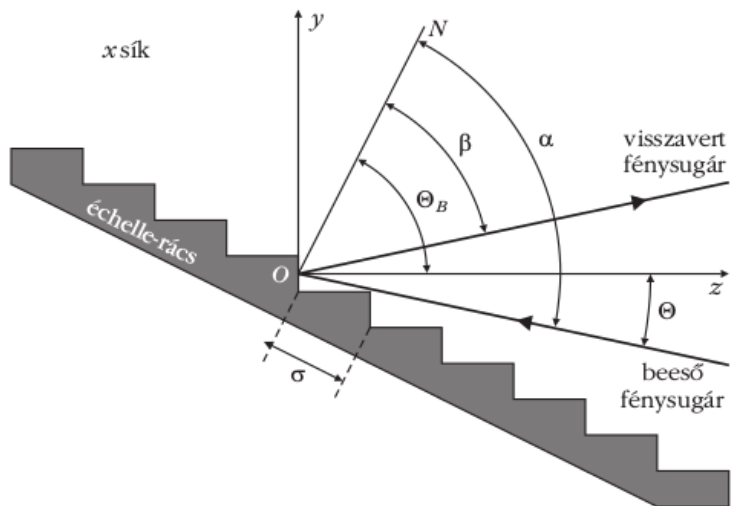
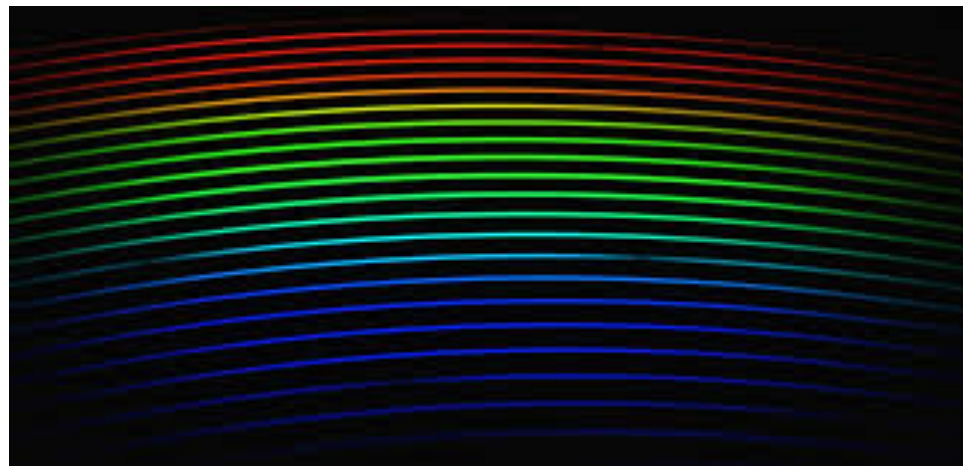
Nagyfelbontású spektroszkópia

Échelle-spektrográf

Az elsődleges diszperziós elem egy échelle-rács

Van továbbá egy kereszt-diszperziós optikai elem is, jellemzően prizma.

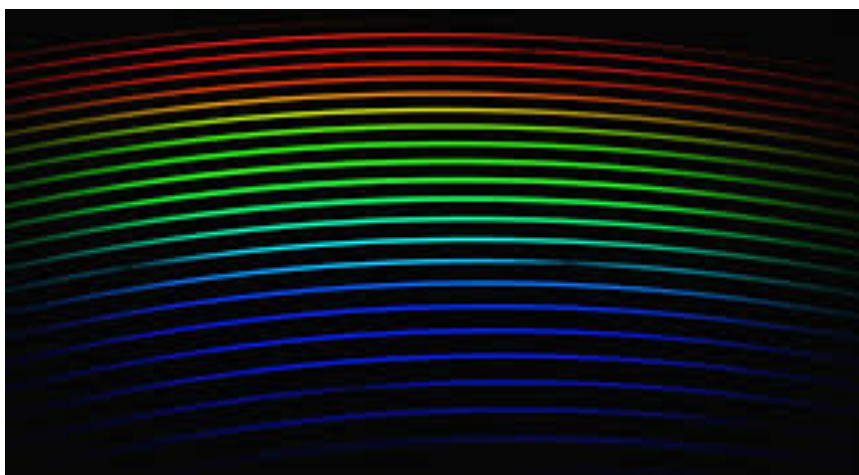
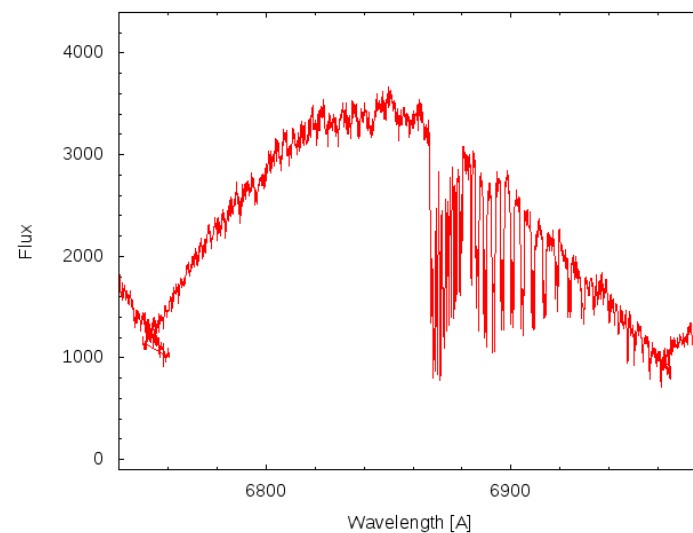
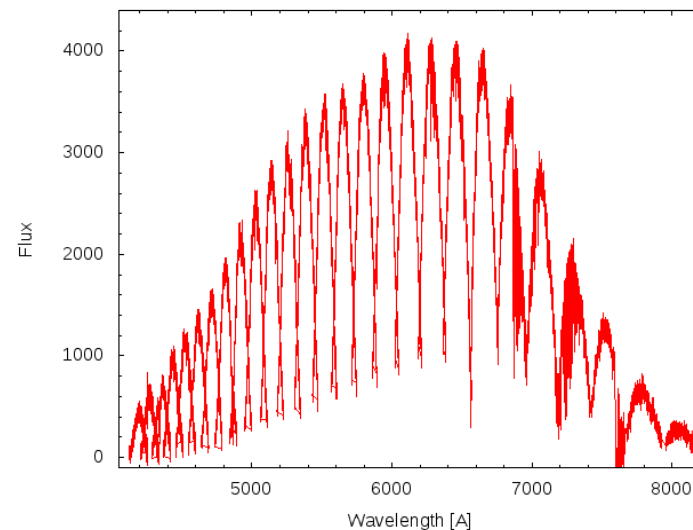
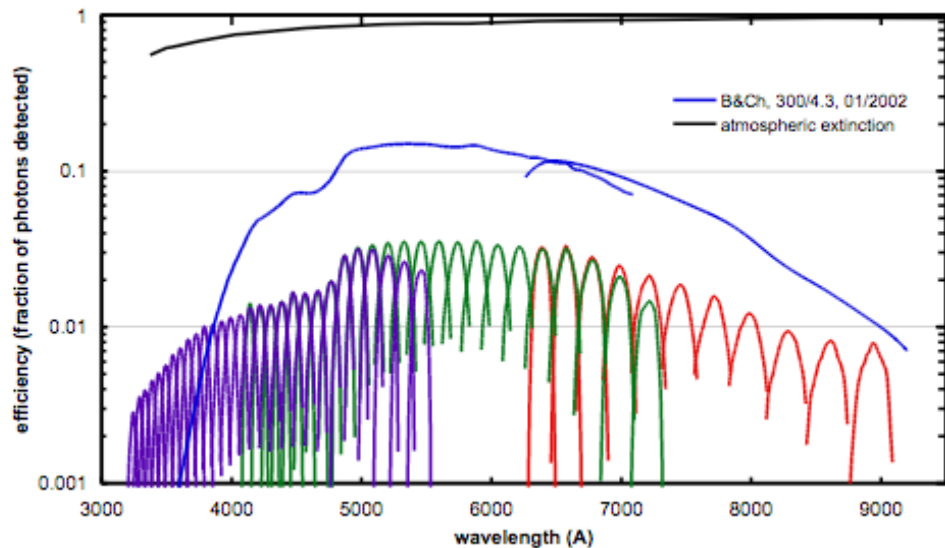
Magas interferencia-rendben működik, ez teszi lehetővé a nagy hullámhosszfelbontást.



Nagyfelbontású spektroszkópia

Échelle-spektrográf

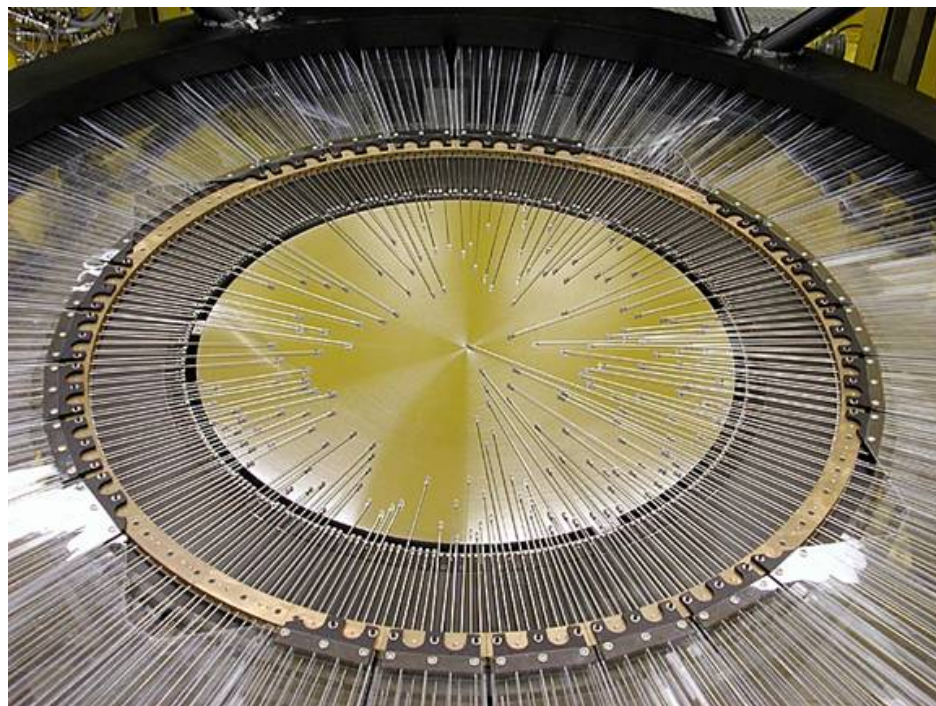
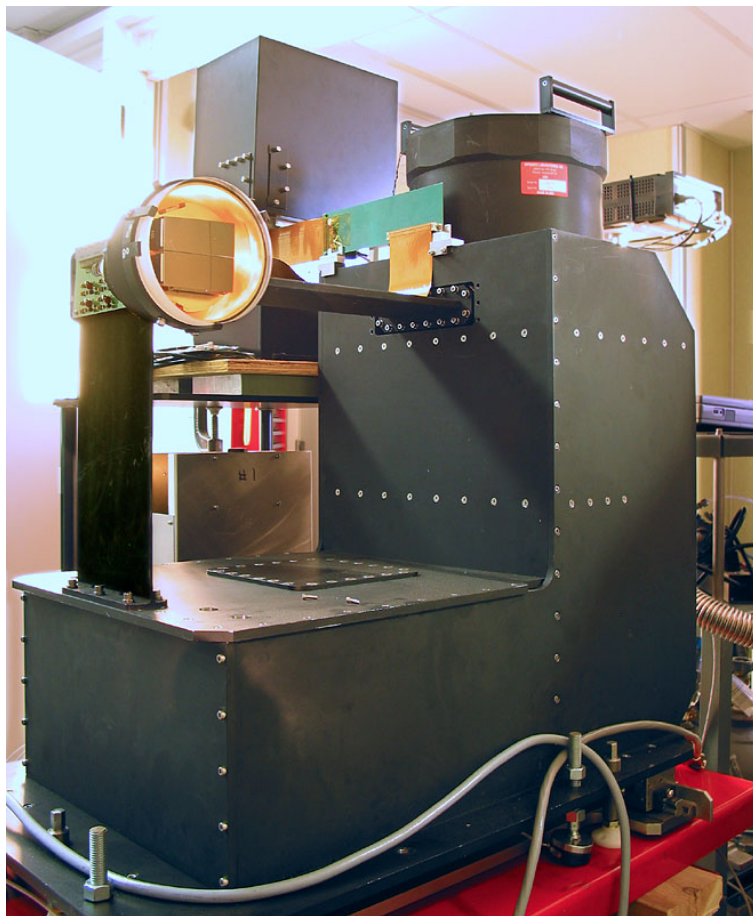
Blaze függvény és kvantumhatásfok



Nagyfelbontású spektroszkópia

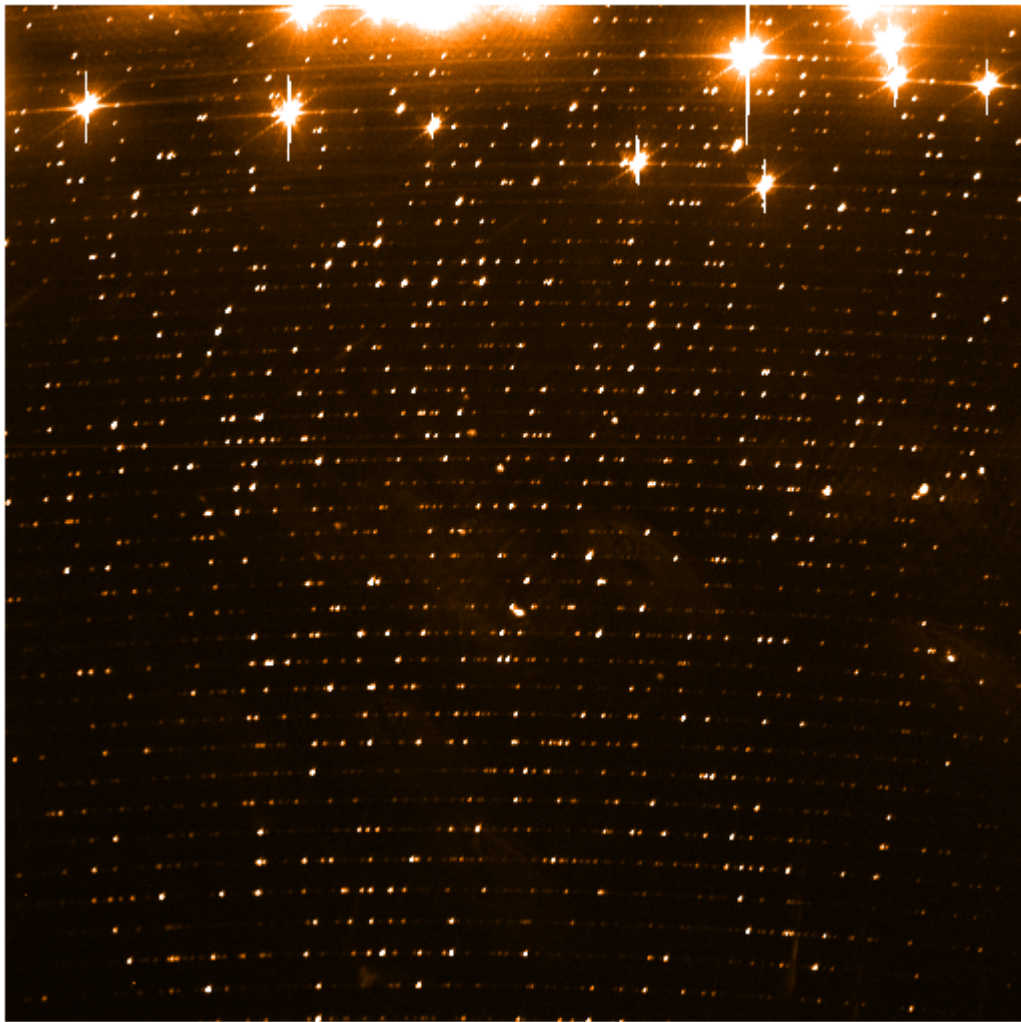
Multi-object échelle-spectrographs

PI: Hectochelle, MMT 6,5 m távcső, Arizona – üvegszálas táplálású egyetlen échelle-rend rögzíthető, de az ~200 csillagról egyszerre

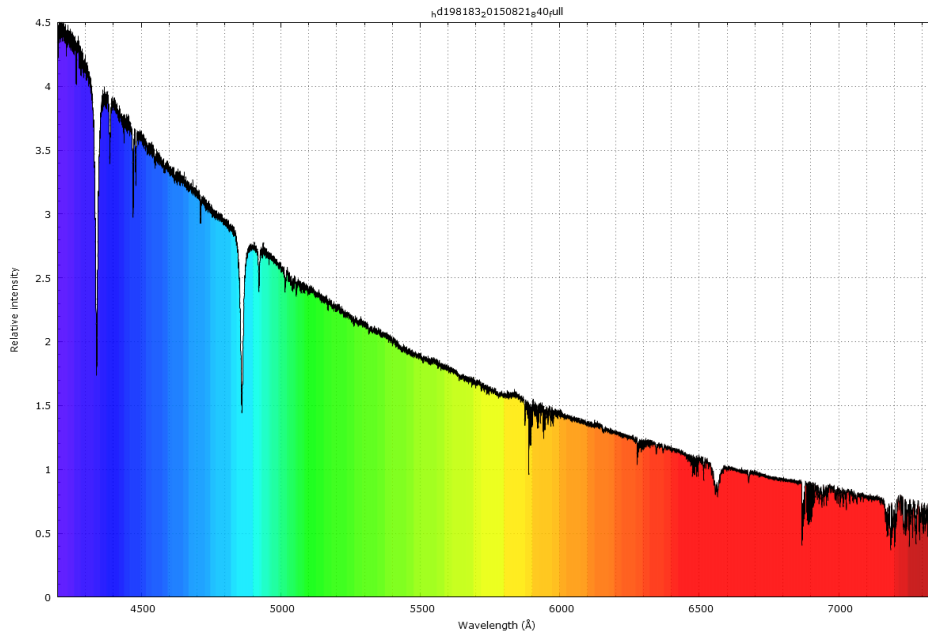


Hullámhossz-kalibráció

ThAr ívlámpáról készítünk spektrumot



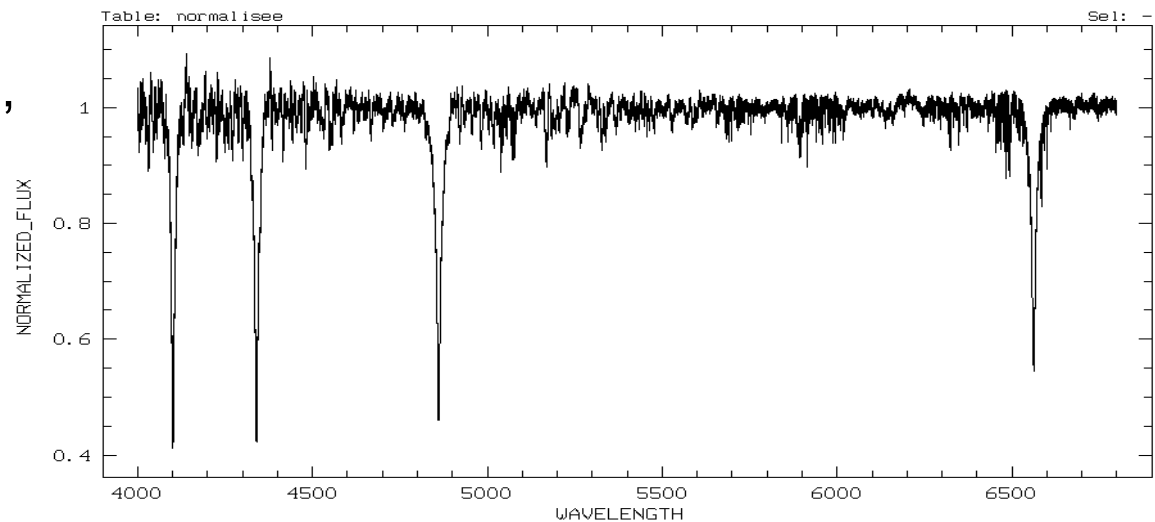
Intenzitás-kalibráció



Kalibrált – Körülményes.

Sztenderd csillagok spektrumainak segítségével végezhető el, de a légköri elnyelés hullámhossz-függése akkor is bekavarhat.

Normált – Egyszerűbb,
de azért ez sem
triviális: azonosítani
kell a kontinuumot.



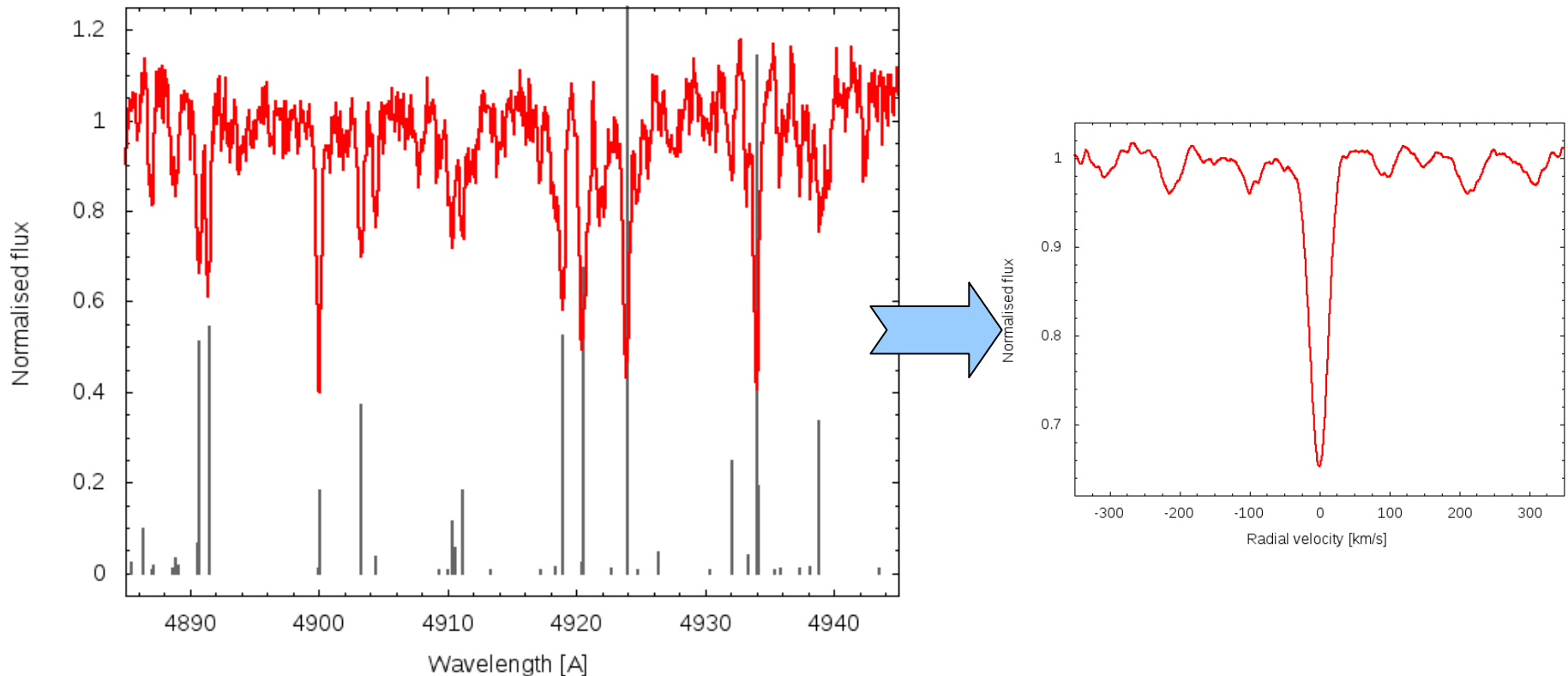
Átlagolt vonalprofil



CCF – cross-correlation function

A spektrumot (logaritmusos skálán) keresztkorreláljuk egy template-tel, ami lehet egy másik tényleges mérés, egy szintetikus spektrum, vagy egy vonallista (vonalerősséggel skálázott Dirac-delta függvények összege). A H (és gyakran He) vonalakat jellemzően kimaszkoljuk (kihagyjuk), mivel ezek profijla eltér a fémvonalakétól.

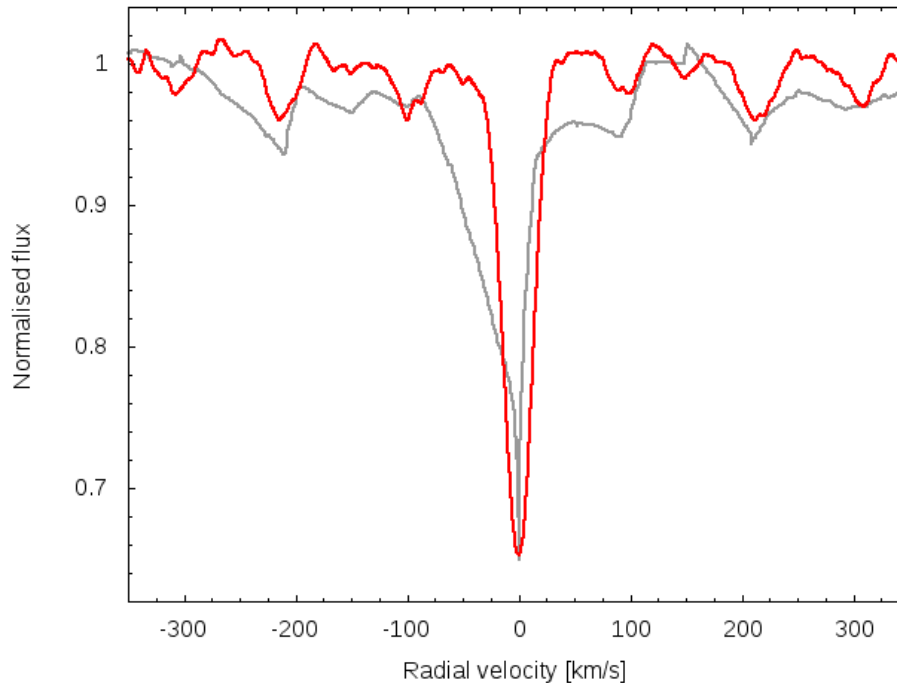
Így lényegében egy súlyozottan átlagolt vonalprofilunkat kapunk, aminek az eredeti spektrumnál 1-2 nagyságrenddel is jobb lehet a jel/zaj aránya.



Átlagolt vonalprofil

LSD – least-square deconvolution

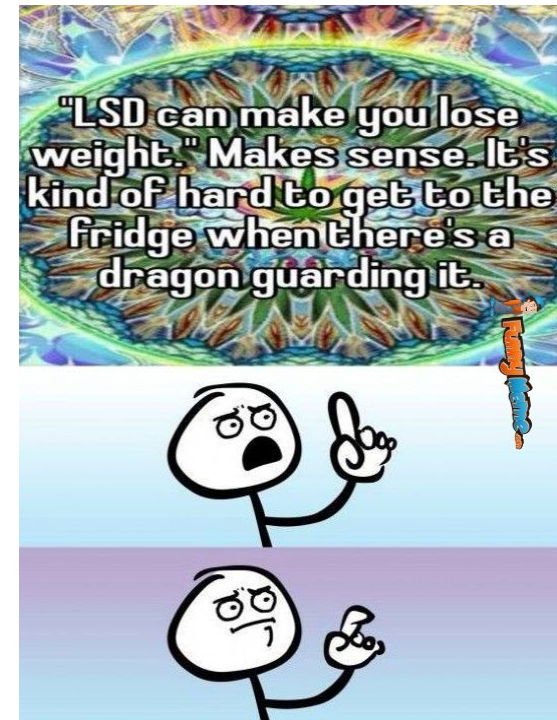
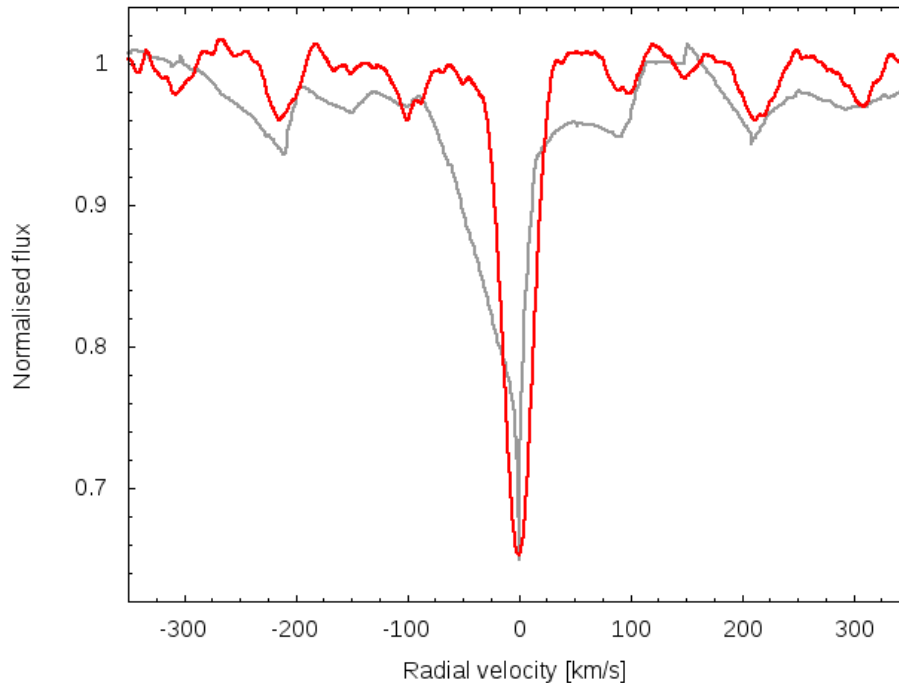
A keresztkorrelált vonalprofilban a nagyszámú átlagolás miatt ugyan gyengébben, de benne maradnak a blendek, vagyis az eredeti színeképvonalak környezetében lévő más vonalak. Ez a vonallistánkban is meg kell jelenjen: az önmagával vett autokorrelációs függvény mutatja. Ez dekonvolúcióval eltávolítható.



Átlagolt vonalprofil

LSD – least-square deconvolution

A keresztkorrelált vonalprofilban a nagyszámú átlagolás miatt ugyan gyengébben, de benne maradnak a blendek, vagyis az eredeti színeképvonalak környezetében lévő más vonalak. Ez a vonallistánkban is meg kell jelenjen: az önmagával vett autokorrelációs függvény mutatja. Ez dekonvolúcióval eltávolítható.

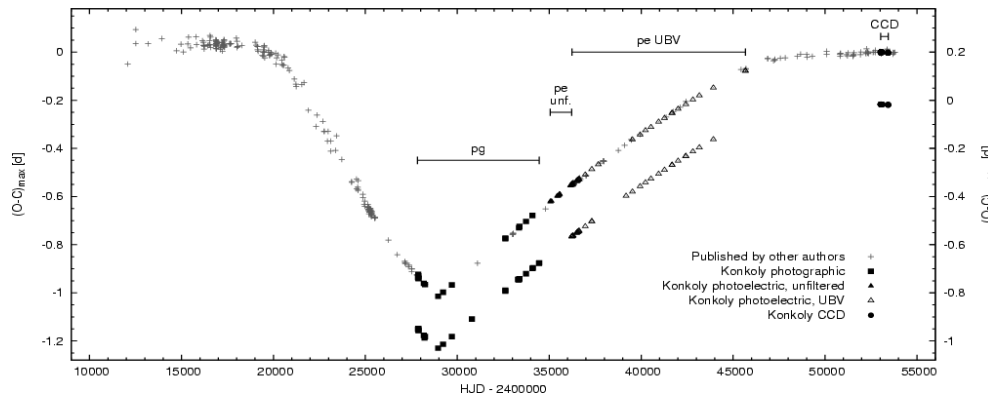


Mit kezdünk az adatokkal

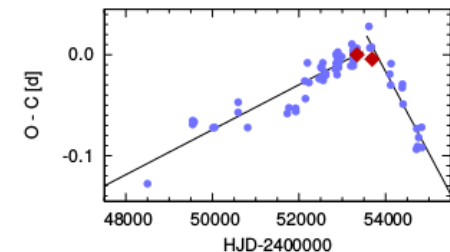
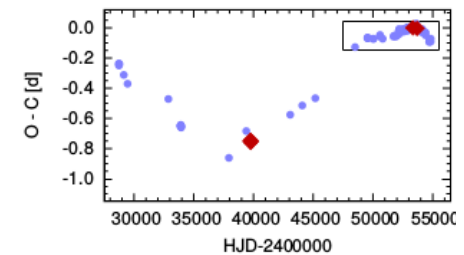
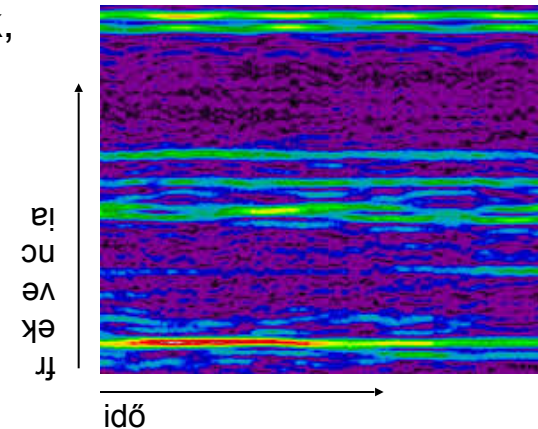
Fotometria

Egyszínű (single-band photometry)

- Frekvenciák, amplitúdók, harmonikusok, lineárkombinációk, frekvenciaarányok, rezonanciák, modulációk, félegészek, frekvencia- illetve periódusközök szabályosságai, ...
- Frekvencia- és amplitúdóváltozások:
Ha elég hosszú az idősor, akkor rövidebb szegmensekre bontva, illetve idő–frekvencia analízissel (wavelet transzformáció vagy hasonló), ez vizsgálható.
- Amplitúdóarányok és fázisviszonyok harmonikusok között:
RR Lyrae csillagok fizikai paramétereit.
- Hosszútávú változások: periódusváltozás, fázismoduláció (esetleg kettősség, fényidő-effektus)



Sódor et al. 2007, A&A, 469, 1033



Sódor et al. 2011, MNRAS, 411, 1585

Mit kezdünk az adatokkal

Fotometria

Többszín-fotometria (multicolour photometry):

– Nem idősor (single-epoch photometry):

a csillag elhelyezése a HRD-n – különbségtétel változócsillag-osztályok között.

– Idősor (time-series photometry):

Amplitúdóarányok és fázisviszonyok hullámsávok között: móduszazonosítás (csak l)
 Fiz. param. változásai, pl.: IPM - RR Lyrae csillagok változásai a Blazhko ciklusban.

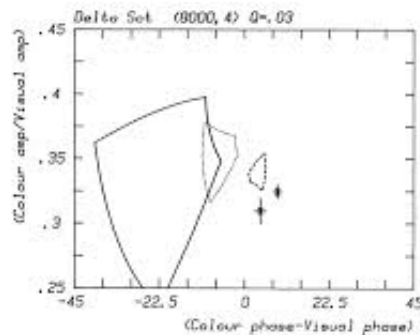
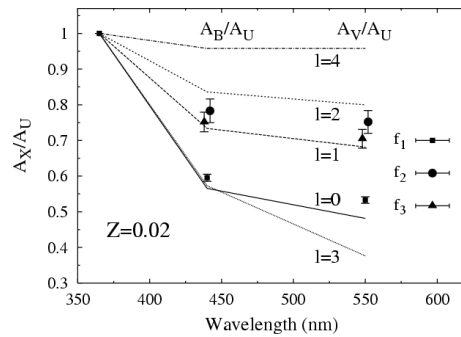
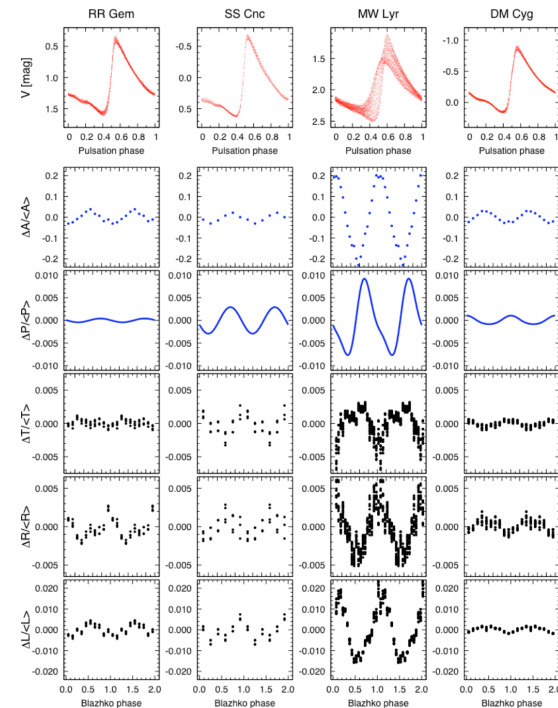


Fig. 20. Data for the star Δ Sct, from Table IV, compared with the areas of interest on the $(\phi_{p-\nu}, \phi_{p-\nu} - \phi_{\nu})$ plane for the standard δ Sct test regions. Dashed, dotted, and full lines correspond, respectively, to $l=0, 1$, and 2.



Sódor (2009, AIPC, 1170, 294)

Mit kezdünk az adatokkal

Spektroszkópia

Nem idősor (single-epoch spectroscopy) spektroszkópia

– A csillag elhelyezése a HRD-n – különbségtétel változócsillag-osztályok között, fizikai paraméterek, fémtartalom – szokásos spektroszkópai dolgok:

A nagy amplitúdójú pulzátoroknál – pl. RR Lyraeknél – óvatosnak kell lennünk a légkörben zajló nemlineáris folyamatok miatt.

Idősor-spektroszkópia

– Radiálissebesség-görbe

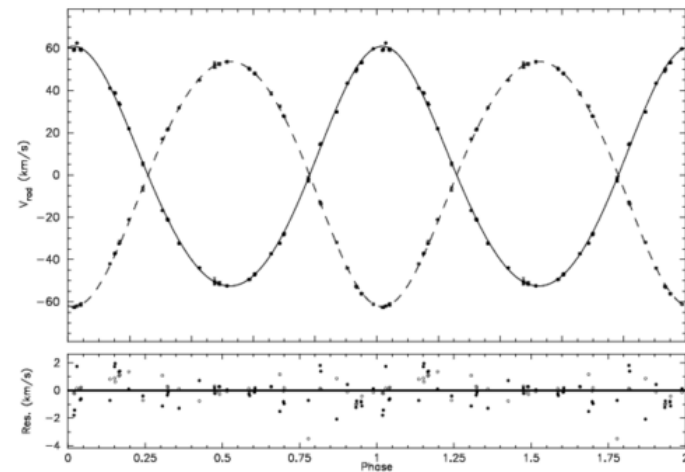
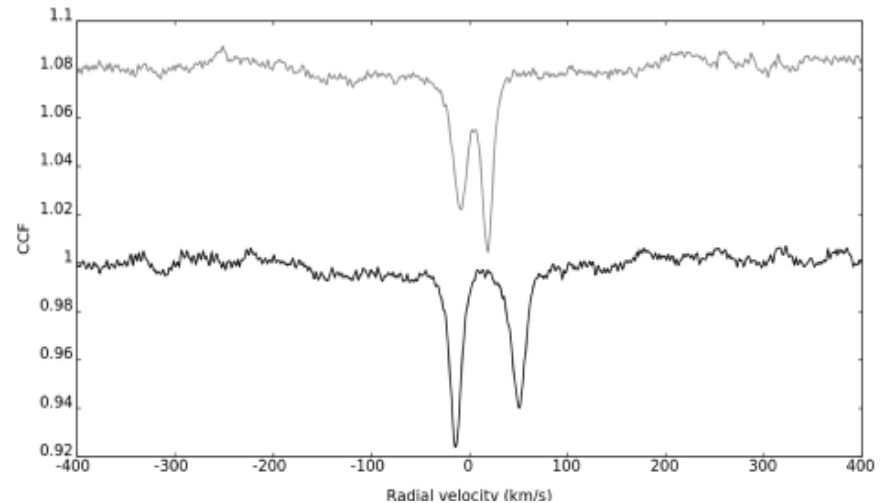
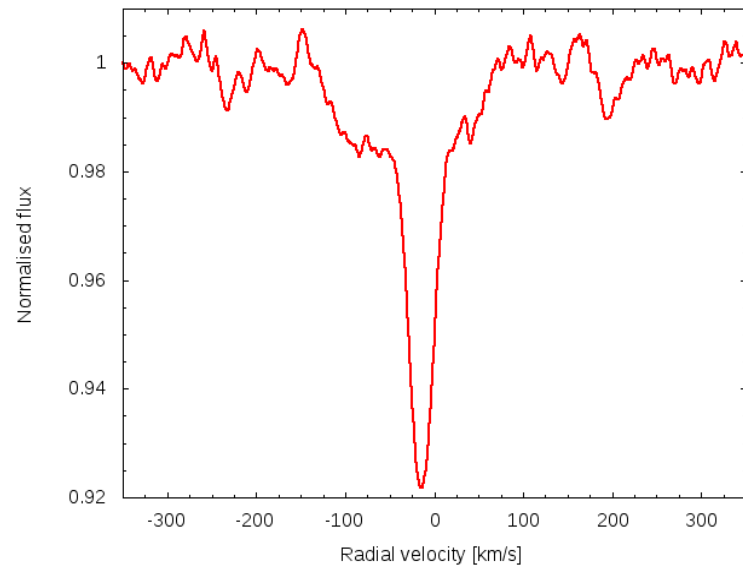
– Vonalprofil-változás (LPV) → módusazonosítás, inklináció,

Mit kezdünk az adatokkal

Kettősség: spektroszkópiailag, fotometriailag

Spektroszkópiailag:

SB1, SB2, ... – egyvonalas kettős (single-lined spectroscopic binary), kétvonalas (double lined), sít ...



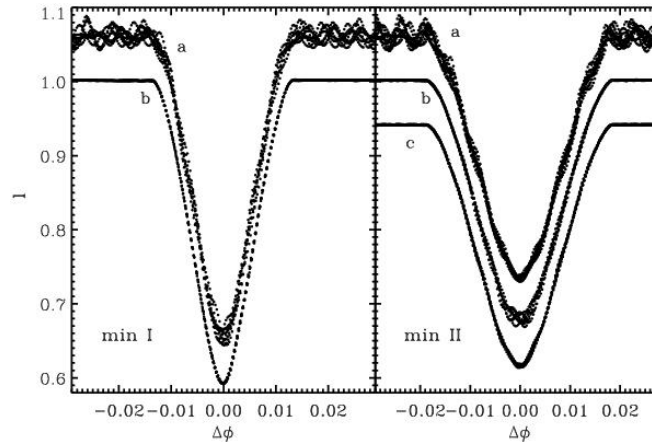
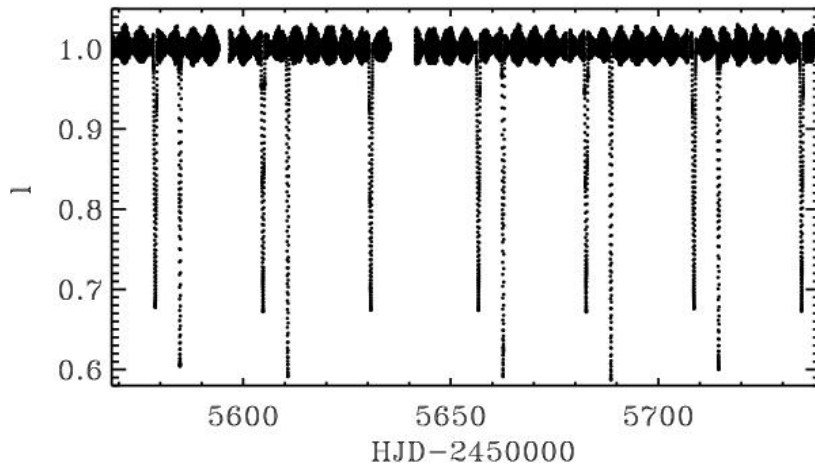
Lampens et al., előkészületben

Mit kezdünk az adatokkal

Kettősség: spektroszkópiailag, fotometriailag

Fotometriailag:

– Fedés.

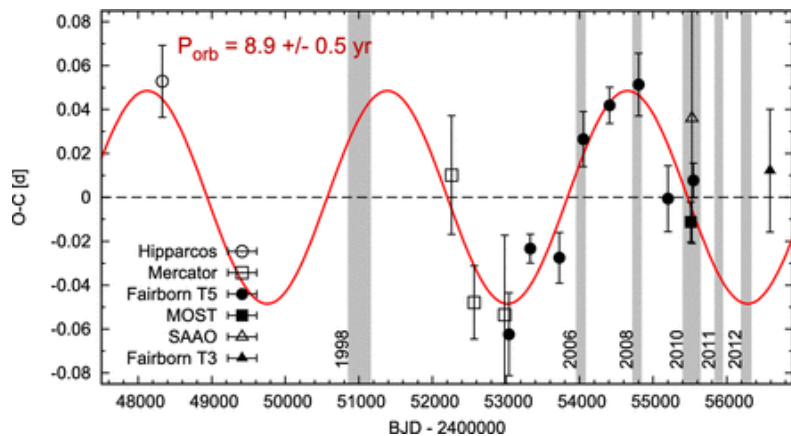
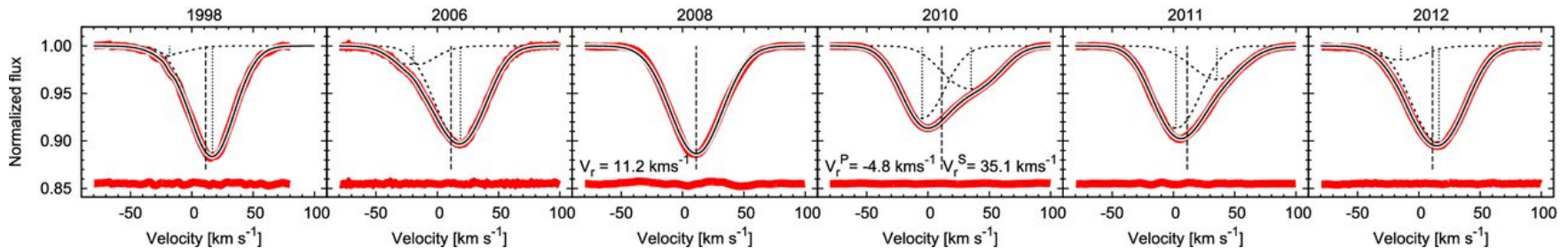


Maceroni et al., 2014, A&A, 563, A59

– Fényidő-effektus: a kettőscsillag tagjainak radiális sebességkomponense miatt a tőlünk mért távolságuk periodikusan változik, ami a fény véges terjedési sebessége miatt a pulzáció fázisának periodikus modulációjában nyilvánul meg. Az időben kifejezett fázisváltozás a radiális sebesség integrálja.

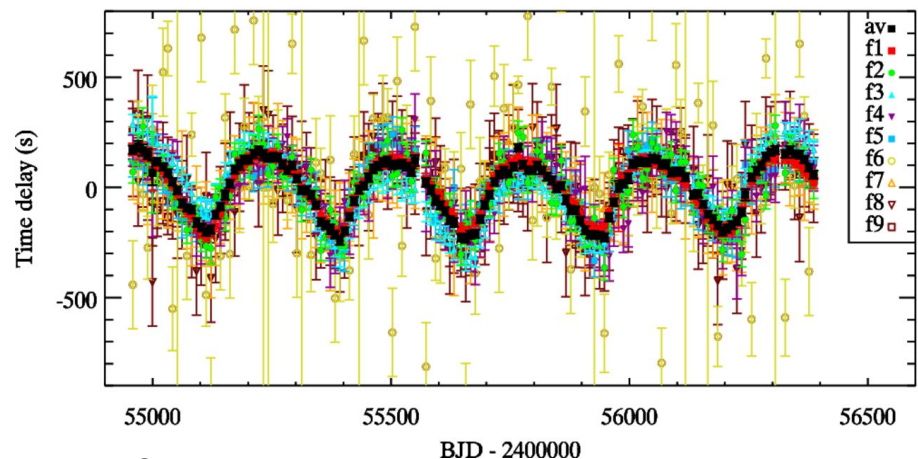
Mit kezdünk az adatokkal

Kettősség: spektroszkópiailag, fotometriailag



HD 25558

Sódor et al. 2014, MNRAS, 438, 3535



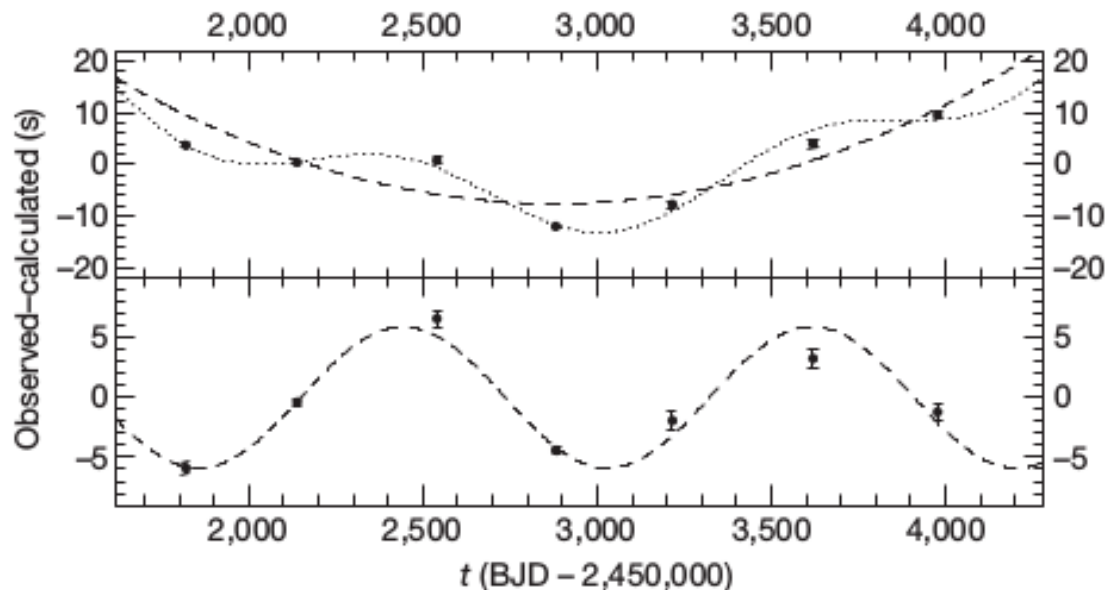
KIC 9651065 (Kepler)

Murphy & Shibahashi 2015, MNRAS, 450, 4475

Mit kezdünk az adatokkal

Kettősség: spektroszkópiailag, fotometriailag

Fotometriailag: ha elég stabil a pulzátor, akár exobolygót is kimutathatunk a fényidőeffektus révén.



V391 Peg

Silvotti et al. 2007, Nature, 449, 189

Mit kezdünk az adatokkal

Kettősség: RR Lyrae csillagok

Nehézségek:

- Fényesek, a kísérő jó eséllyel két nagyságrenddel halványabb → nem látszik a spektrumban.
- Nagy amplitúdóval pulzálnak → a tömegközépponti (gamma) sebesség meghatározása körülményes.
- Voltak már a vörös óriáság csúcsán → $P_{\text{orb}} > \sim 4$ év.
- A periódusukat minden különösebb ok nélkül is képesek változtatni → a fényidő-effektus sokszor nem működik.

