

Konferencia Living Together: Planets, Host Stars and
Binaries - Litomyšl 2014
2. část - Exoplanéty

Zoltán Garai



6.5.2015, Tatranská Lomnica

Prezentácia vznikla na základe nasledovných prednášok/posterov:

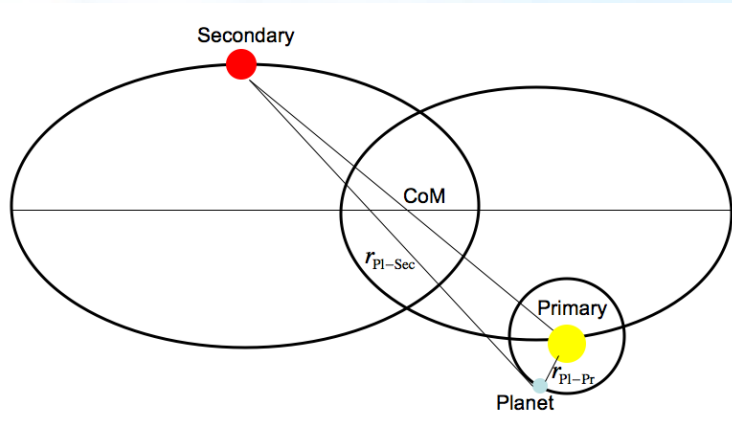
- **Welsh, W.F.:** Kepler circumbinary planets: The best of both worlds
- **Haghighipour, N.:** Formation and evolution of planets in & around binary star systems
- **Mélendez, J.:** Fingerprinting the formation of giant planets using the binary system 16 Cyg
- **Demircan, O.:** Where are the circumbinary planets of contact binaries?
- **Quian, S.B.:** Planets and brown dwarfs orbiting evolved binaries
- **Bisikalo, D.V.:** Simulation of the interaction between the hot Jupiter exoplanet and its host star
- **Southworth, J.:** Observational studies of transiting extrasolar planets
- **Bastürk, Ö.:** High precision defocused observations of planetary transits
- **Bergmann, C.:** Searching for Earth-mass planets around α Centauri
- **Konacki, M.:** Project Solaris

Okruhy, do ktorých možno zaradiť
tieto prednášky/postery:

- **Cirkumbinárne a cirkumprimárne exoplanéty**
 - vznik a vývoj exoplanét
 - *Keplerovské* cirkumbinárne exoplanéty
- **Interakcia medzi exoplanétou a jej materskou hviezdou**
- **Observačná exoplanetológia**
 - úvod do problematiky
 - fotometria tranzitujúcich exoplanét
 - spektroskopia, radiálne rýchlosti
- **Prehliadkové projekty exoplanét**

Cirkumbinárne a cirkumprimárne exoplanéty

Vznik a vývoj exoplanét



Vývoj cirkumprimárnych exoplanét v cirkumprimárnom disku:

- Ich vývoj ovplyvňuje sekundárna zložka dvojhviezdy, najmä v tom prípade, ak tá sa nachádza bližšie k primárnej zložke, než 50 AU:

- zvyšuje sa excentricita častíc,
- zvyšuje sa vzájomná kolízia,
- zvyšuje sa možnosť katapultovania objektov →

- Nárast veľkosti a hmotnosti planetezímál pokračuje až po dosiahnutie istej hranice. Preto majú tieto planéty vždy iba subneptunickú veľkosť.

- sekundárna zložka môže „odseknúť“ časť disku →

- Planéty sa nachádzajú vždy do istej vzdialenosti od primárnej zložky.

γ Cephei : Separation ~ 20 AU
1.67 Jupiter-Mass Planet @ 2.1 AU

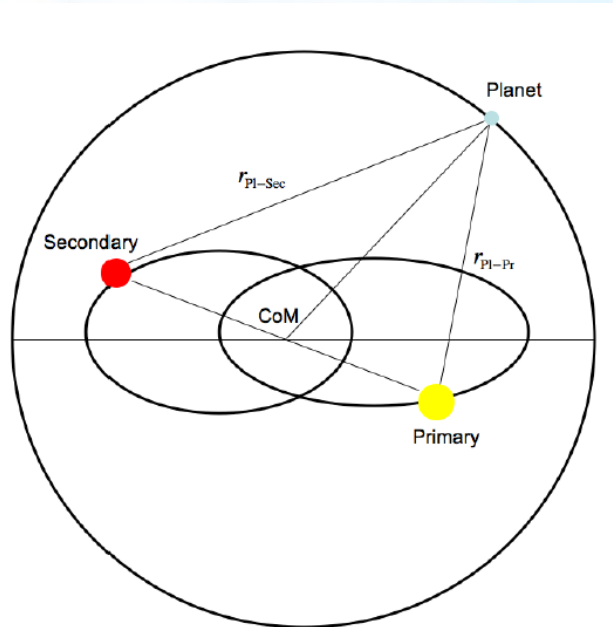
GL 86 : Separation ~ 28 AU
4 Jupiter-Mass Planet @ 0.11 AU

HD41004, HD 196885, HD 176051, α Centauri (?)
(23 AU) (23 AU) (21 AU) (23.5 AU)

OGLE-2013-BLG-0341 (15 AU), OGLE-2008-BLG-092L (18 AU)

Cirkumbinárne a cirkumprimárne exoplanéty

Vznik a vývoj exoplanét



Vývoj cirkumbinárnych exoplanét v cirkumbinárnom disku:

- Ich vývoj je úplne odlišný, ako v prípade cirkumprimárnych exoplanét:

- planéty migrujú v cirkumbinárnom disku smerom do vnútra alebo smerom von,
- migráciu ovplyvňujú vlastnosti cirkumbinárneho materiálu →

- Dosadnú na komenzurabilné dráhy v pomere od 3:1 až po 9:1 s periódou dvojhviezdy. Oveľa väčšie relatívne vzdialenosti ako v prípade cirkumprimárnych exoplanét.

- nie sú také obmedzenia kladené na hmotnosti exoplanét →

- Planéty by mali dosahovať joviálne hmotnosti.
(**Haghighipour et al.**)

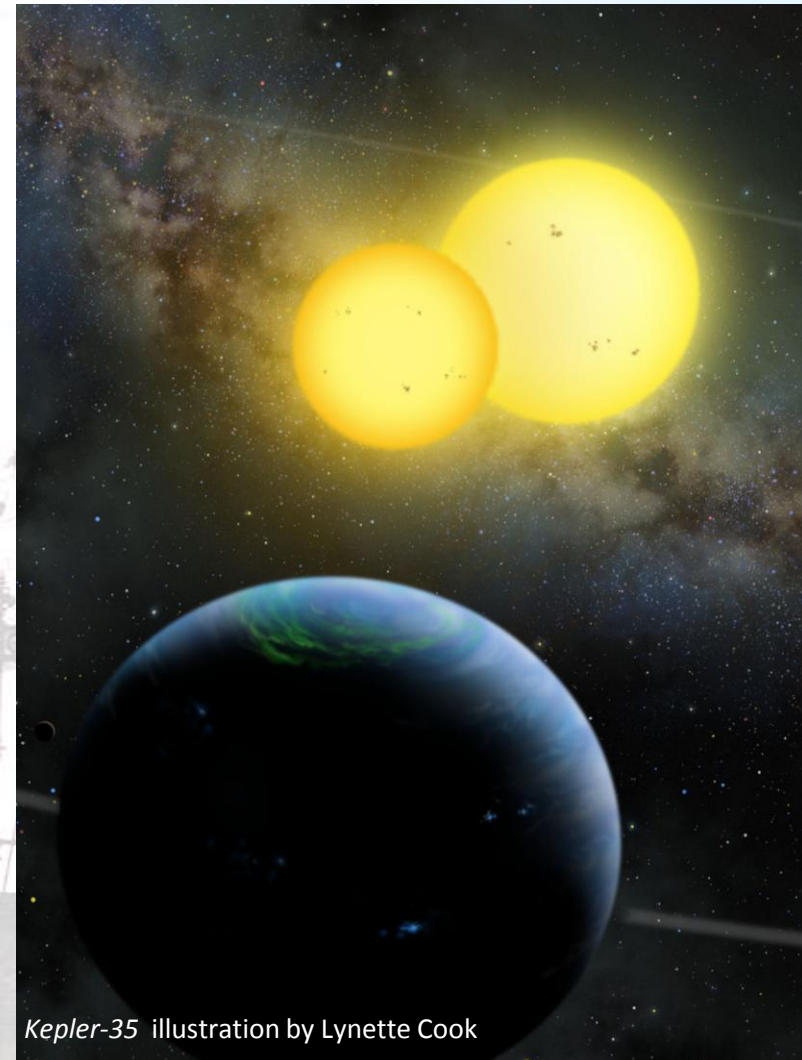


Cirkumbinárne a cirkumprimárne exoplanéty

Keplerovské cirkumbinárne exoplanéty

Čo nám prinášajú Keplerovské cirkumbinárne exoplanéty? (Welsh et al.):

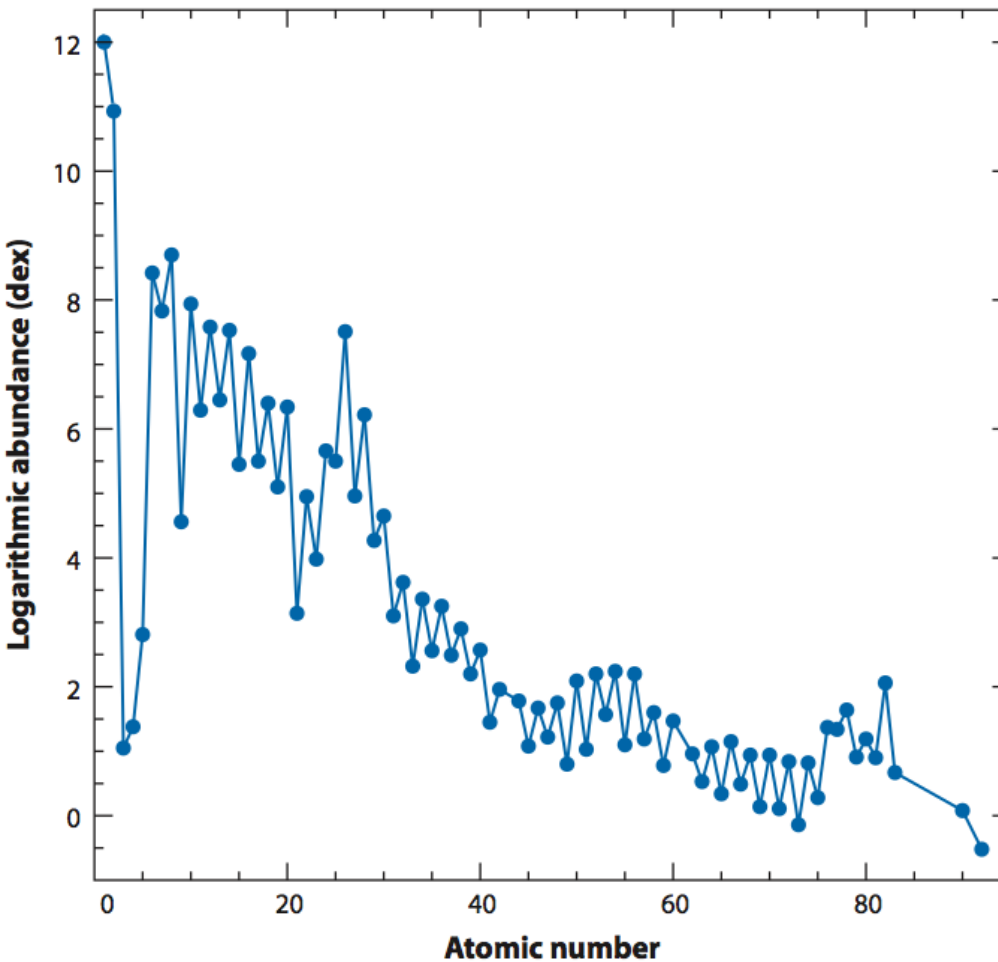
- V prvom rade výzvu – ťažšie sa hľadajú ako pri osamelých hviezdach (tranzity neperiodické, zmeny hĺbky tranzitov,...) , ale ľahšie sa potvrdzujú, TTV + TDV je jednoznačný dôkaz existencie CBP.
- Presné parametre: ich materské telesá sú *Keplerovské* dvojhviezdy, ktoré majú presne určené parametre →
- dobrý základ pre určenie R_{pl} a M_{pl} .
- Otvorené otázky, ktoré priniesli práve tieto objavy:
 - Aké sú vlastnosti ich obežných dráh?
 - Prečo dosahujú väčšie hmotnosti ako CPP?
 - Čo je príčinou ich blízkosti k zelenej zóne?
 - Čo je príčinou ich blízkosti ku kritickému polomeru?



Cirkumbinárne a cirkumprimárne exoplanéty

Vznik a vývoj exoplanét

Problematika slnečného lítia v súvislosti s formovaním exoplanét v binárnom systéme 16 Cyg:



- Prečo je abundancia lítia v slnečnej atmosfére (vo fotosfére) taká (relatívne) nízka?

Z	Element	Photosphere
1	H	12.00
2	He	[10.93 ± 0.01]
3	Li	1.05 ± 0.10
4	Be	1.38 ± 0.09
5	B	2.70 ± 0.20
6	C	8.43 ± 0.05
7	N	7.83 ± 0.05
8	O	8.69 ± 0.05

Cirkumbinárne a cirkumprimárne exoplanéty

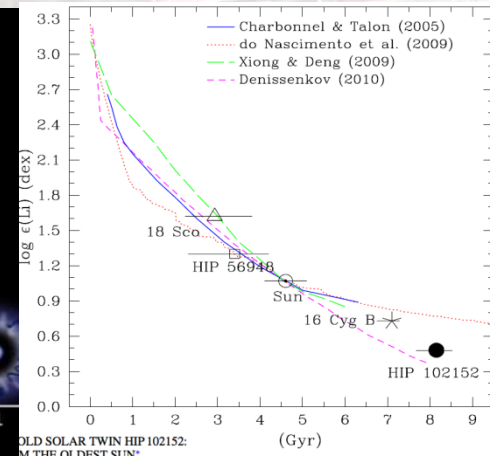
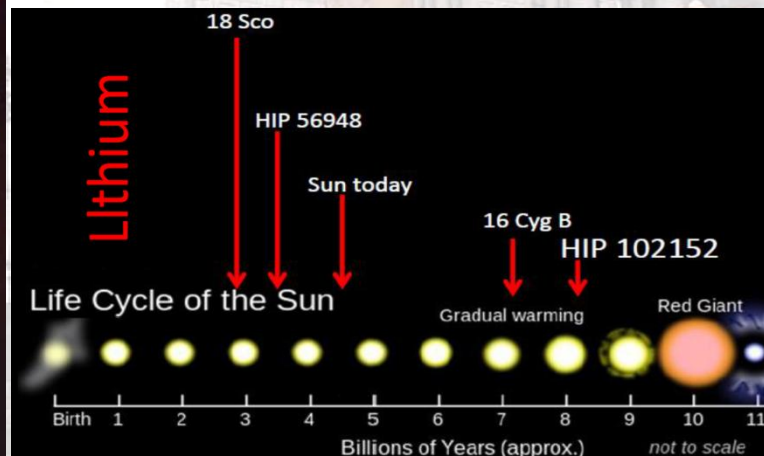
Vznik a vývoj exoplanét

Problematika slnečného lítia v súvislosti s formovaním exoplanét v binárnom systéme 16 Cyg:

- 16 Cyg A a 16 Cyg B je dvojhviezda slnečného typu, pričom 16 Cyg B má planétu (plynného obra) – 16 Cyg B, na rozdiel od 16 Cyg A, je ochudobnené o kovy, ktoré mohli byť akreované práve planétou 16 Cyg Bb. (Melendéz et al.)



- Shuler et al. 2011 naopak, nenašli abundančný rozdiel medzi 16 Cyg A a B, avšak použili spektrum s menším rozlíšením.
- Výskum ďalšej hviezdy slnečného typu HIP102152 (vek 8,2 mld. rokov) skôr naznačuje, že existuje silná korelácia medzi vekom hviezd slnečného typu a obsahom lítia.



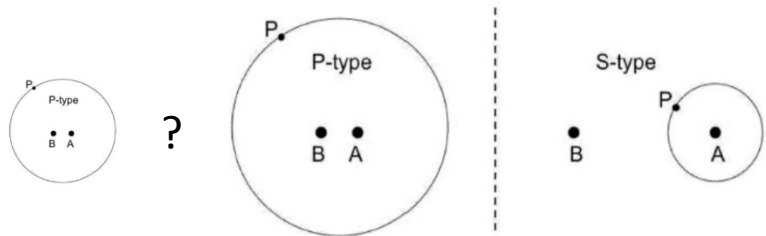
Cirkumbinárne a cirkumprimárne exoplanéty

Vznik a vývoj exoplanét

Kde sú cirkumbinárne planéty kontaktných dvojhviezd? (Demircan et al.):

MOTIVATION

PCEB	CB	Short Perid DB	Long Period DB
Yes p-type	No?	Yes p-type ($0.08 < a < 0.23$ AU)	Yes s-type ($a > 20$ AU)



Why there is no circumbinary planet observed around contact binaries ?



- Chýbajú planéty tranzitujúce kontaktné dvojhviezdy. Aj keď planéty v binárnych systémoch vznikajú ťažšie, ale cirkumbinárne planéty boli objavené už v PCEB (post-common-envelope binary) aj v DB (detached binary) systémoch, prečo práve CB systém by bolo výnimkou?
- Autori veria, že presné časovanie minimálnych zákrytov kontaktných dvojhviezd je schopné odhaliť LITE efekty na O-C diagramoch počas dostatočne dlhej periódy (viac ako 10 rokov) a potvrdiť tak existenciu joviálnych cirkumbinárnych exoplanét okolo týchto dvojhviezd (ak skutočne existujú).

Cirkumbinárne a cirkumprimárne exoplanéty

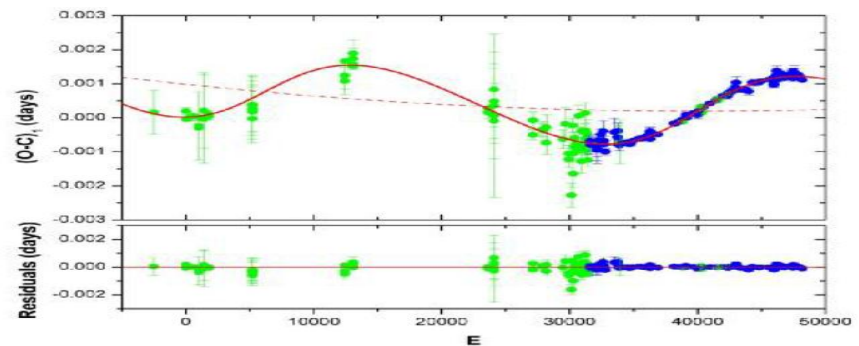
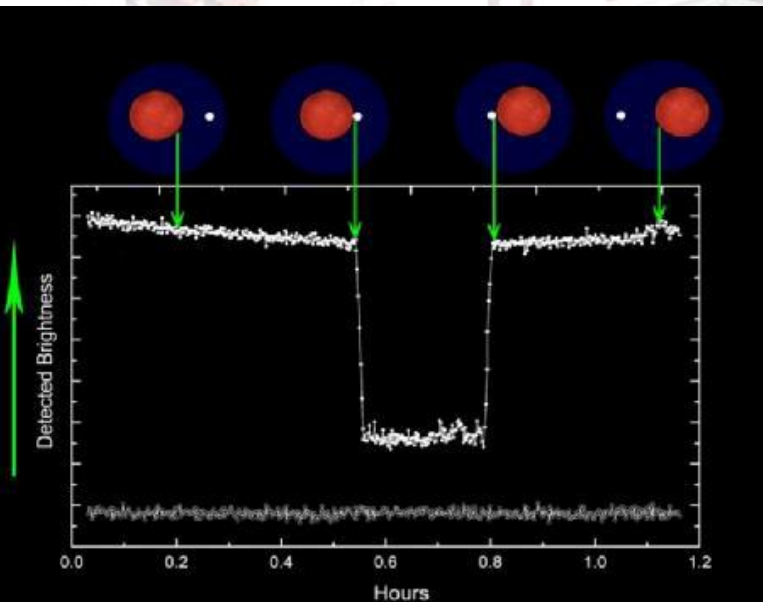
Vznik a vývoj exoplanét

Planéty a hnedí trpaslíci okolo kompaktných dvojhviezd:

- Hľadanie substelárnych objektov okolo kompaktných dvojhviezd (*evolved binaries*):

- kde aspoň jeden člen dvojhviezdy je horúci podtrpaslík,
- oddelené dvojhviezdne páry biely trpaslík + M-trpaslík,
- magnetické kataklizmické dvojhviezdy,
- röntgenové dvojhviezdy.

- Použitá metóda: LITE – vďaka kompaktným telesám, časy miním T_{\min} sa dajú určiť veľmi presne, aj malú periodicitu v T_{\min} sa dá registrovať → náznak substelárneho objektu.



Cirkumbinárne a cirkumprimárne exoplanéty

Vznik a vývoj exoplanét

Planéty a hnedí trpaslíci okolo kompaktných dvojhviezd:

Cieľové objekty a pozorovacia sieť:

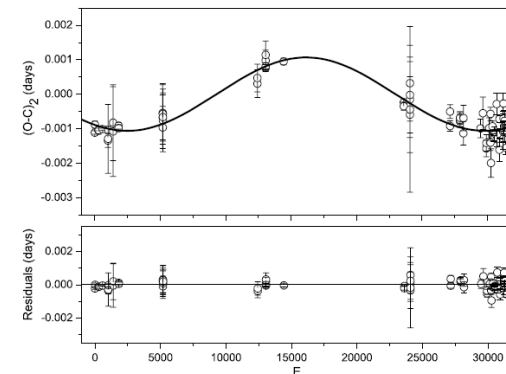
HW Vir (P=2.8013 hours, V=11.2mag,)
NY Vir (P=2.4258 hours, V=14.2mag)
HS 0705+6700 (P=2.2955 hours, B=14.1mag)
HS 2231+2441 (P=2.6541 hours, V=14.1mag)
NSVS 14256825 (P=2.6490 hours, V=14.3mag)
BULSC 16-335 (P=3.0012 hours, V=16.3mag)
NSVS07826147(P=3.8825 hours, V=13.6mag)
SDSSJ082053+000843(P=2.3 hours, g=14.9mag)
2M1938+4603 (P=3.024hours, g=11.9mag)
EC 10246-2707(P=2.8442hours, B=14.2mag)
ASAS 102322-3737(P=3.3425hours, V=11.6mag)



- Tieto objekty monitorujú od roku 2006.

Výsledky:

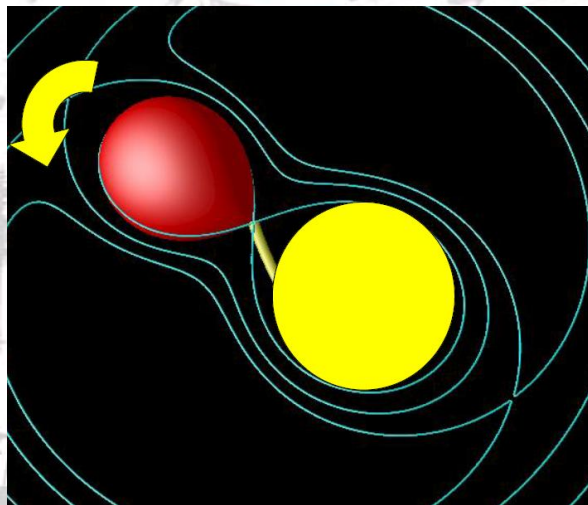
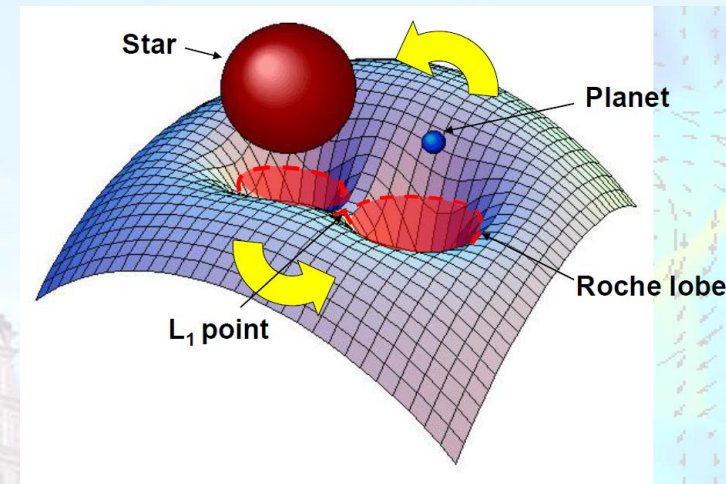
- napr. detekcia hnedého trpaslíka v systéme typu sdB: HS 0705+6700,
- alebo detekcia planéty tiež v systéme typu sdB: NY Vir (**Qian et al.**).



Interakcia medzi exoplanétou a jej materskou hviezdou

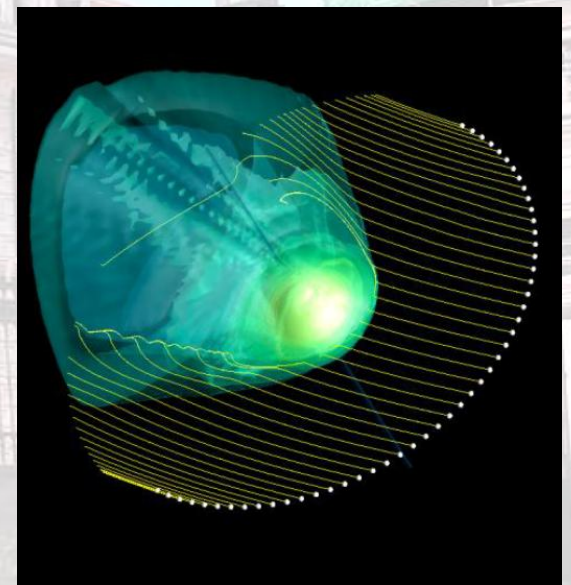
Modelovanie interakcie medzi horúcim Jupiterom a jeho materskou hviezdou:

- Horúci Jupiteri často vypĺňajú svoj Rocheov lalok
→ odtok materiálu cez L1 a L2.
- V najjednoduchšom prípade (bez dynamických efektov hviezdneho vetra) by sme pozorovali prúd hmoty cez L1, ohnutý v smere pohybu planéty (Coriolisova sila).



- V tomto prípade strata hmoty by bola enormná, životnosť planetárnej atmosféry by bola pár rokov.

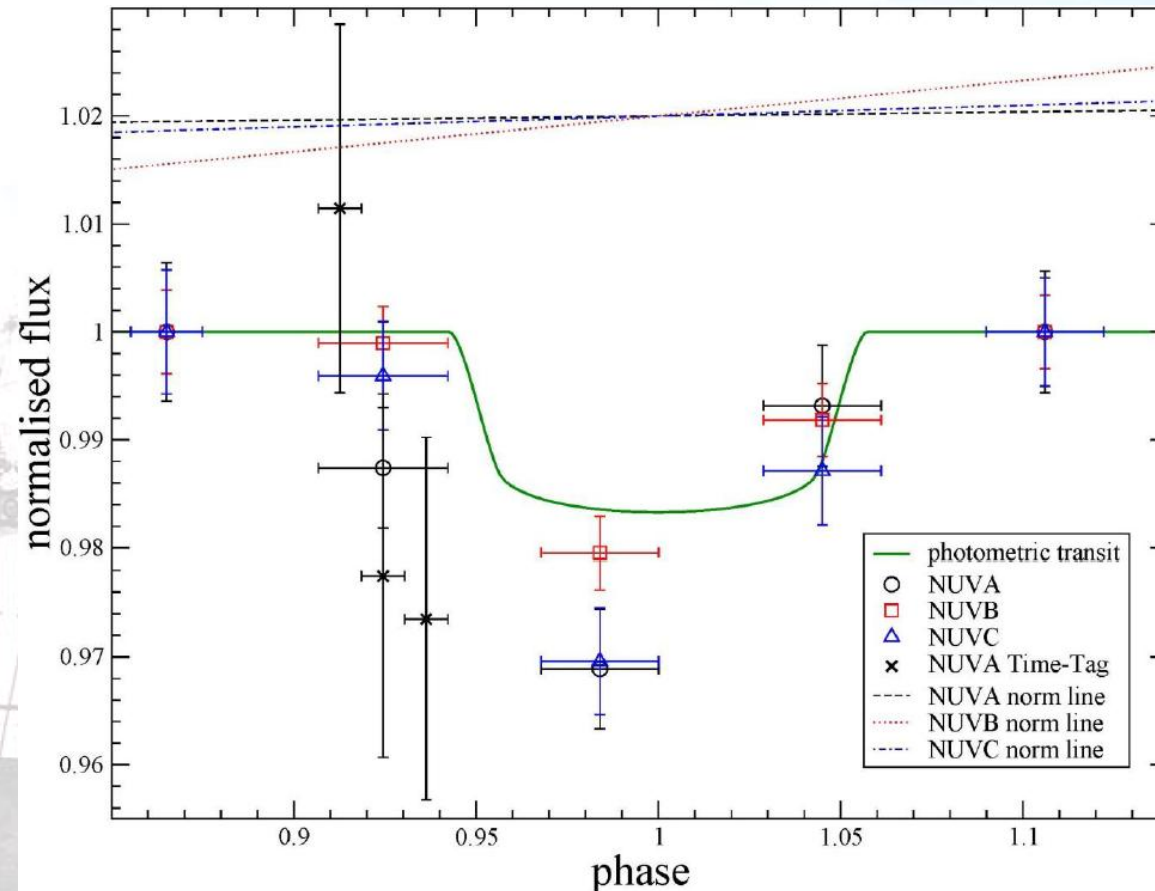
- Planéta ale obieha v prostredí hviezdneho vetra nadzvukovou rýchlosťou → nárazová vlna môže stabilizovať situáciu.



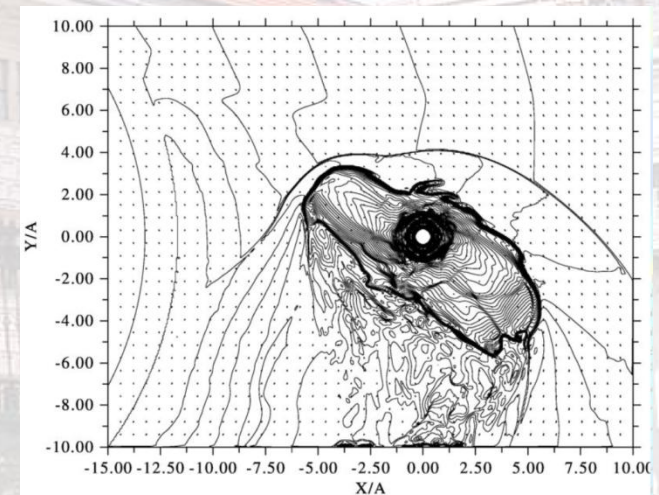
Interakcia medzi exoplanétou a jej materskou hviezdou

Modelovanie interakcie medzi horúcim Jupiterom a jeho materskou hviezdou:

- Vzhľadom na dynamiku hviezdneho vetra a pohyb planéty, geometria nárazovej vlny, teda aj prúdu, musí byť komplexnejšia. To sa aj potvrdilo v prípade horúceho Jupitera WASP-12b.



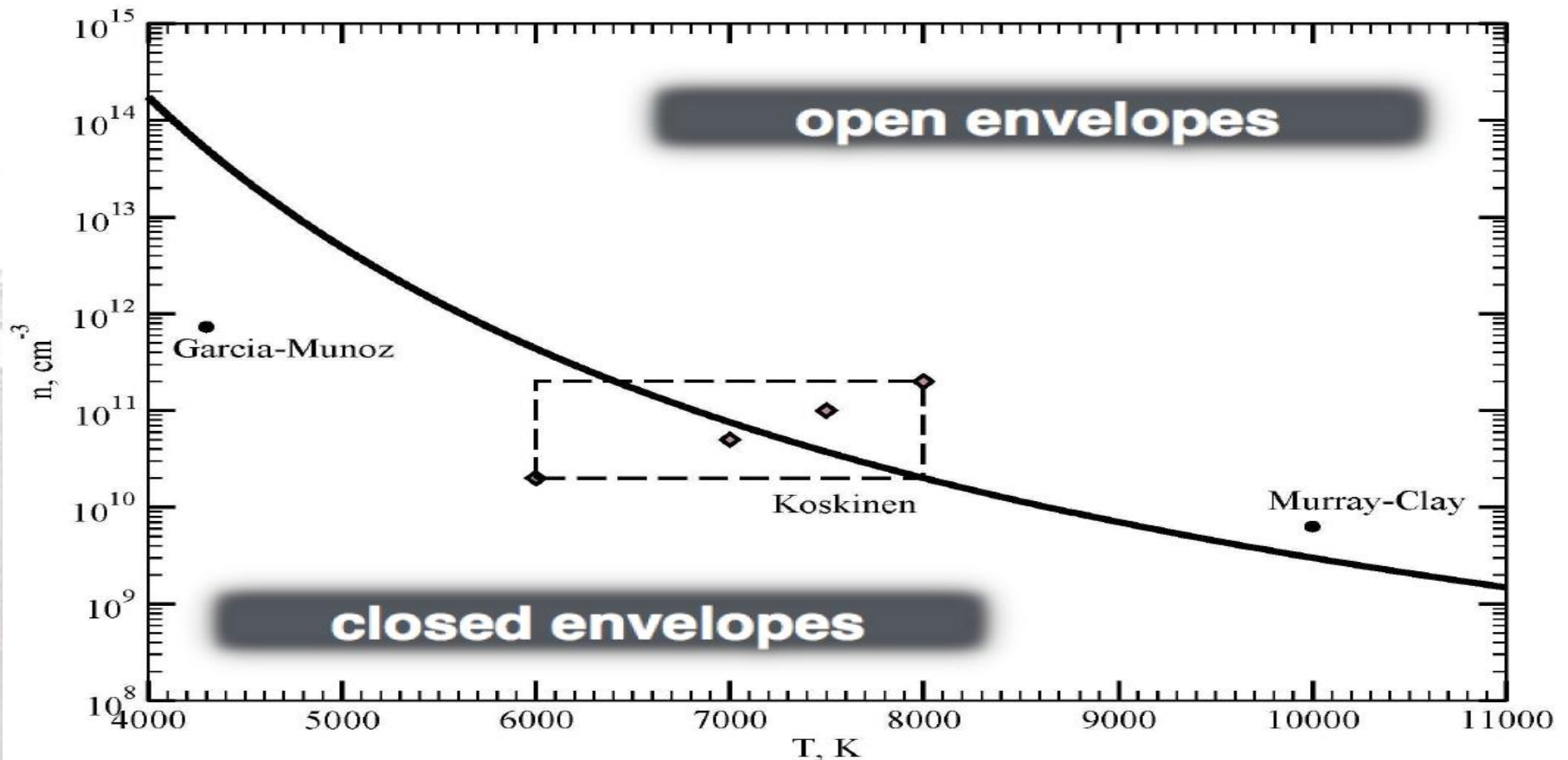
- Pozorovania v blízkej UV oblasti indikovali hlbší tranzit, ktorý predchádza tranzit v optickej oblasti.
- Vysvetlenie: 2 deformované prúdy cez L1 a L2 odklonené v súlade s F_{cor} a limitované na vzdialenosť 4 a 6 R_p .



Interakcia medzi exoplanétou a jej materskou hviezdou

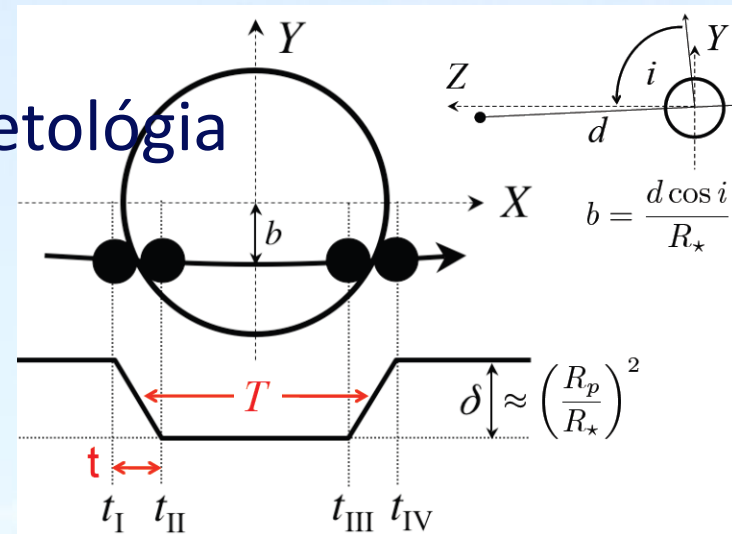
Modelovanie interakcie medzi horúcim Jupiterom a jeho materskou hviezdou:

- **Bisikalo et. al.** uskutočnili 3D numerické simulácie pre rôzne T_{eff} a N_{part} → kedy je atmosféra planéty ešte uzavretá a kedy dochádza k masívnemu odtoku hmoty (otvorená atmosféra):





Observačná exoplanetológia



Úvod do problematiky

Výskum tranzitujúcich exoplanét (úvodné poznámky):

- Tranzitujúce exoplanéty nám poskytujú jedinečnú možnosť na získanie poznatkov:
 - o perióde, hmotnosti, priemere, hustote, ... planéty (v súčinnosti so spektroskopou),
 - o materskej hviezde (nemusíme skúmať dvojhviezdy na získanie týchto informácií):
 - efektívna teplota, log g, metalicita, hustota, ...,
 - aplikácia parametrov v stelárnych modeloch,
 - určenie najpravdepodobnejšieho veku sústavy,
 - vývojové scenáre,
 - informácie o hviezdnej aktivite (škvrnny na hviezde a pod.).
- Preto v centre pozornosti budú misie (pozemské aj vesmírne):
 - súčasné pozemské: HATNet, SuperWASP, KELT, ...,
 - budúce pozemské: NGST (Next Generation Transit Survey), ...,
 - súčasné vesmírne: Kepler, CoRoT,
 - budúce vesmírne: CHEOPS, TESS, GAIA, PLATO, ...,
- ale aj follow-up projekty: spektrografia na VLT – Espresso (presnosť 0,1 m/s), E-ELT – Codex (presnosť až 0,02 m/s) (**Southworth et al.**).

Observačná exoplanetológia

Fotometria tranzitujúcich exoplanét

Mimoohniskové pozorovania planetárnych tranzitov:

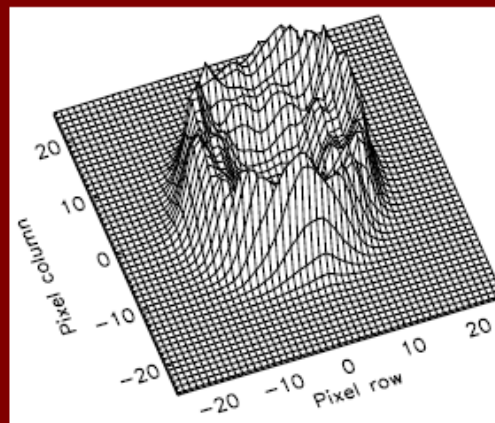
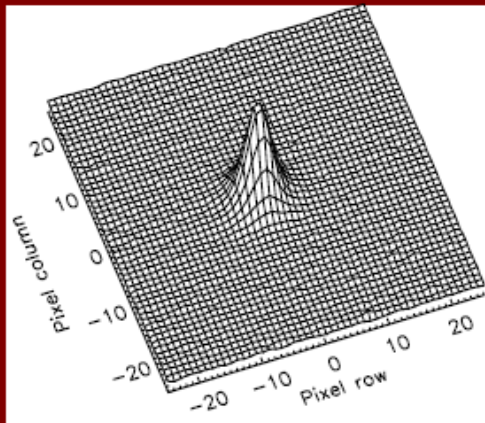
- Pokles svetelného toku v prvom priblížení (keď sa zanedbá okrajové stmavnutie):
- Signál by mal byť väčší než 3*kvadr. priemer rozptylu dát, pre follow-up ešte väčší.
- Musíme dosiahnuť vysoký pomer signálu k šumu →
- riešenie podľa Bastürka et al. spočíva v predĺžení expozičnej doby → defokusácia ďalekohľadu,
- viacej fotónov z pozadia, ale aj od objektu → vysoký S/N,
- čas minima na zlomky sekúnd.

$$\Delta F \approx \left(\frac{R_p}{R_*} \right)^2$$

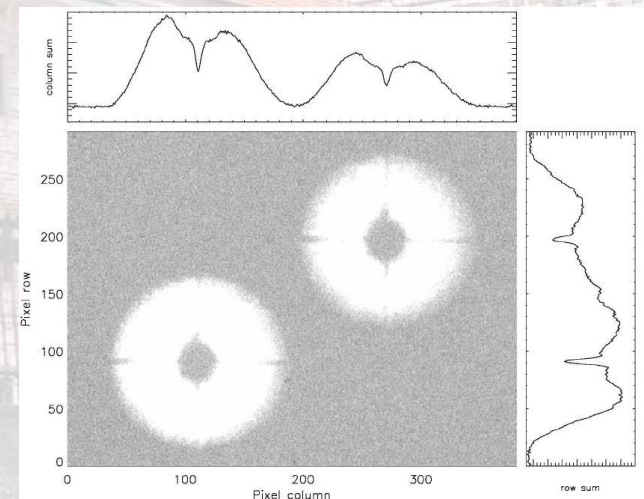
$$x_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{n} (x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2)}.$$

$$S/N = \frac{tR_{\text{star}}}{\sqrt{tR_{\text{star}} + 2tR_{\text{sky}}}} = \sqrt{t} \frac{R_{\text{star}}}{\sqrt{R_{\text{star}} + 2R_{\text{sky}}}}$$

$$S/N \propto \sqrt{t}$$



PSFs in focus (left) and defocused (right)

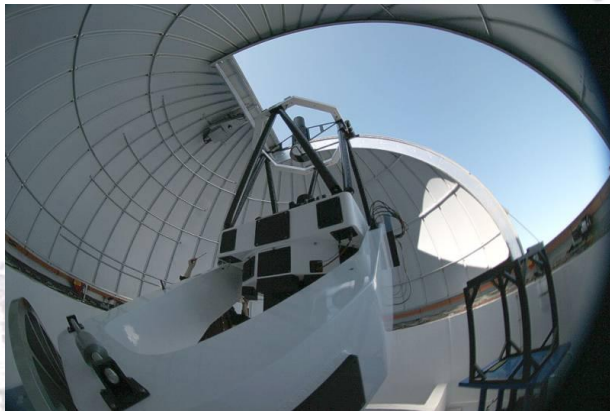


Observačná exoplanetológia

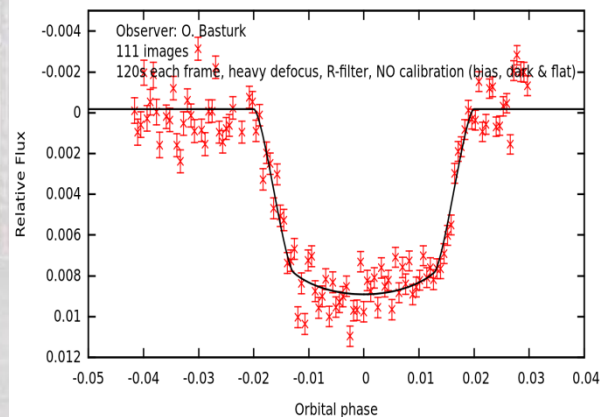
Fotometria tranzitujúcich exoplanét

Mimoohniskové pozorovania planetárnych tranzitov:

- Meranie na 1m TUG:



XO-3b, TUG (1.0m), Beginning night 07. Sep. 2013, RMS = 1.1 mmag

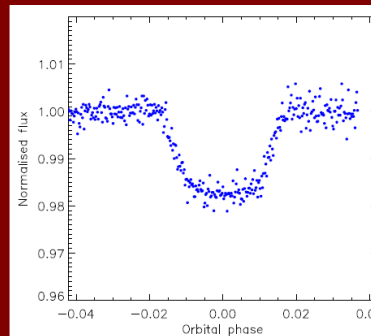
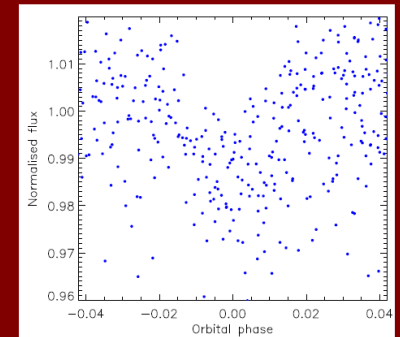


- Že to nie je úplne od veci → **Southworth et al.:**

Example: WASP-2

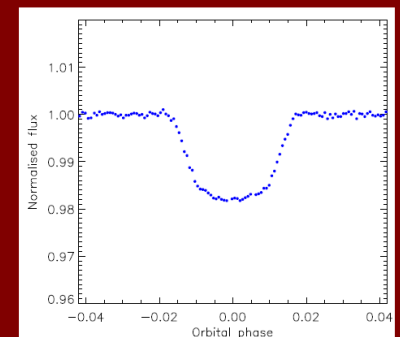
Discovery light curve
(Collier Cameron et al. 2007)

$\sigma = 10$ mmag



Charbonneau et al. (2007)

$\sigma = 1.9$ mmag



Defocussed-photometry light curve
(Southworth et al. 2009)

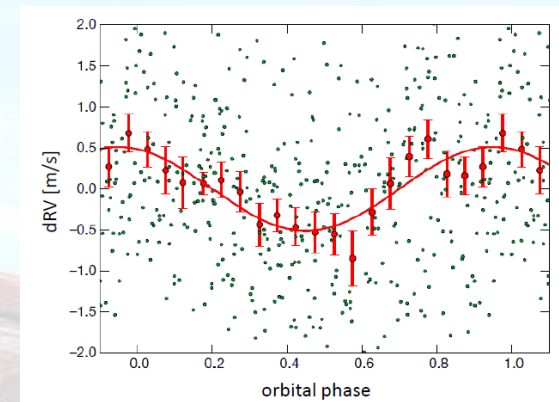
$\sigma = 0.46$ mmag

Observačná exoplanetológia

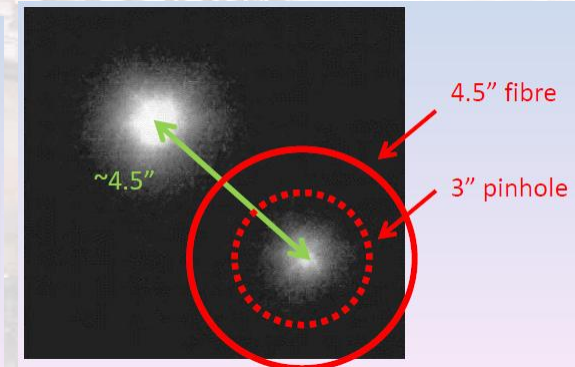
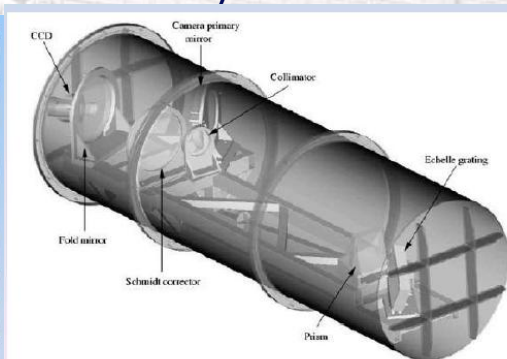
Spektroskopia, radiálne rýchlosti

Hľadanie planéty hmotnosti Zeme okolo α Centauri B:

- Dumusque et al. (2012) ohlásili objav exoplanéty ($P = 3,24$ d; $M = 1,13 M_{\text{Zem}}$) okolo α Cen B na základe RV dát z HARPS.
- Hatzes (2013) tiež analyzoval HARPS dáta \rightarrow nepotvrdil objav.
- Problém: malá uhlová vzdialenosť medzi A a B \rightarrow spektrálna kontaminácia \rightarrow potrebné sú follow-up merania na potvrdenie.
- Pozorovacia kampaň 3 univerzít (Nový Zéland, USA, Austrália):
 - spektrá s vysokým rozlíšením (MJUO – Hercules: $R = 70000$),
 - pipeline na odstránenie spektrálnej kontaminácie,
 - periódová analýza získaných údajov,
 - planéta zatiaľ nepotvrdená (Bergmann et al.).



modified from Dumusque et al., 2012, *Nature*, 491:207



Prehliadkové projekty exoplanét

Projekt Solaris:

Solaris-1 & 2, SAAO



- Hlavný cieľ projektu: detekcia cirkumbinárnych exoplanét pomocou LITE.

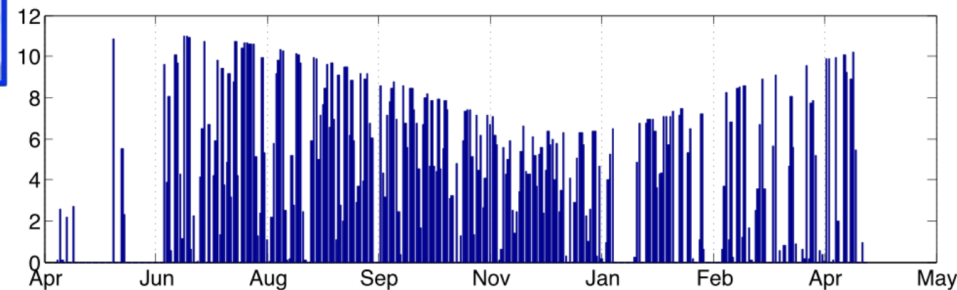
- Inštrumentálne vybavenie:

- 4 robotické ďalekohľady (2x Afrika, 1x Južná Amerika, 1x Austrália),

- priemer hlavného zrkadla: 0,5 m,
- zorné pole: 13 x 13, resp. 24 x 24 oblúkových minút,

- Andor iKon-L 2k x 2k kamery,
- Johnson/Cousin a Sloan filtre.

- Počet pozorovacích nocí:



- Aj spektroskopické pozorovania (**Konacki et al.**).

Ďakujem Vám za
pozornosť!



A vibrant, multi-colored galaxy with a heart-like shape, featuring shades of red, orange, yellow, and blue, set against a dark space background filled with numerous stars. Some stars have prominent four-pointed diffraction patterns.

Ďakujem Vám za
pozornosť!