

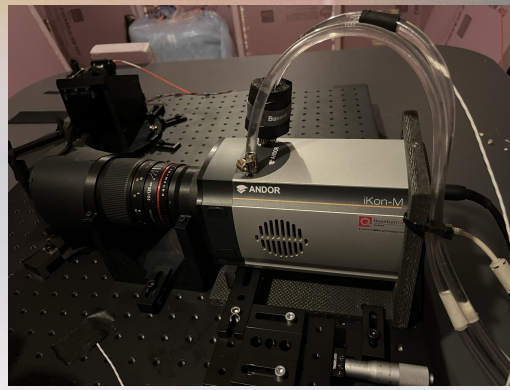
A futuristic landscape with a large planet in the sky. The scene is set on a rocky, mountainous terrain with a hazy, atmospheric background. A large, crescent-shaped planet is visible in the upper right corner of the sky. The overall color palette is soft and ethereal, with pastel tones of blue, pink, and orange.

F7514 Exoplanety

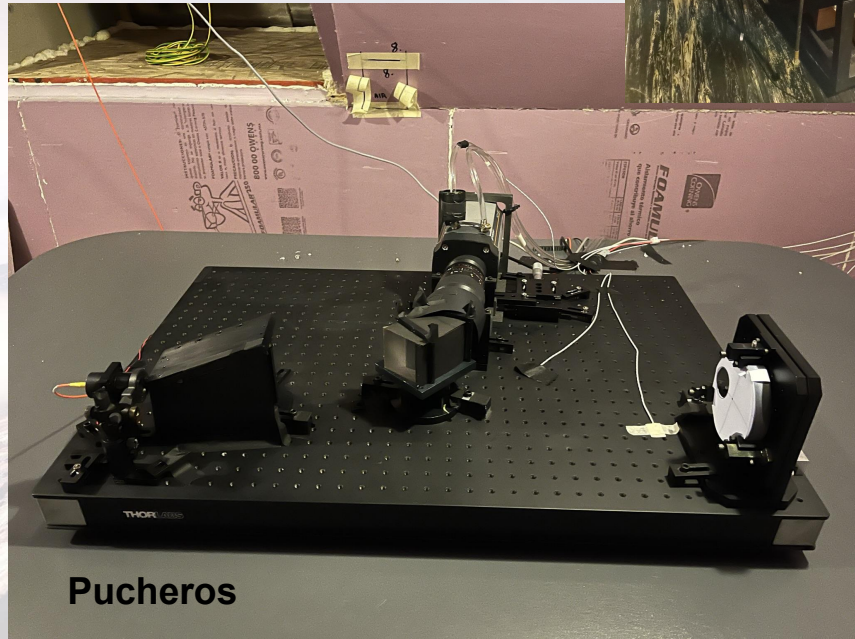
Exoplanetární tranzity

Marek Skarka

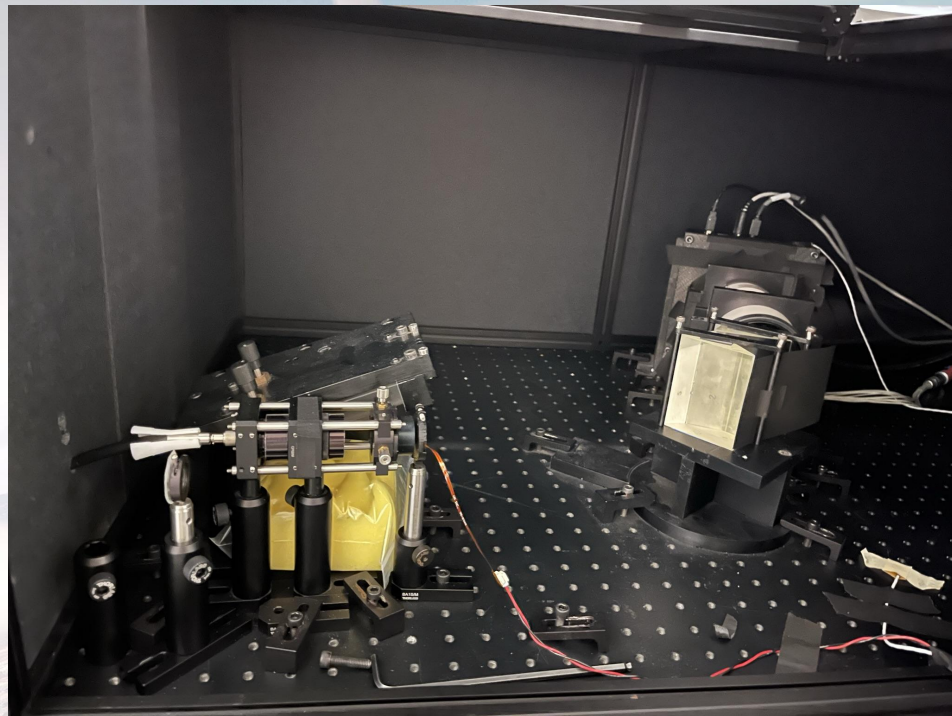
25.10.2023



OES

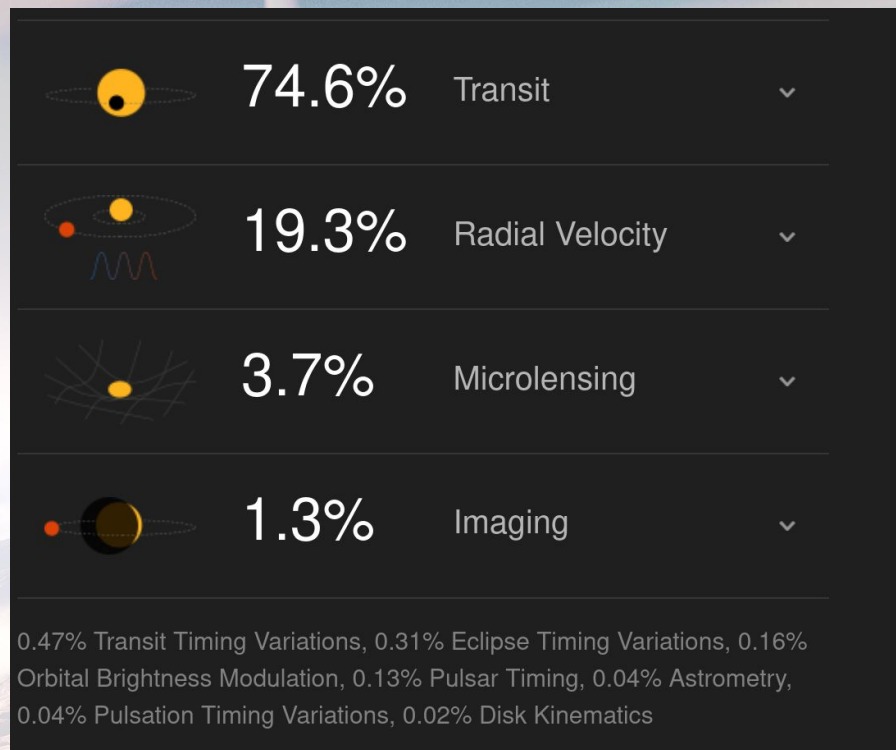
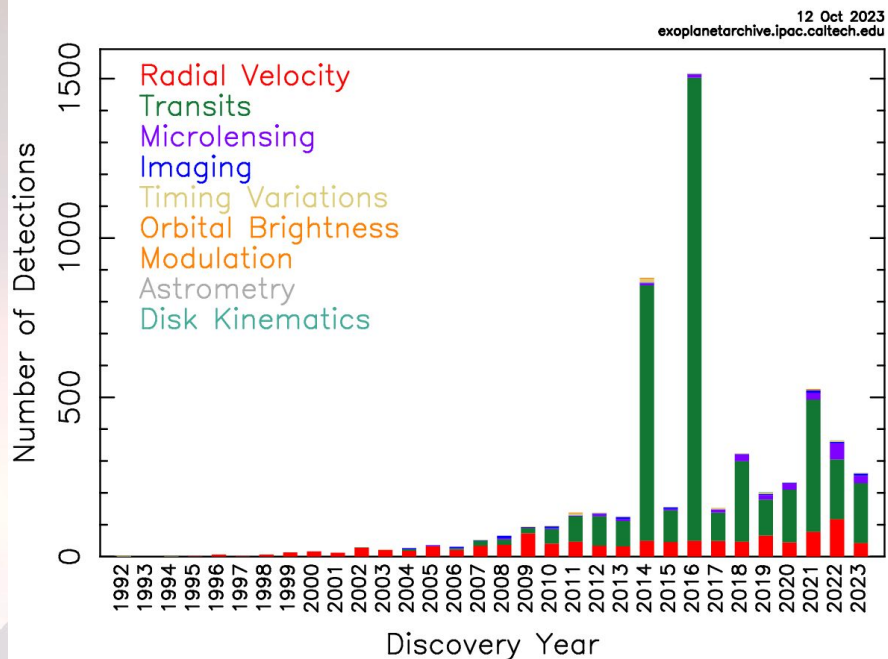


Pucheros



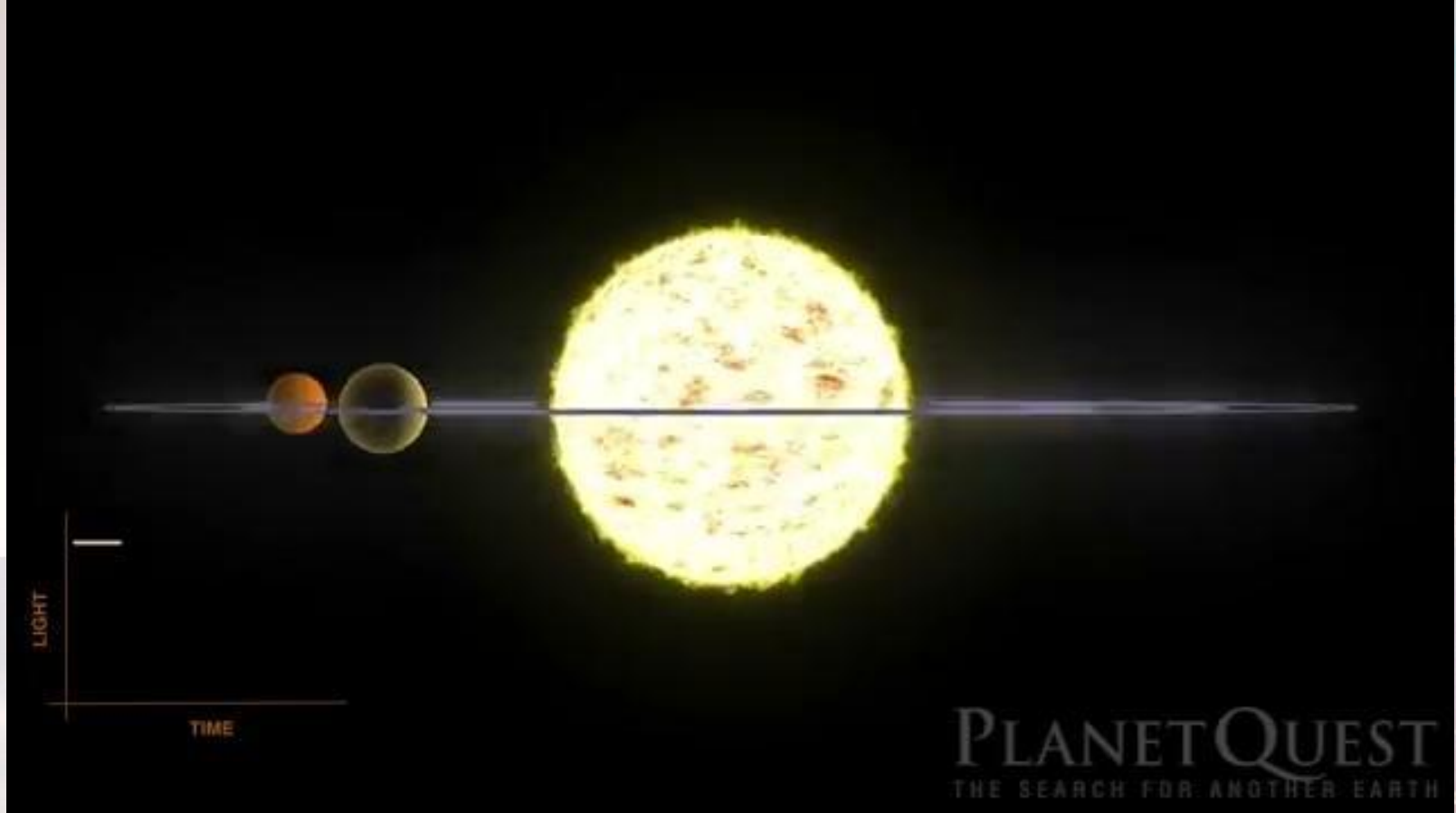
FIDEOS

Detections Per Year

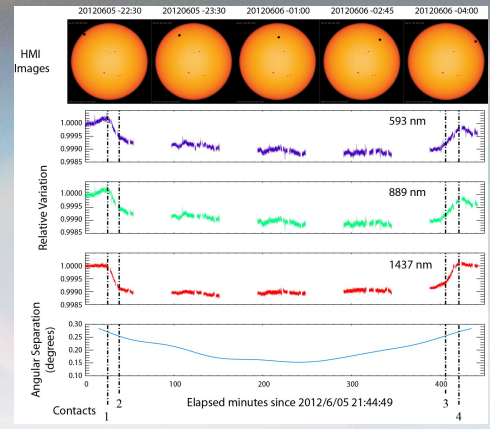
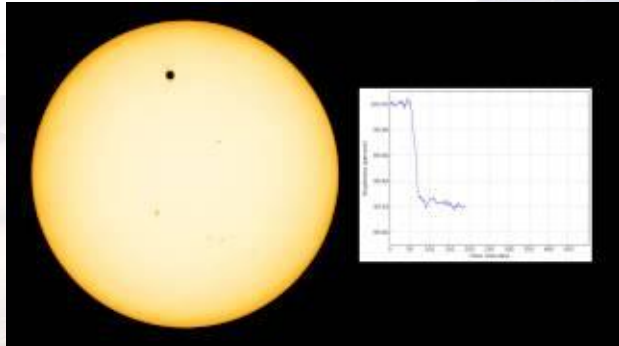
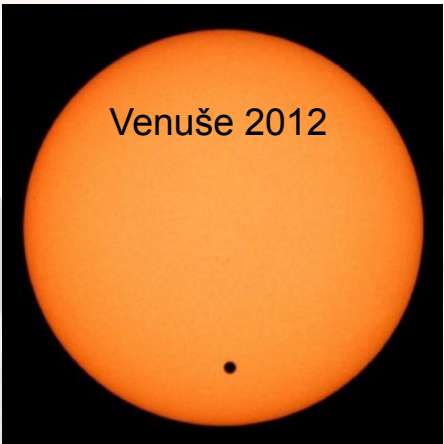


Tranzitní metoda je neúspěšnější ze všech metod objevování exoplanet

Princip tranzitu

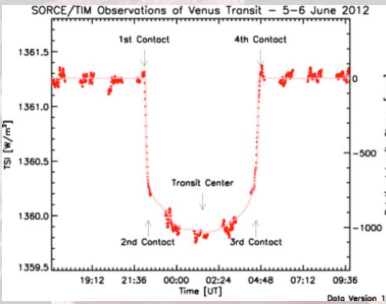
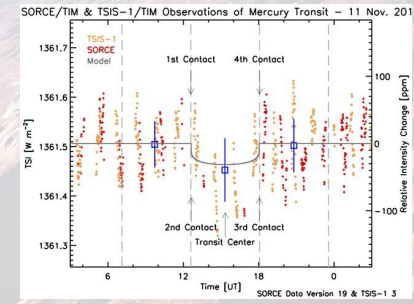


Princip tranzitu



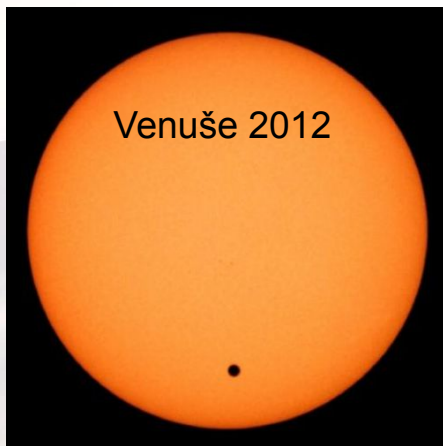
Pozorování ze **SORCE** (Solar Radiation and Climate Experiment)

<https://lasp.colorado.edu/sorce/2012/06/10/observations-of-the-venus-transit-total-i-radiance/>



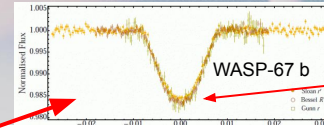
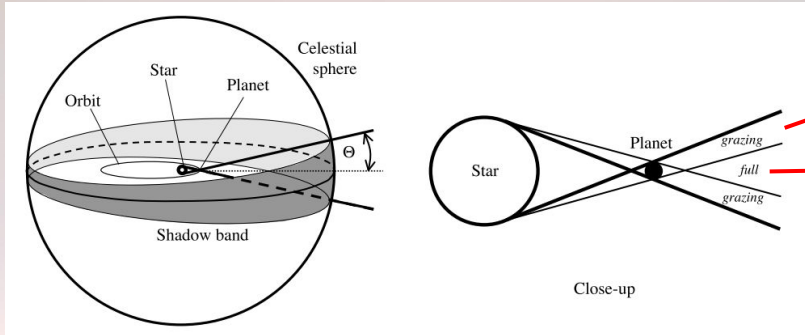
https://www.researchgate.net/publication/358143273_Final_Report_for_SAG_21_The_Effect_of_Stellar_Contamination_on_Space-based_Transmission_Spectroscopy

Princip tranzitu

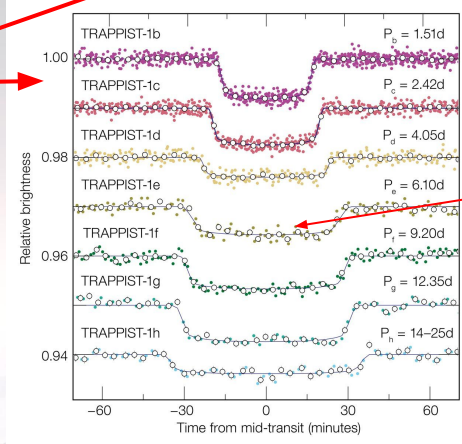


1. Pozorovatelnost a vlastnosti tranzitu budou záviset na orientaci a vlastnostech dráhy
2. Délka a tvar tranzitu budou záviset na periodě a vzájemném poměru velikostí planeta-hvězda
3. Hloubka tranzitu bude souviset se vzájemným poměrem velikostí planeta-hvězda
4. Tvar a pozorovatelnost tranzitu bude záviset na vlastnostech hvězdy
5. Kromě tranzitu musí nutně existovat i okultace (planeta za hvězdou)
6. Křivka mimo tranzit není konstantní (planeta přispívá odraženým světlem)
7. U tranzitujících planet lze zkoumat atmosféry exoplanet

Pravděpodobnost tranzitu



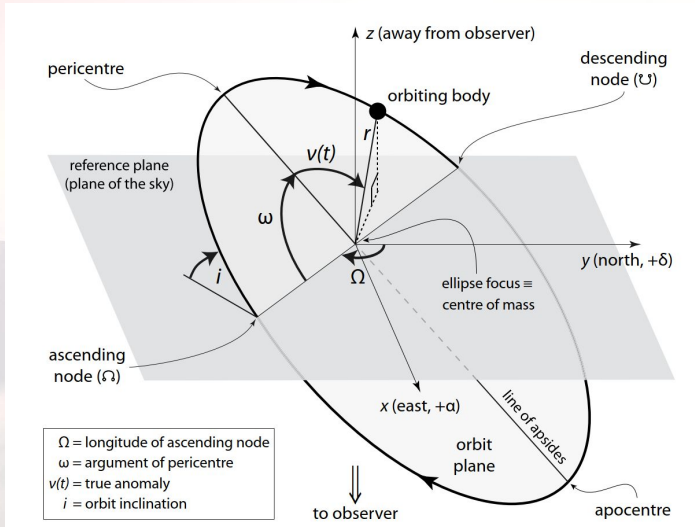
Chybí zastávka v minimu jasnosti



Nastává zastávka v minimu jasnosti

$$p_{\text{tra}} = \left(\frac{R_{\star} \pm R_p}{a} \right) \left(\frac{1 + e \sin \omega}{1 - e^2} \right),$$

$$p_{\text{occ}} = \left(\frac{R_{\star} \pm R_p}{a} \right) \left(\frac{1 - e \sin \omega}{1 - e^2} \right),$$



Minimální inklinace, aby nastal úplný tranzit

$$\cos i_{\text{min}} = (R_{\star} / a)$$

Oblast, kdy nastává částečný zákryt

$$a \cos i = (R_{\star} \pm R_p)$$

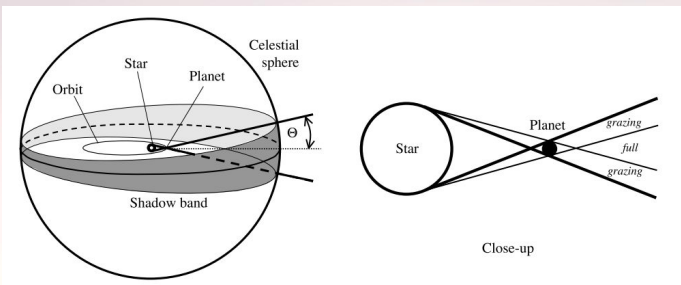
$$p = \frac{R_{\star}}{a} \approx 0.005 \left(\frac{R_{\star}}{R_{\odot}} \right) \left(\frac{a}{1 \text{ au}} \right)^{-1}$$

Čím blíže je planeta hvězdě a čím větší hvězda, tím větší pravděpodobnost, že bude tranzit pozorovatelný

Pravděpodobnost tranzitu

Kaltenegger&Faherty 2021, Nature, 594, 505:

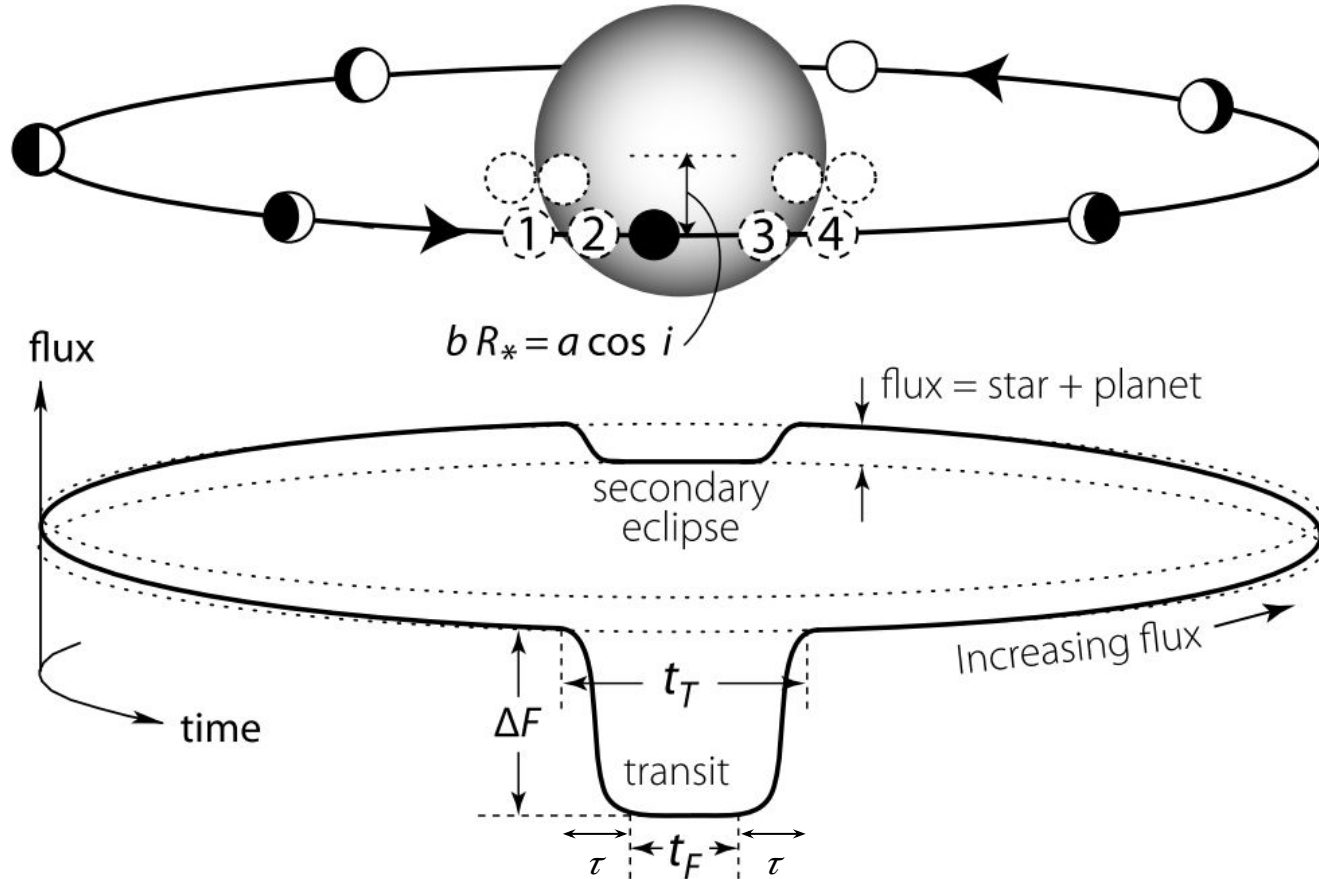
- 2034 hvězd hlavní posloupnosti blíže než 100 pc v oblasti, kde byl/je/bude vidět tranzit Země +-5000 letech (94 % nejméně po dobu 1000 let)
- 75 hvězd mohlo zaznamenat rádiové signály ze Země
- 7 systémů má planety



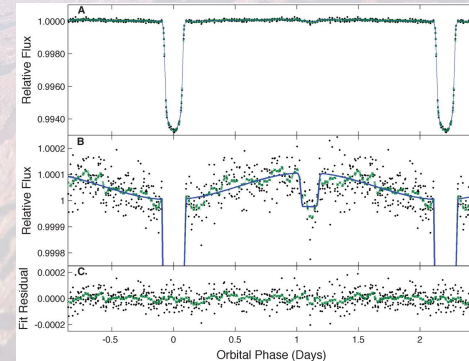
Země: 0.27°
Jupiter: 0.05°

Star name	GAIA eDR3	Entry (yr)	Exit (yr)	Total (yr)	When
Ross 128	3796072592206250624	-3,057	-900	2,158	Past
Teegarden's Star	35227046884571776	29	438	410	Future
GJ 9066	76868614540049408	846	1,777	932	Future
TRAPPIST-1	2635476908753563008	1,642	4,012	2,371	Future
K2-65	2613211076737129856	-2,183	5,000	7,184	Past and future
K2-155	145333927996558976	-5,000	3,118	8,119	Past and future
K2-240	6257625719430982016	-5,000	5,000	10,000	Past and future

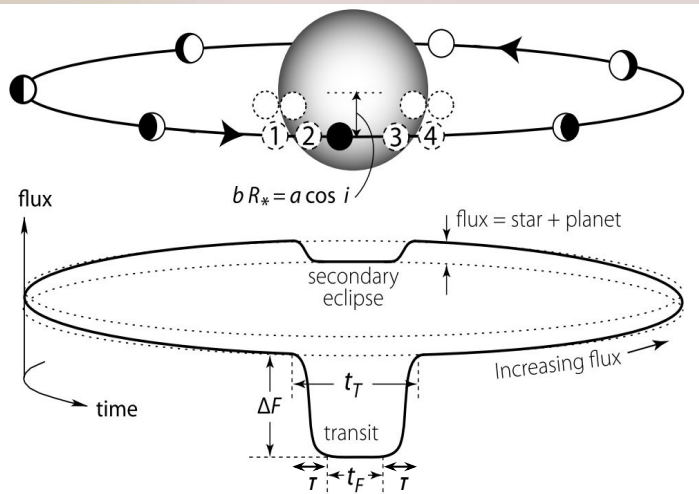
Parametry tranzitu



- P - perioda
- ΔF - hloubka tranzitu
- t_T - celkový čas poklesu jasnosti
- t_F - doba totálního zákrytu
- τ - doba vstupu/výstupu do/z minima jasnosti
- b - impakt parametru



Parametry tranzitu



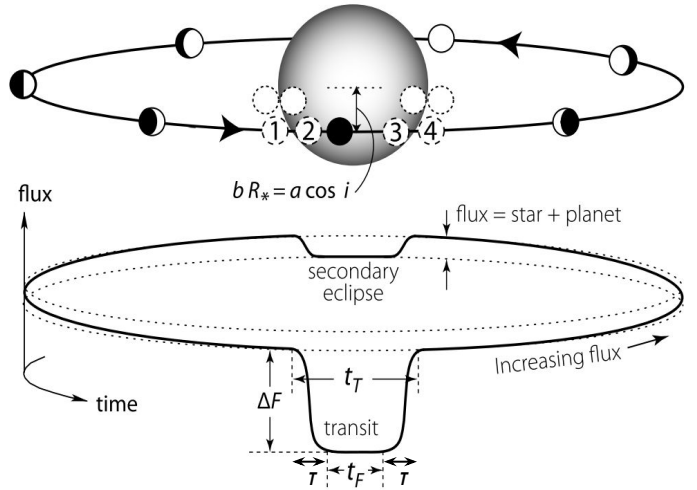
Relativní pokles toku

$$\Delta F = \Delta L = \frac{4\pi\sigma R_*^2 T_{\text{eff}}^4 - 4\pi\sigma (R_*^2 - R_P^2) T_{\text{eff}}^4}{4\pi\sigma R_*^2 T_{\text{eff}}^4} = \left(\frac{R_P}{R_*}\right)^2$$

Relativní pokles hv. velikosti

$$\Delta m = -2.5 \log \left(1 - \frac{R_P^2}{R_*^2}\right) \sim \Delta F$$

Parametry tranzitu



Relativní pokles toku

$$\Delta F = \Delta L = \frac{4\pi\sigma R_*^2 T_{\text{eff}}^4 - 4\pi\sigma (R_*^2 - R_P^2) T_{\text{eff}}^4}{4\pi\sigma R_*^2 T_{\text{eff}}^4} = \left(\frac{R_P}{R_*}\right)^2$$

$$\Delta m = -2.5 \log \left(1 - \frac{R_P^2}{R_*^2} \right) \sim \Delta F$$

$$\Delta F_{\text{Zeme}}^{\text{Slunce}} \approx 0.01 \%$$

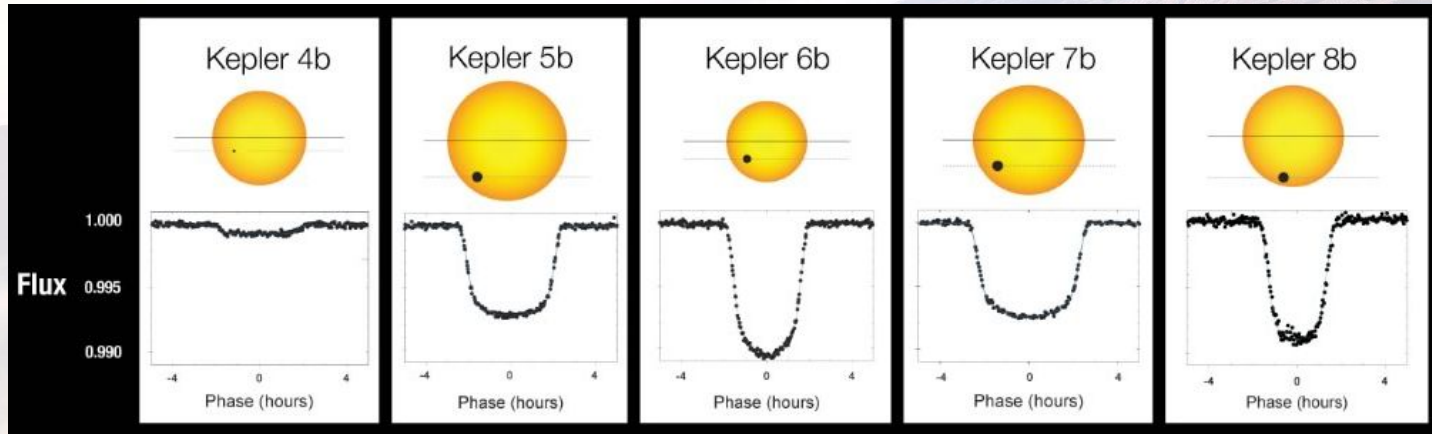
$$\Delta F_{\text{Zeme}}^{\text{Proxima Cen}} \approx 0.4 \%$$

$$\Delta F_{\text{Zeme}}^{\text{Trappist-1}} \approx 0.6 \%$$

$$\Delta F_{\text{Jupiter}}^{\text{Slunce}} \approx 1 \%$$

$$\Delta F_{\text{Jupiter}}^{\text{Proxima Cen}} \approx 48 \%$$

$$\Delta F_{\text{Jupiter}}^{\text{Trappist-1}} \approx 71 \%$$



Parametry tranzitu

Relativní pokles toku

$$\Delta F = \Delta L = \frac{4\pi\sigma R_*^2 T_{\text{eff}}^4 - 4\pi\sigma (R_*^2 - R_P^2) T_{\text{eff}}^4}{4\pi\sigma R_*^2 T_{\text{eff}}^4} = \left(\frac{R_P}{R_*}\right)^2$$

Relativní pokles hv. velikosti

$$\Delta m = -2.5 \log \left(1 - \frac{R_P^2}{R_*^2}\right) \sim \Delta F$$

$$\Delta F_{\text{Zeme}}^{\text{Slunce}} \approx 0.01 \%$$

$$\Delta F_{\text{Zeme}}^{\text{Proxima Cen}} \approx 0.4 \%$$

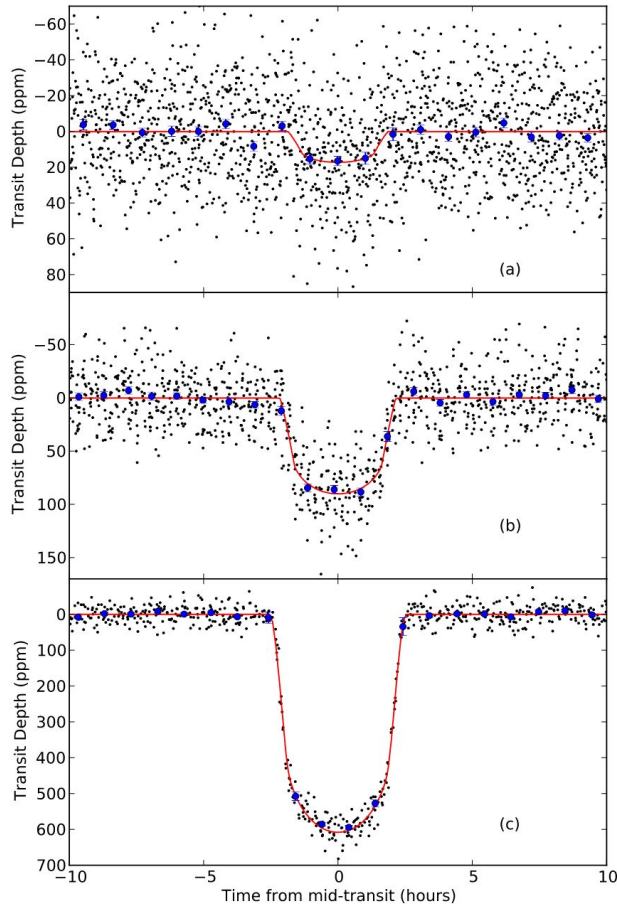
$$\Delta F_{\text{Zeme}}^{\text{Trappist-1}} \approx 0.6 \%$$

$$\Delta F_{\text{Jupiter}}^{\text{Slunce}} \approx 1 \%$$

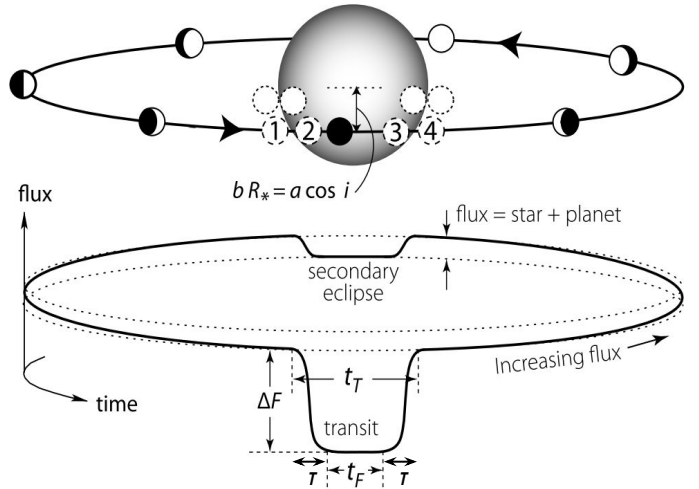
$$\Delta F_{\text{Jupiter}}^{\text{Proxima Cen}} \approx 48 \%$$

$$\Delta F_{\text{Jupiter}}^{\text{Trappist-1}} \approx 71 \%$$

Kepler 37 b - planeta s nejmenším detekovaným tranzitem 15 ppm a poloměrem cca $0.27 R_Z$ (Barclay et al. 2013, Natur, 494, 452)



Parametry tranzitu



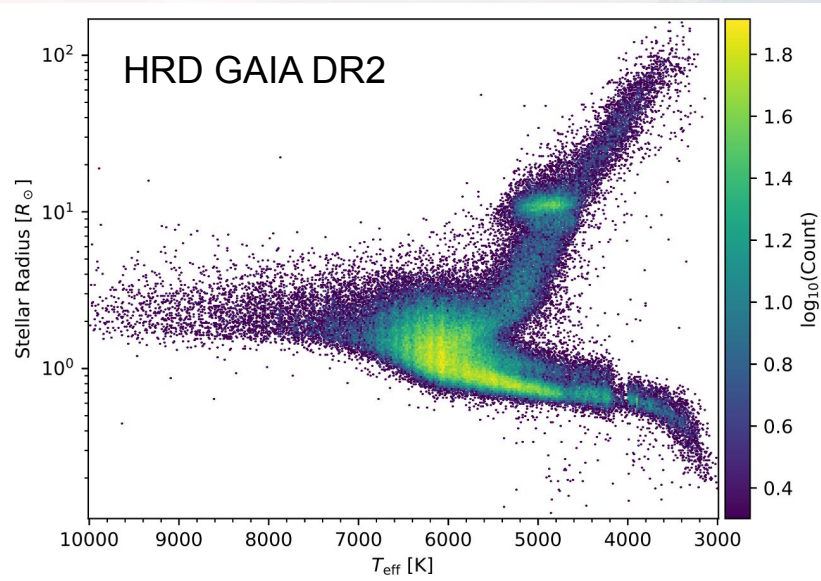
Relativní pokles toku

$$\Delta F = \Delta L = \frac{4\pi\sigma R_*^2 T_{\text{eff}}^4 - 4\pi\sigma (R_*^2 - R_P^2) T_{\text{eff}}^4}{4\pi\sigma R_*^2 T_{\text{eff}}^4} = \left(\frac{R_P}{R_*}\right)^2$$

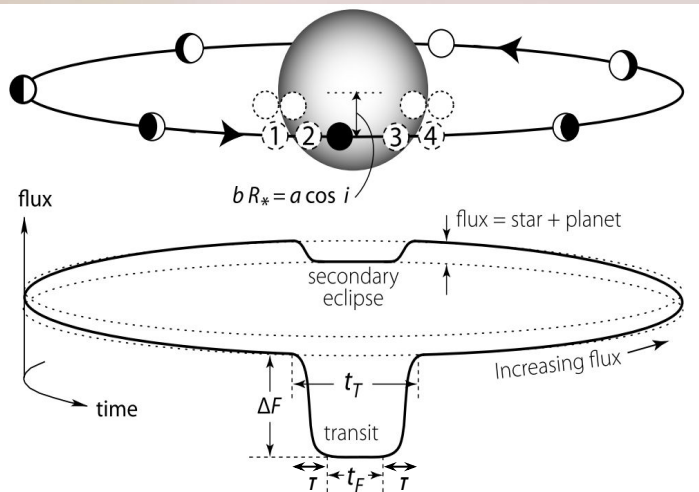
Relativní pokles hv. velikosti

$$\Delta m = -2.5 \log \left(1 - \frac{R_P^2}{R_*^2}\right) \sim \Delta F$$

Z hloubky tranzitu lze při DOBRÉ znalosti poloměru hvězdy určit poloměr planety

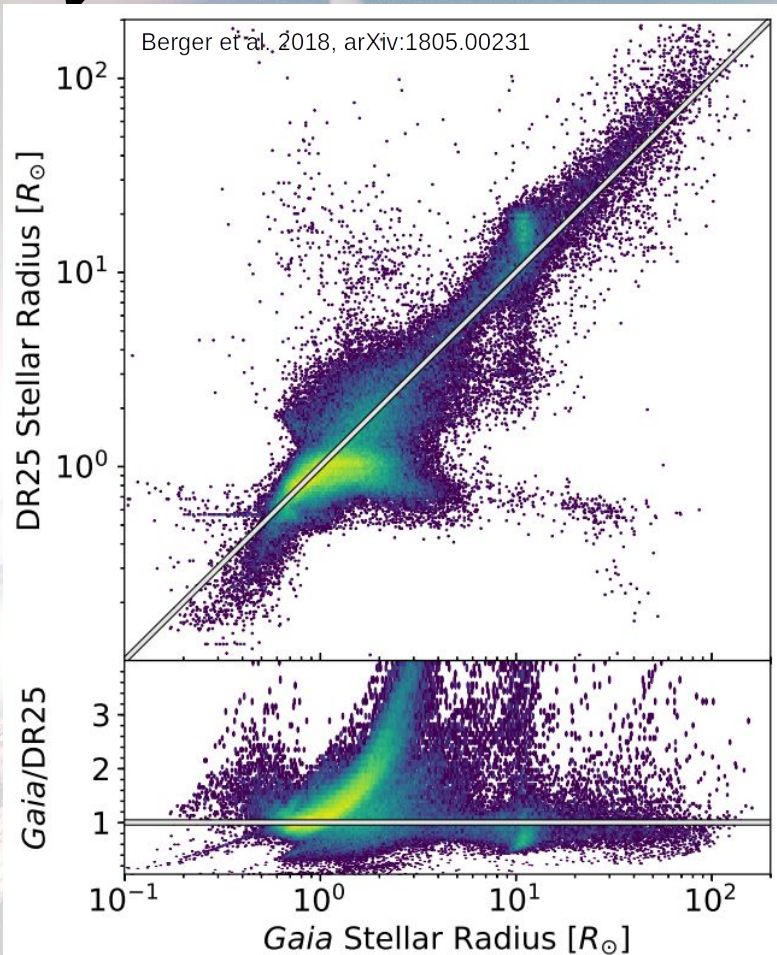


Parametry tranzitu



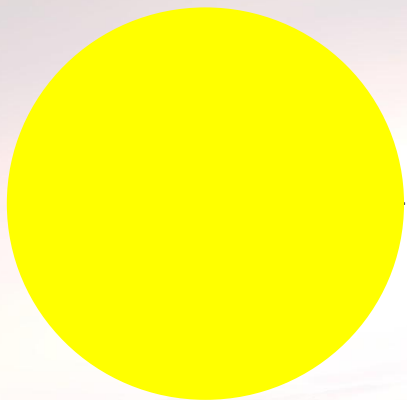
Z hloubky tranzitu lze při DOBRÉ znalosti poloměru hvězdy určit poloměr planety

Pro netranzitující exoplanety, které nemají změřeny radiální rychlosti je pořád nenulová pravděpodobnost, že se nejedná o exoplanety!



GAIA DR2
Vs
KIC DR25

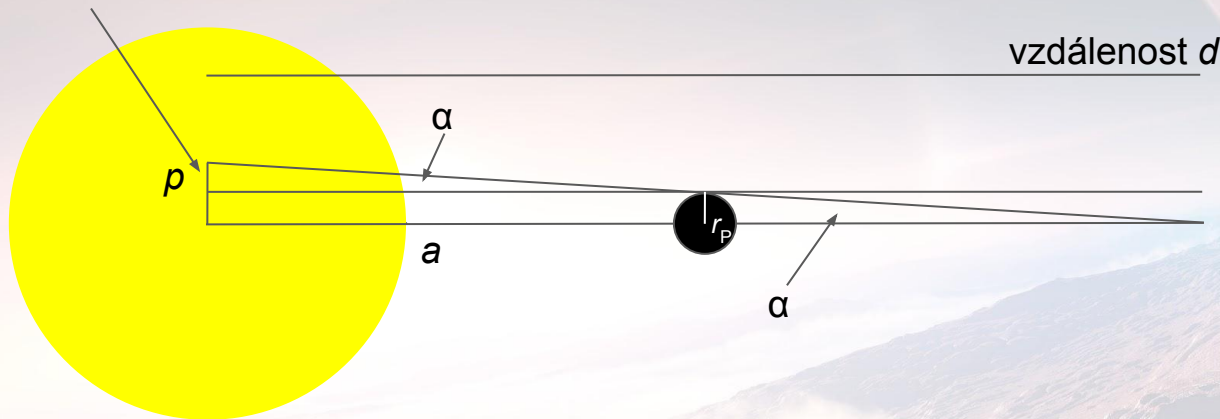
Záleží určení poloměru na vzdálenosti exoplanety od hvězdy?



Záleží určení poloměru na vzdálenosti exoplanety od hvězdy?

NE :-)

Jak velký bude tento přírůstek p při pozorování ze vzdálenosti d pro různé vzdálenosti a planety od hvězdy?



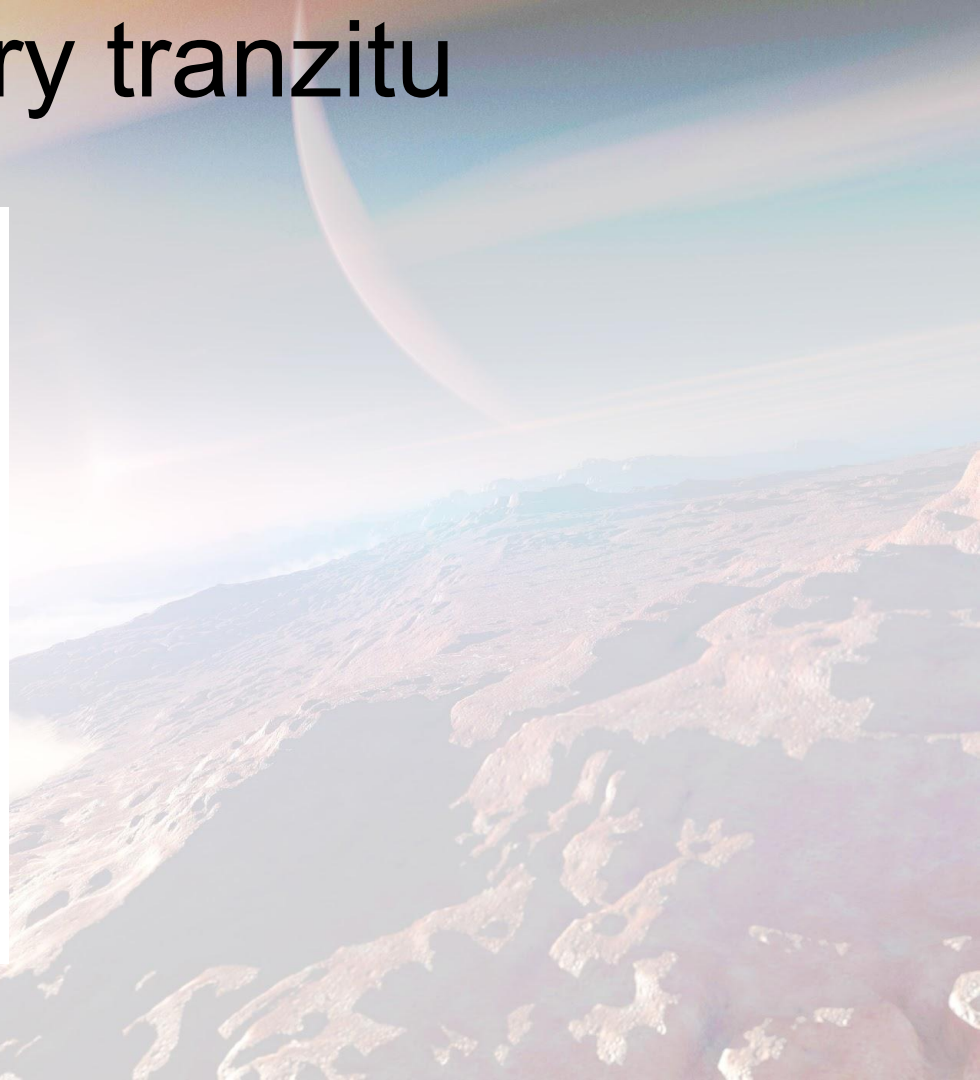
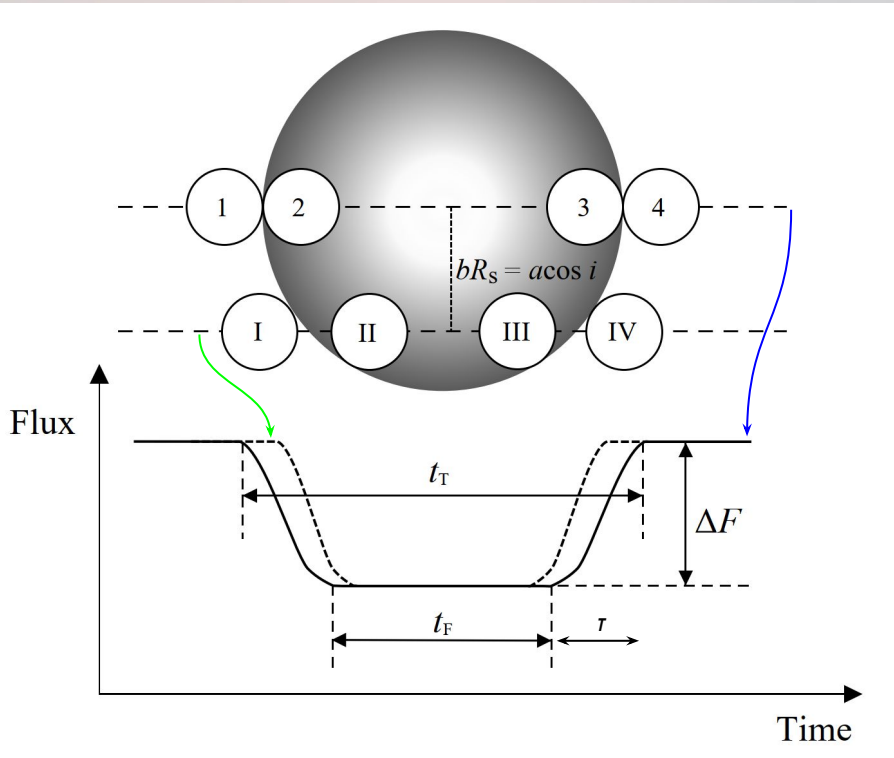
$$p = a \tan \alpha \approx a \cdot \alpha$$

$$\alpha \approx \frac{r_P}{d}$$

$$d=1 \text{ pc}, a=1 \text{ au}, r_P=1 R_J \rightarrow p=0.34 \text{ km}$$

Na vesmírných vzdálenostech má vzdálenost planeta-hvězda zcela zanedbatelný vliv na určení poloměru planety

Parametry tranzitu



Parametry tranzitu

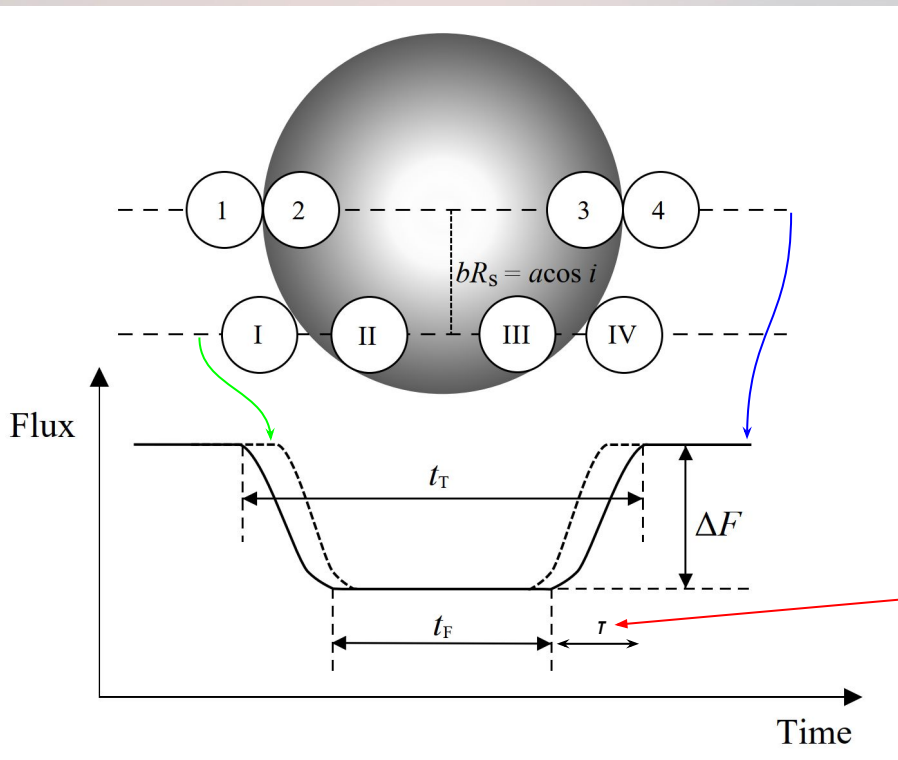
$$b = \frac{a \cos i}{R_*} \left(\frac{1 - e^2}{1 + e \sin \omega} \right)$$

Kruhové dráhy:

$$t_T = \frac{P}{\pi} \arcsin \left[\frac{R_* \sqrt{(1 + \sqrt{\Delta F})^2 - b^2}}{a \sin i} \right]$$

$$t_F = \frac{P}{\pi} \arcsin \left[\frac{R_* \sqrt{(1 - \sqrt{\Delta F})^2 - b^2}}{a \sin i} \right]$$

$$\tau \approx \frac{R_* P \sqrt{\Delta F}}{\pi a \sqrt{1 - b^2}}$$



Parametry tranzitu

$$b = \frac{a \cos i}{R_*} \left(\frac{1 - e^2}{1 + e \sin \omega} \right)$$

Kruhové dráhy:

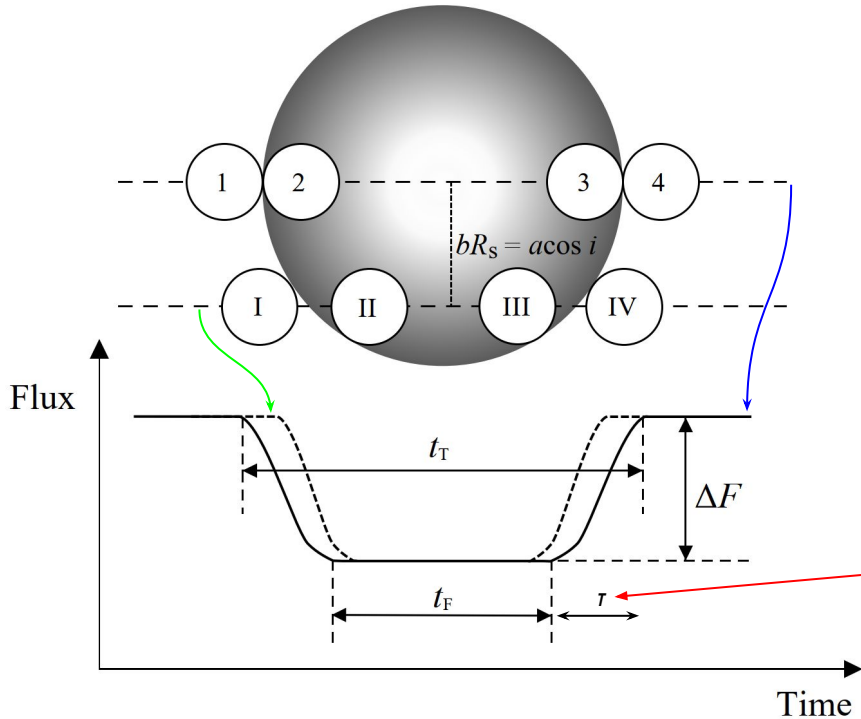
$$t_T = \frac{P}{\pi} \arcsin \left[\frac{R_*}{a} \frac{\sqrt{(1 + \sqrt{\Delta F})^2 - b^2}}{\sin i} \right]$$

$$t_F = \frac{P}{\pi} \arcsin \left[\frac{R_*}{a} \frac{\sqrt{(1 - \sqrt{\Delta F})^2 - b^2}}{\sin i} \right]$$

$$\tau \approx \frac{R_* P \sqrt{\Delta F}}{\pi a \sqrt{1 - b^2}}$$

$$t_T \approx 13 \left(\frac{M_\star}{M_\odot} \right)^{-1/2} \left(\frac{a}{1 \text{ au}} \right)^{1/2} \left(\frac{R_\star}{R_\odot} \right) \text{ hodin}$$

$$t_T^{\text{Zeme}} \approx 13 \text{ hodin} \quad t_T^{\text{Jupiter}} \approx 30 \text{ hodin}$$



Problém detekovat a analyzovat exoplanety na širokých drahách

Parametry tranzitu

$$b = \frac{a \cos i}{R_*} \left(\frac{1 - e^2}{1 + e \sin \omega} \right)$$

Kruhové dráhy:

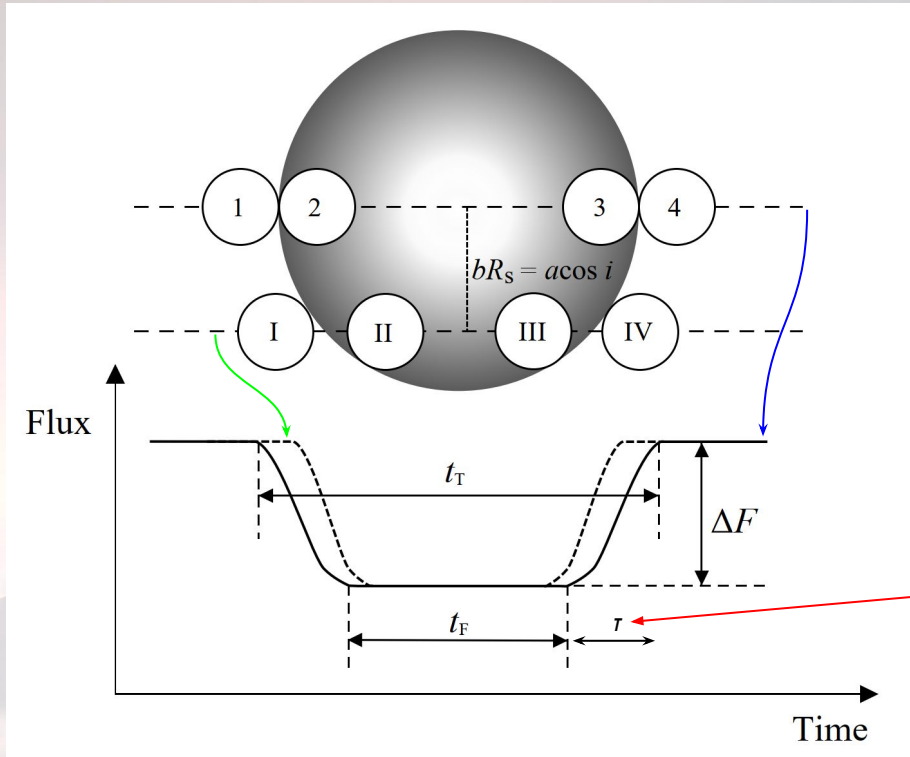
$$t_T = \frac{P}{\pi} \arcsin \left[\frac{R_* \sqrt{(1 + \sqrt{\Delta F})^2 - b^2}}{a \sin i} \right]$$

$$t_F = \frac{P}{\pi} \arcsin \left[\frac{R_* \sqrt{(1 - \sqrt{\Delta F})^2 - b^2}}{a \sin i} \right]$$

$$\tau \approx \frac{R_* P \sqrt{\Delta F}}{\pi a \sqrt{1 - b^2}}$$

Z tvaru tranzitu lze odhadnout hustotu hvězdy

$$\rho_* = \frac{3\pi}{GP^2} \left(\frac{a}{R_*} \right)^3 = \frac{32P}{G\pi} (t_T^2 - t_F^2)^{-\frac{3}{2}} \Delta F^{\frac{3}{4}}$$



Parametry tranzitu

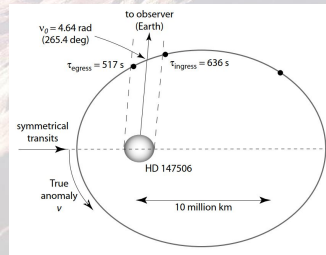
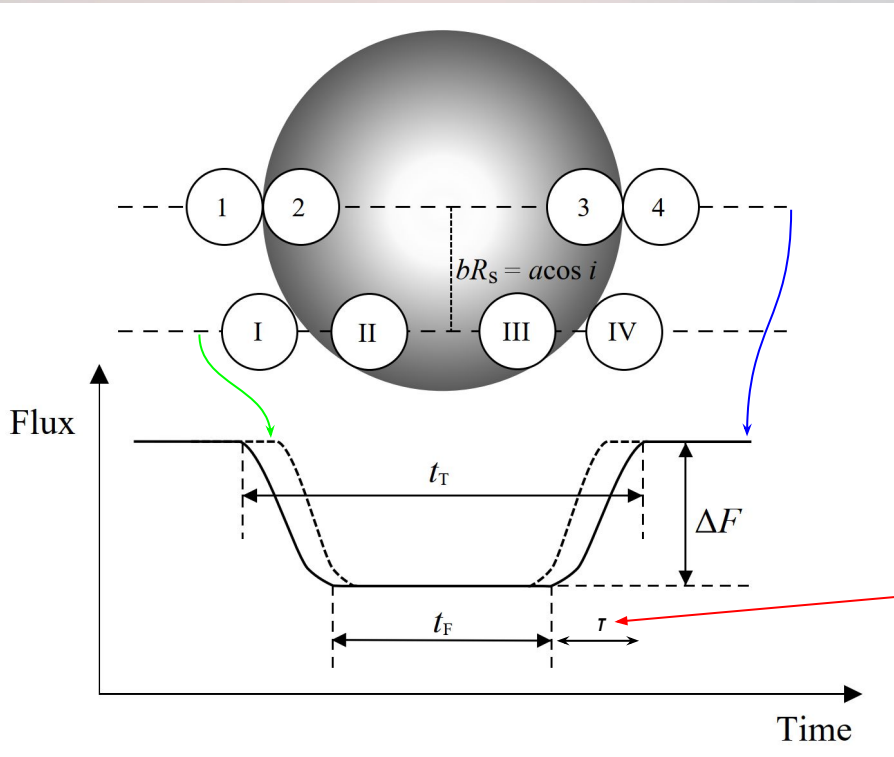
$$b = \frac{a \cos i}{R_*} \left(\frac{1 - e^2}{1 + e \sin \omega} \right)$$

Kruhové dráhy:

$$t_T = \frac{P}{\pi} \arcsin \left[\frac{R_*}{a} \frac{\sqrt{(1 + \sqrt{\Delta F})^2 - b^2}}{\sin i} \right]$$

$$t_F = \frac{P}{\pi} \arcsin \left[\frac{R_*}{a} \frac{\sqrt{(1 - \sqrt{\Delta F})^2 - b^2}}{\sin i} \right]$$

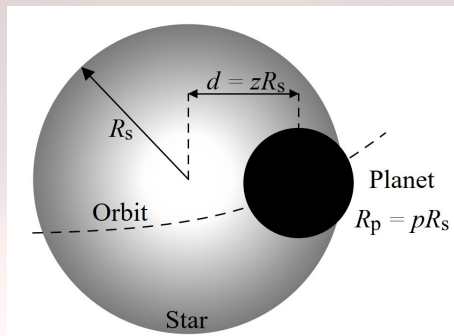
$$\tau \approx \frac{R_* P \sqrt{\Delta F}}{\pi a \sqrt{1 - b^2}}$$



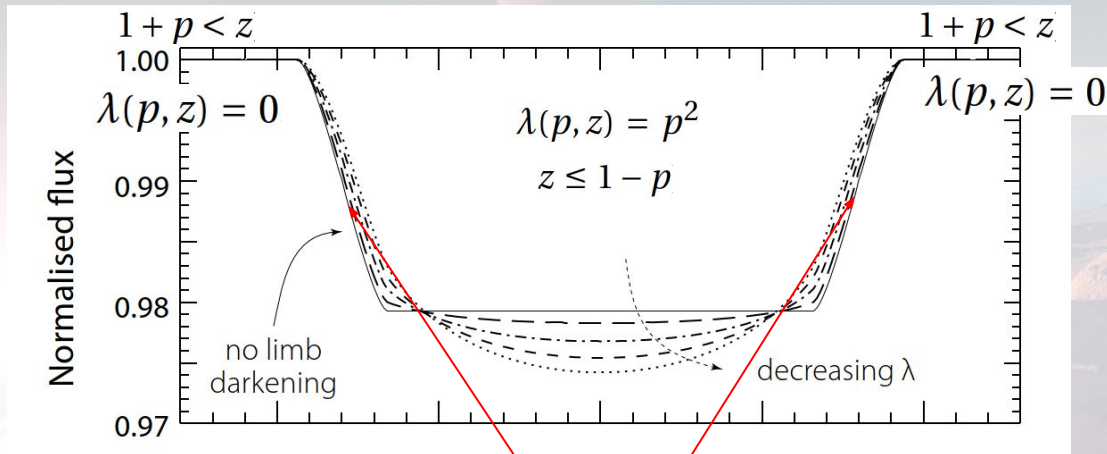
U eliptických drah mohou být v závislosti na orientaci dráhy časy poklesu a nárůstu jasnosti různé

Tvar tranzitu

Bez okrajového ztemnění:



$$F(p, z) = 1 - \lambda(p, z)$$



$$\lambda(p, z) = \frac{1}{\pi} \left[p^2 \kappa_0 + \kappa_1 - \sqrt{\frac{4z^2 - (1 + z^2 - p^2)^2}{4}} \right],$$

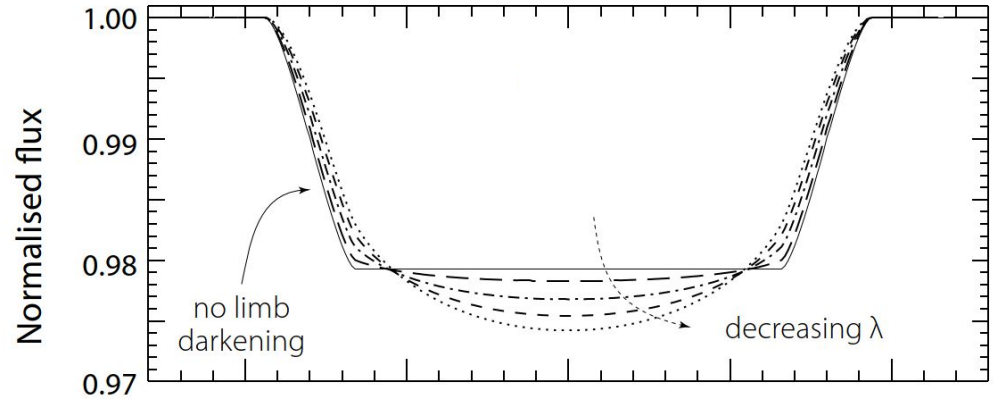
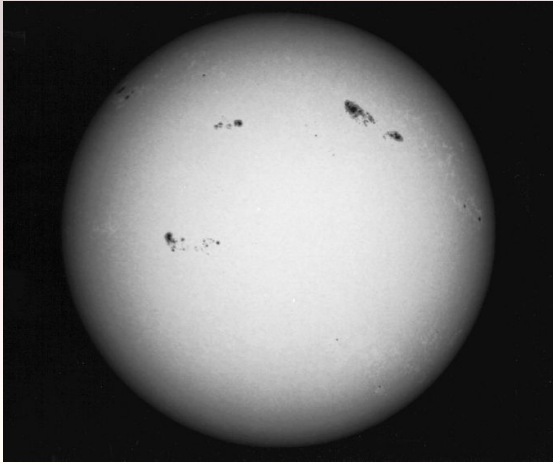
where $\kappa_0 = \cos^{-1}[(p^2 + z^2 - 1)/2pz]$,

and $\kappa_1 = \cos^{-1}[(1 - p^2 + z^2)/2z]$.

Tvar tranzitu

S okrajovým ztemněním:

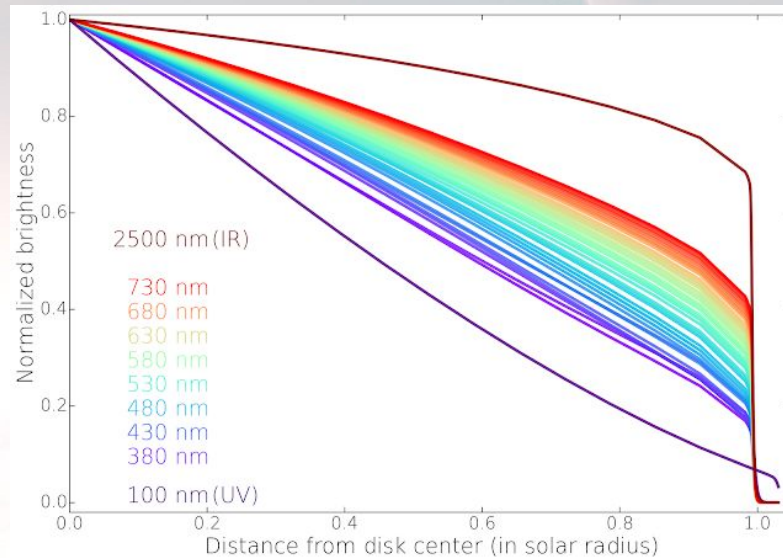
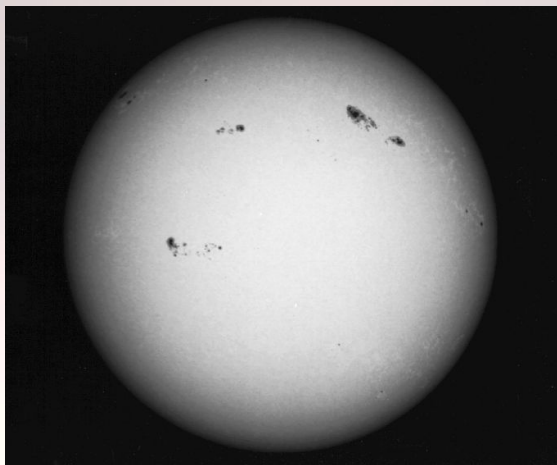
$$F(p, z) = \left[\int_0^1 I(r) 2r dr \right]^{-1} \int_0^1 I(r) dr \frac{d \left[F \left(\frac{p}{r}, \frac{z}{r} \right) r^2 \right]}{dr}$$



Jas hvězd klesá se vzdáleností od centra hvězdy:

- Z okrajových částí přichází méně záření
- V okrajových částech koukáme do oblastí s nižší teplotou

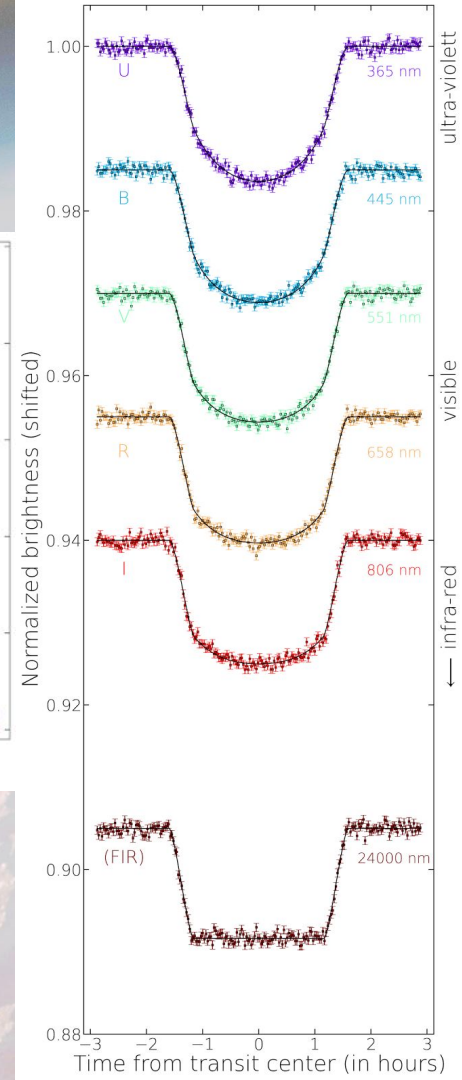
Tvar tranzitu



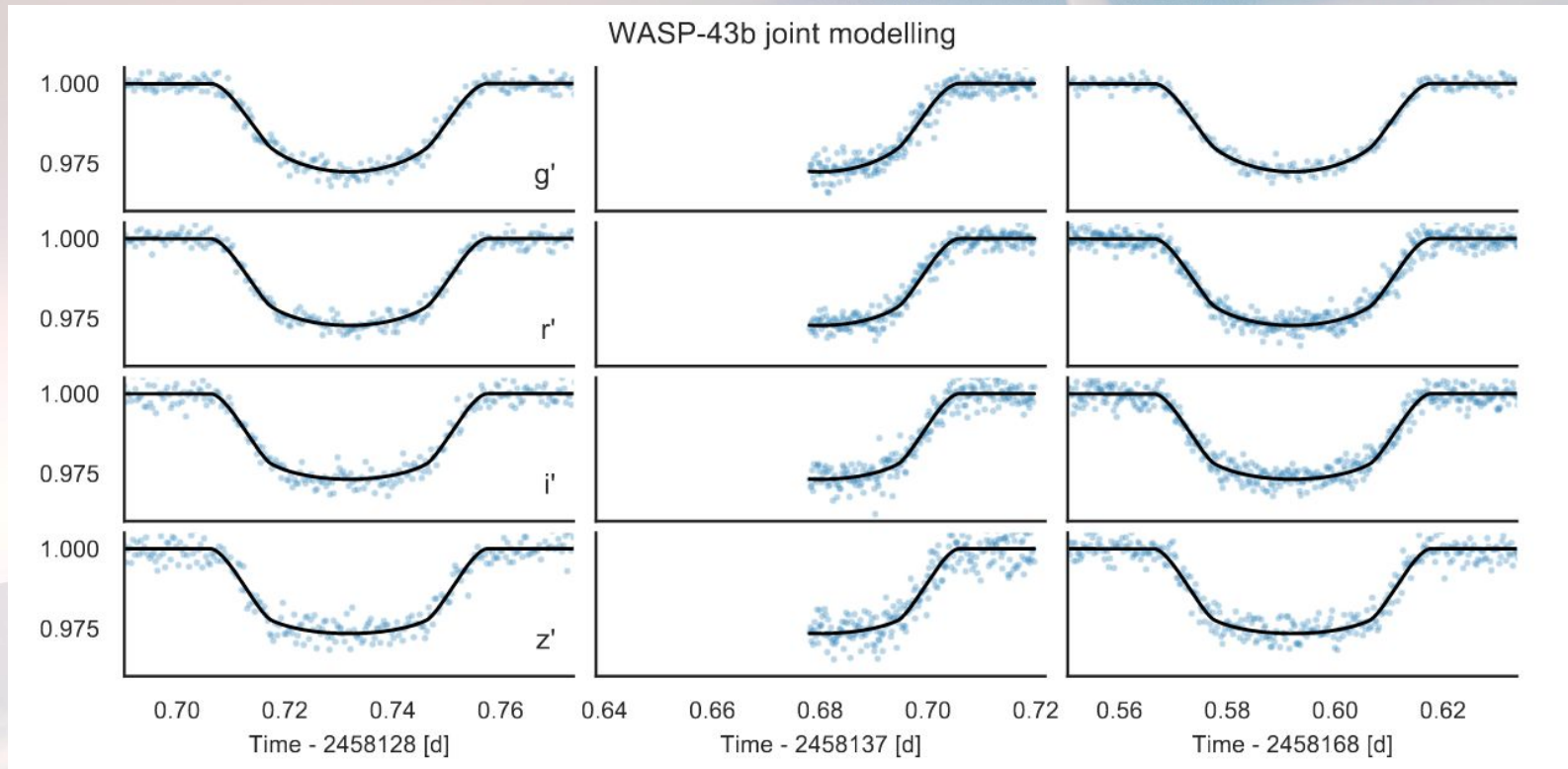
Vliv okrajového ztemnění klesá směrem k delším vlnovým délkám

Jas hvězd klesá se vzdáleností od centra hvězdy:

- Z okrajových částí přichází méně záření
- V okrajových částech koukáme do oblastí s nižší teplotou

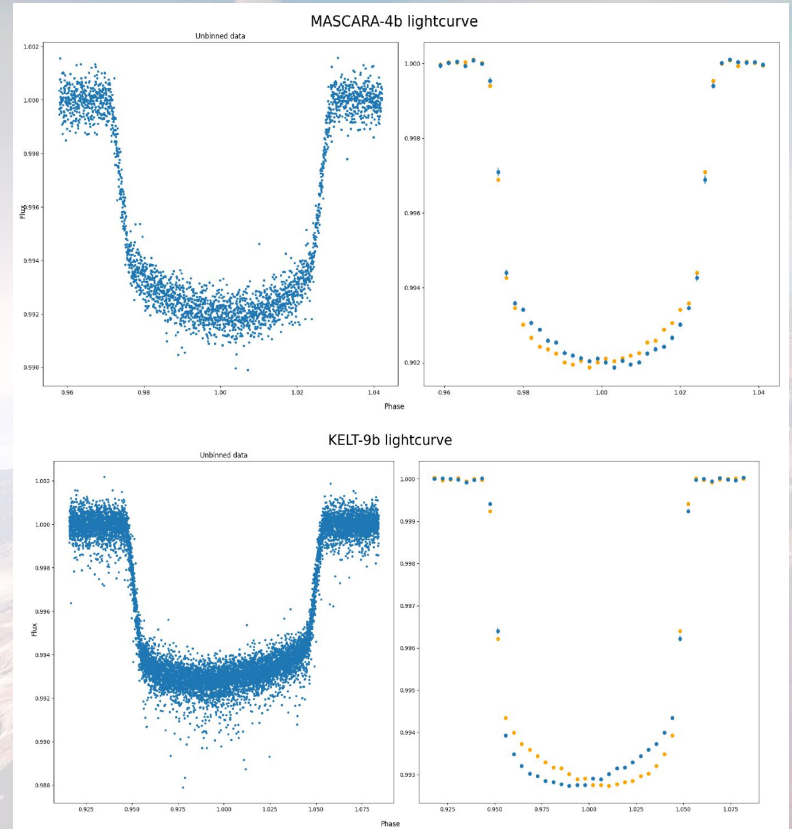
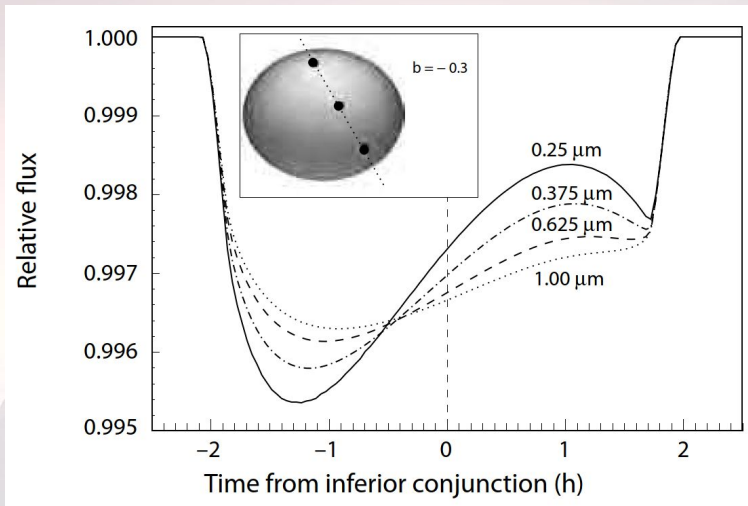


Tvar tranzitu



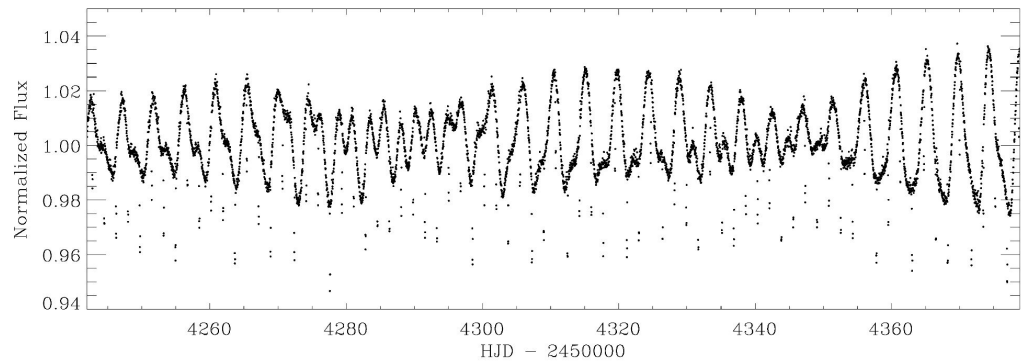
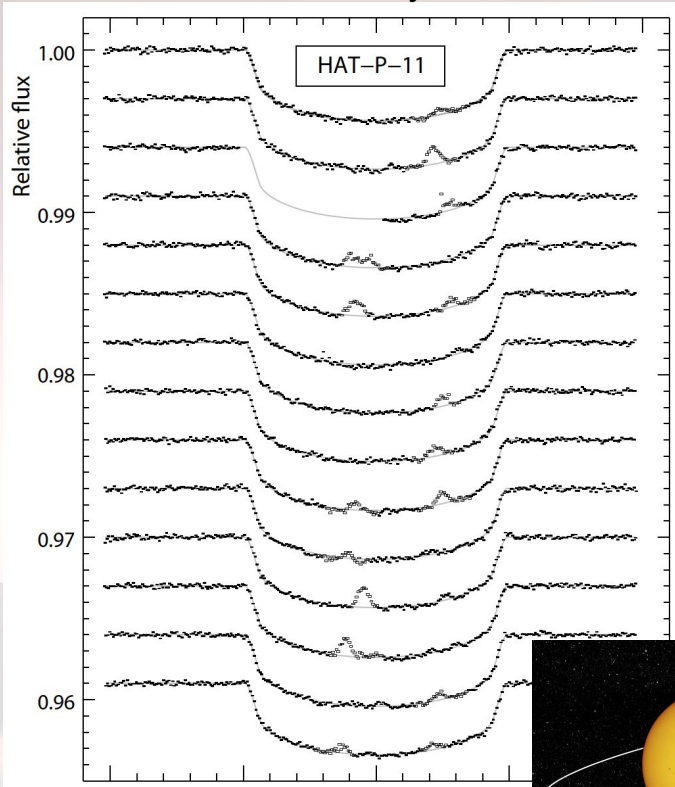
Tvar tranzitu - další informace

Gravitační ztemnění vlivem rotace hvězdy

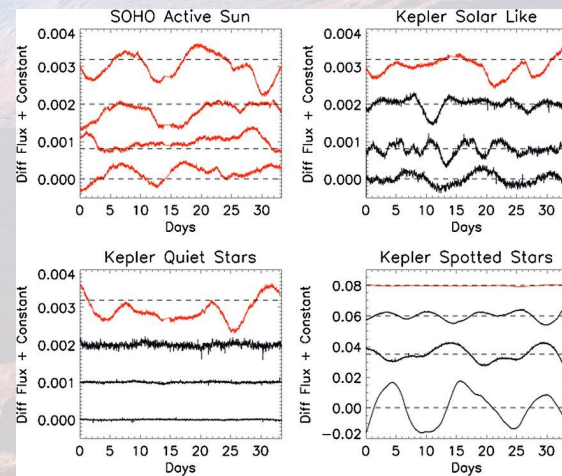
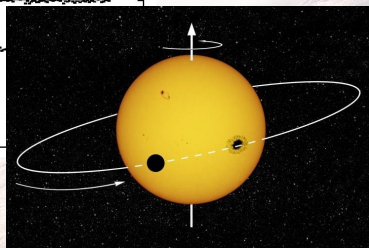


Tvar tranzitu - další informace

Skvrny

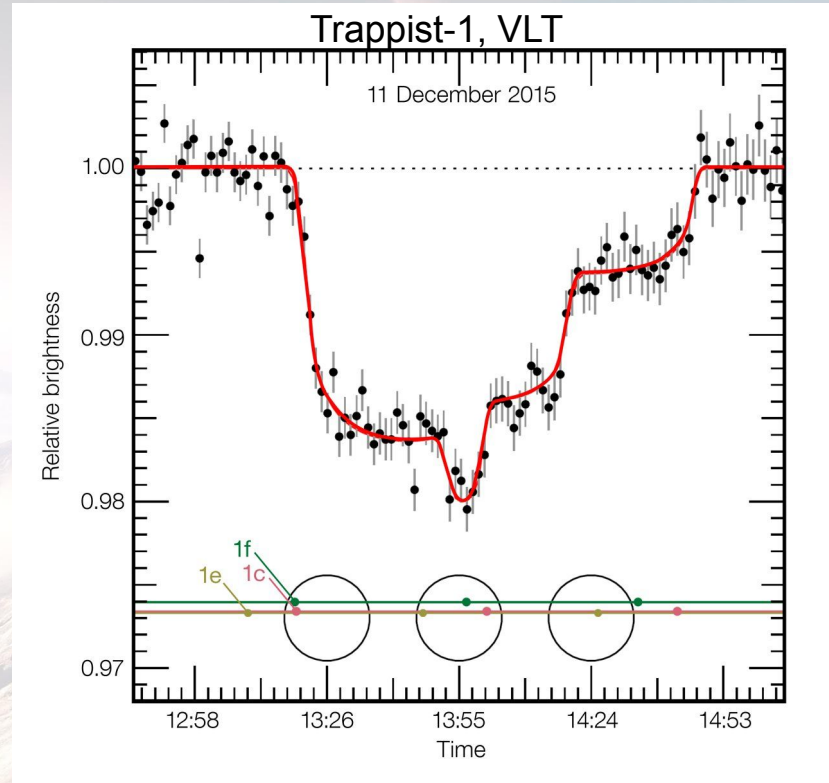
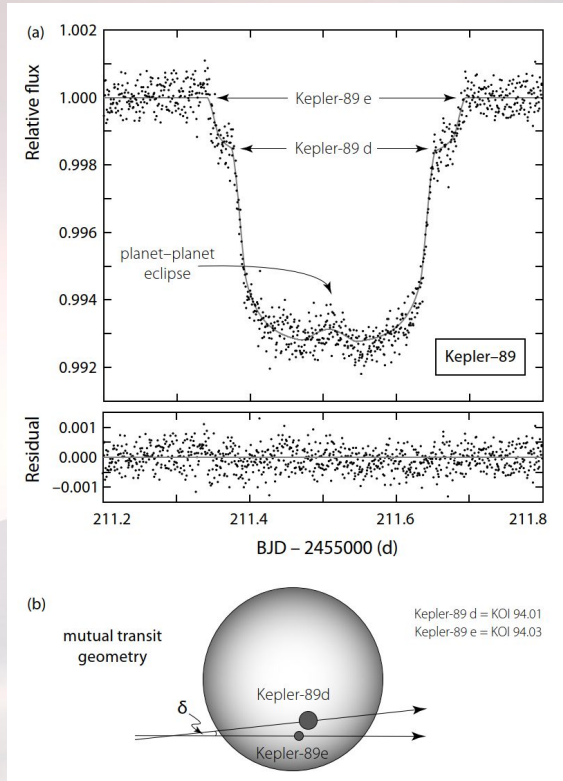


Bruno&Deleuil, [arXiv:2104.06173](https://arxiv.org/abs/2104.06173)



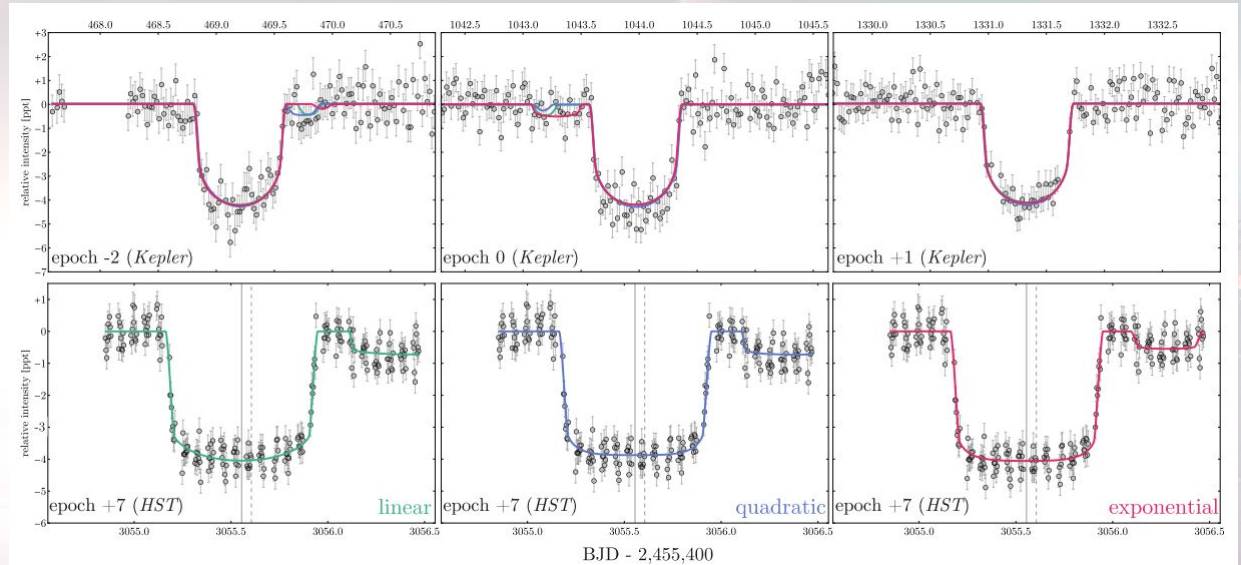
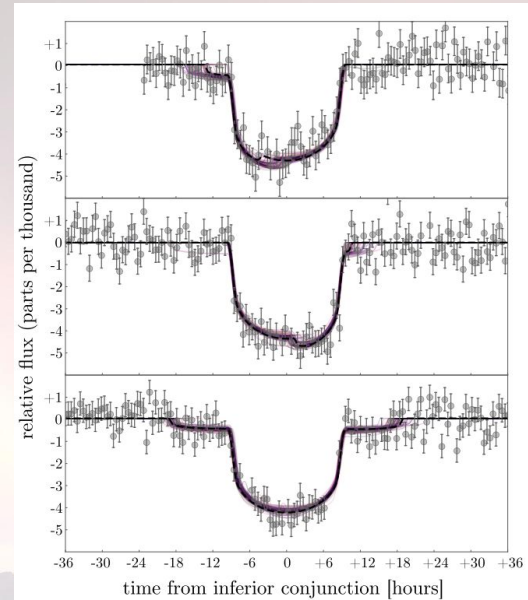
Tvar tranzitu - další informace

Další planety v systému



Tvar tranzitu - další informace

Exoměsíce?

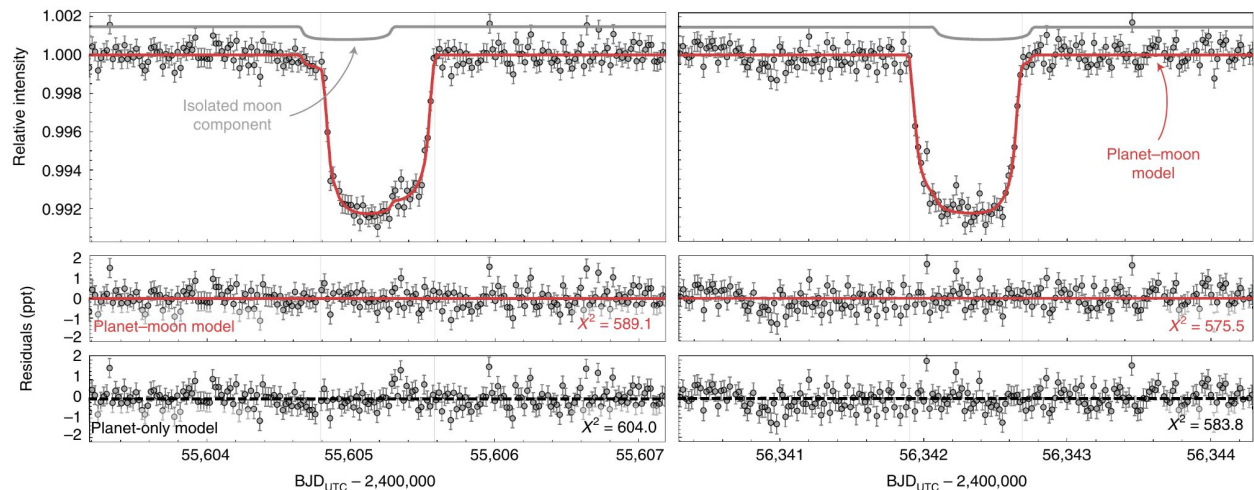
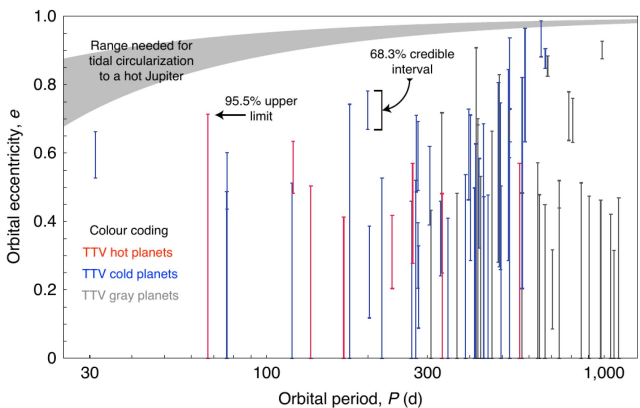


Teachey, Kipping, Schmitt 2018, AJ, 155, 36, měsíc okolo Kepler-1625 b, dosud spolehlivě nepotvrzeno/vyvráceno

Tvar tranzitu - další informace

Exoměsíce?

U planet blízkých svým mateřským hvězdám s vázanou rotací se nemohou vyskytovat měsíce

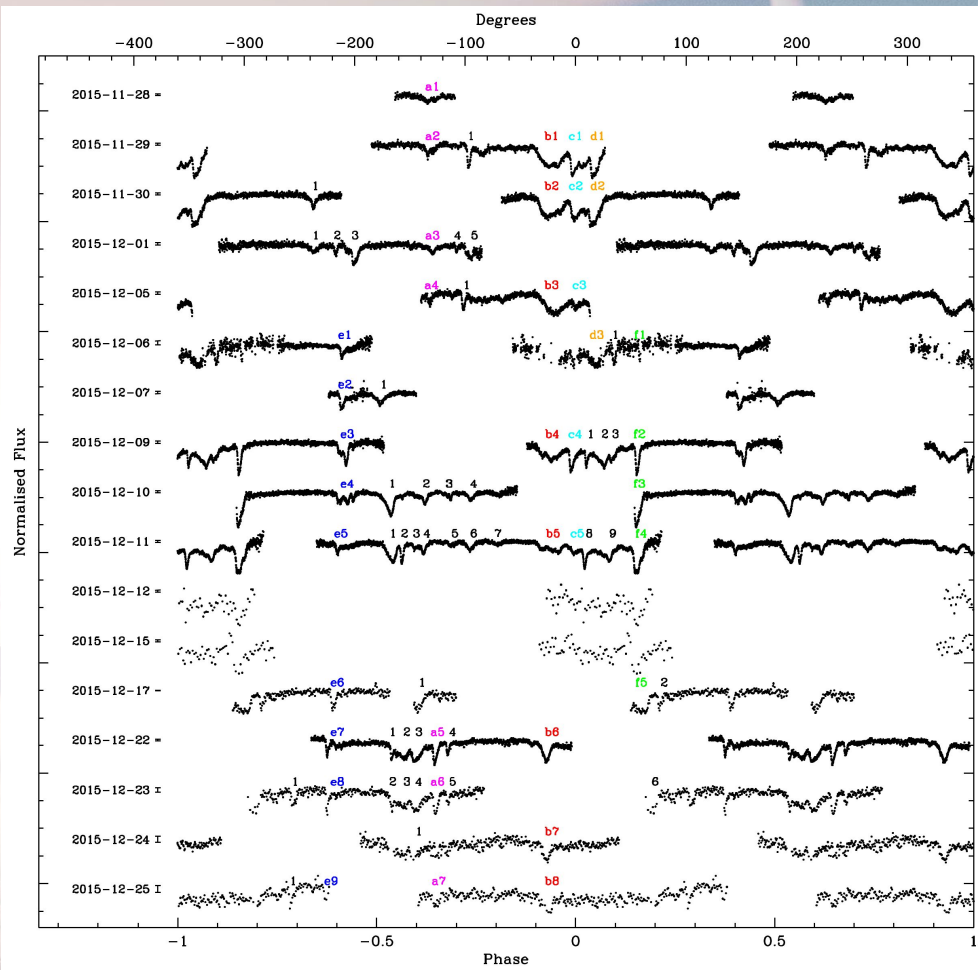


Kipping et al. 2022, NatAst, 6, 367, přehlídka 70 chladných obřích planet, Kepler-1708 b-i možná měsíc (2.6 R_E okolo planety s 4.6 R_J)

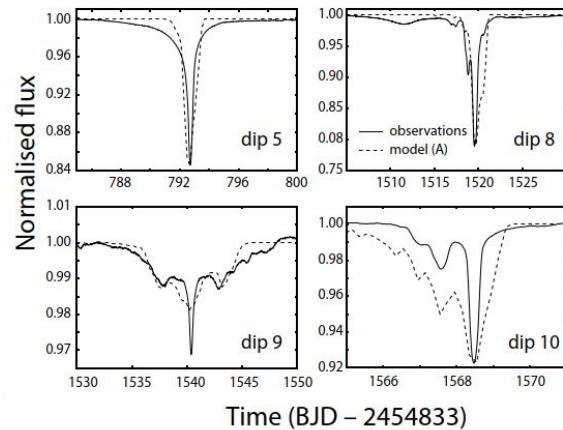
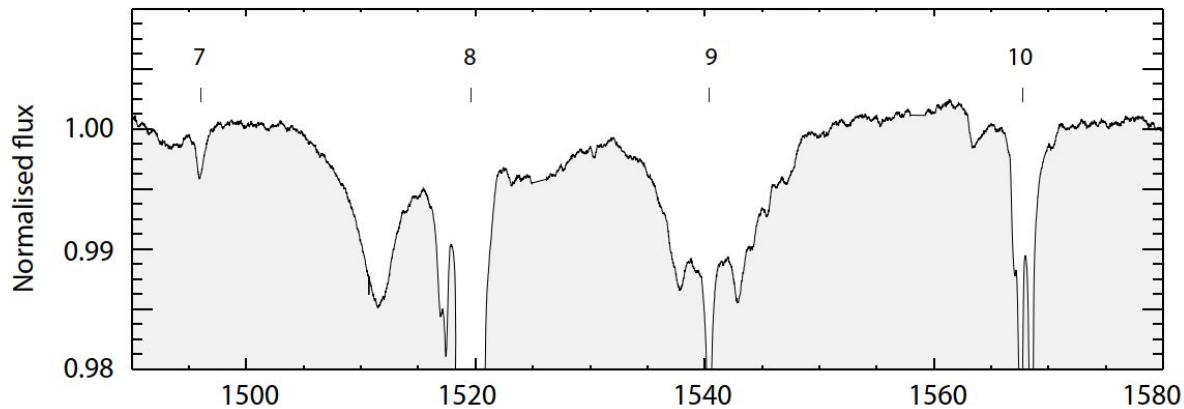
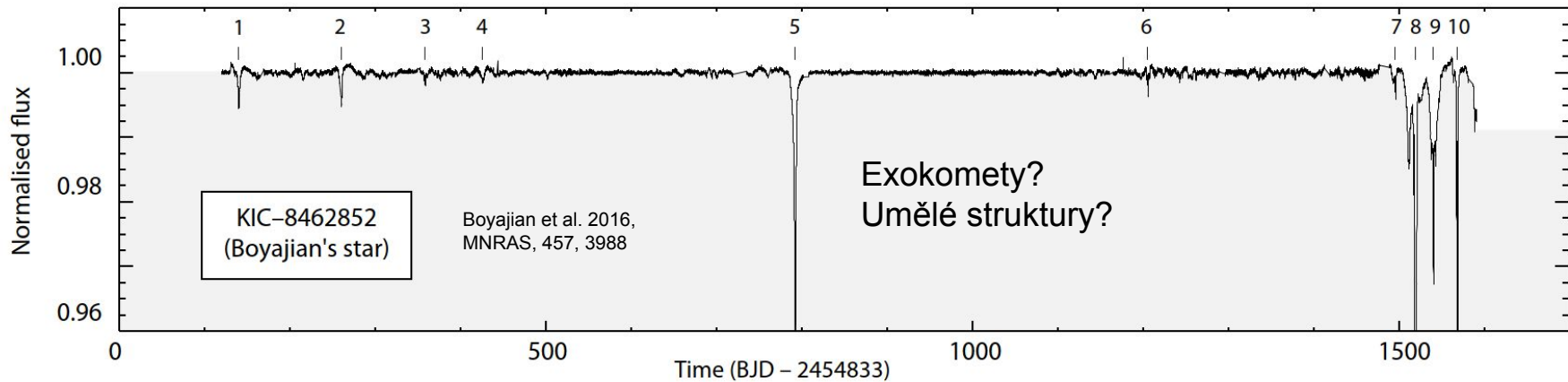
Tvar tranzitu - další informace

Gansicke et al. 2016, ApJL, 818, 7

Rozpadající se planeta okolo
bílého trpaslíka?

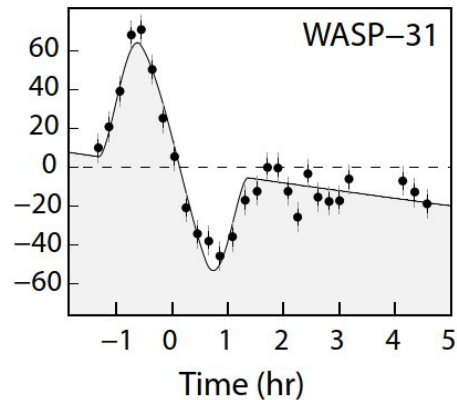
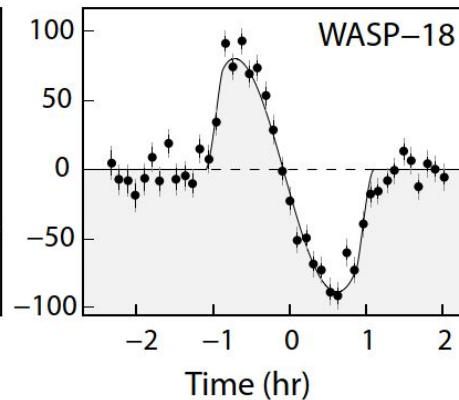
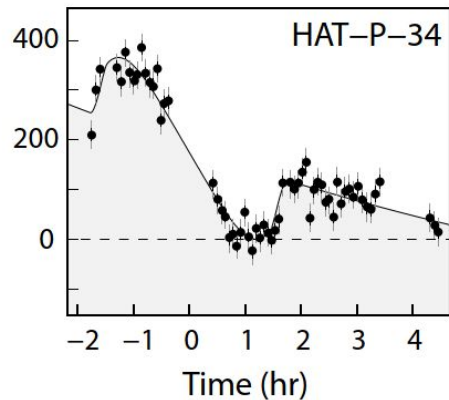
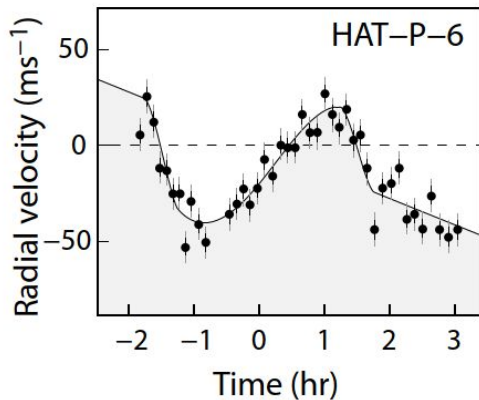
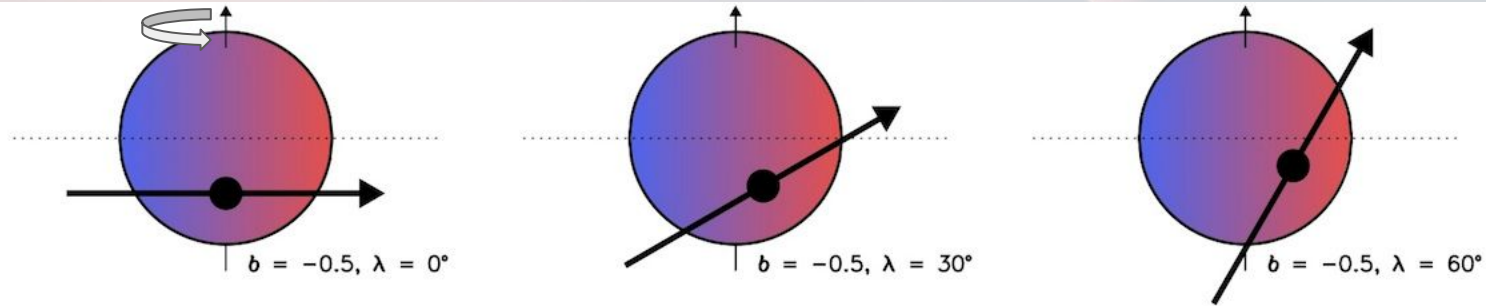


Tvar tranzitu - další informace

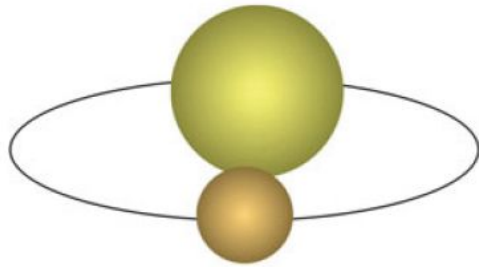


Tvar tranzitu - další informace

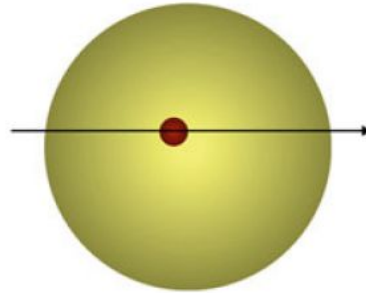
Rychlost rotace hvězdy, vzájemný sklon dráhy planety a rotační osy hvězdy
Rossiter-McLaughlinův efekt (z křivky radiálních rychlostí)



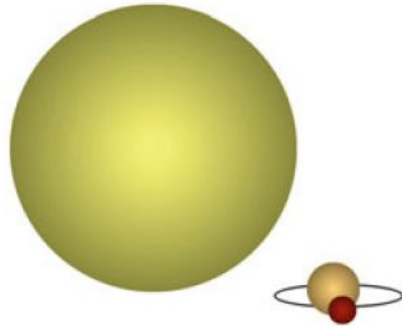
Falešné detekce



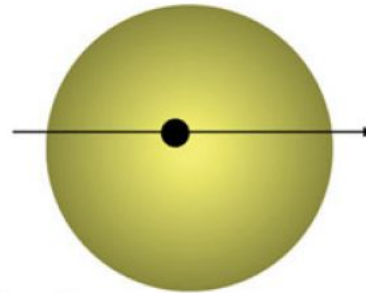
Grazing stellar binaries



Transiting red/brown dwarfs



Blended stellar binaries



Planets

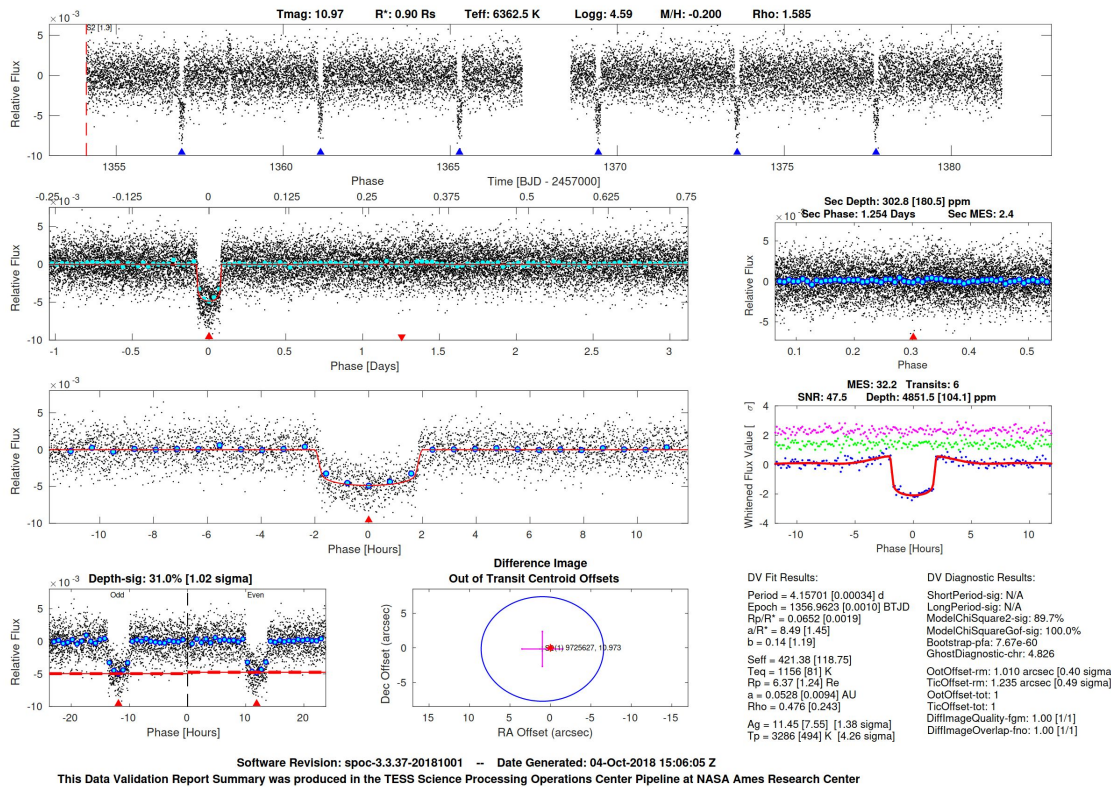
Exoplaneta musí být potvrzena s pomocí jiné nezávislé metody

- Velká velikost pixelu na detektoru - možnost blendu s objektem v pozadí
=> pozorování s větším rozlišením
- Velké planety jsou velikostně srovnatelné s hnědými trpaslíky a nejmenšími hvězdami
=> odhad hmotnosti přes RVs
- “Grazing” objekty produkující tranzitu podobné křivky
=> odhad hmotnosti přes RVs

Falešné detekce

Exoplaneta musí být potvrzena s pomocí jiné nezávislé metody

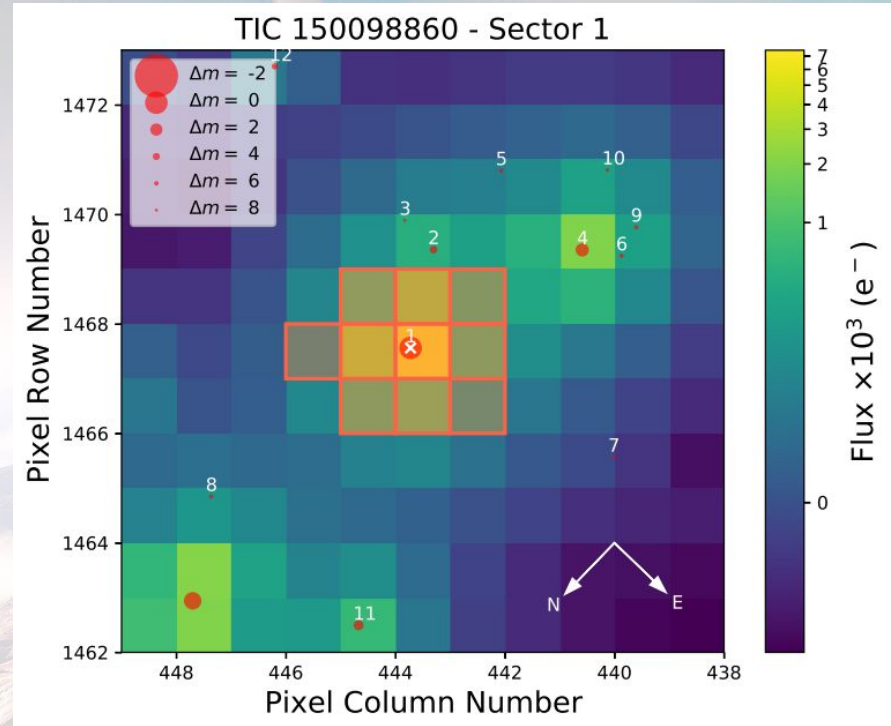
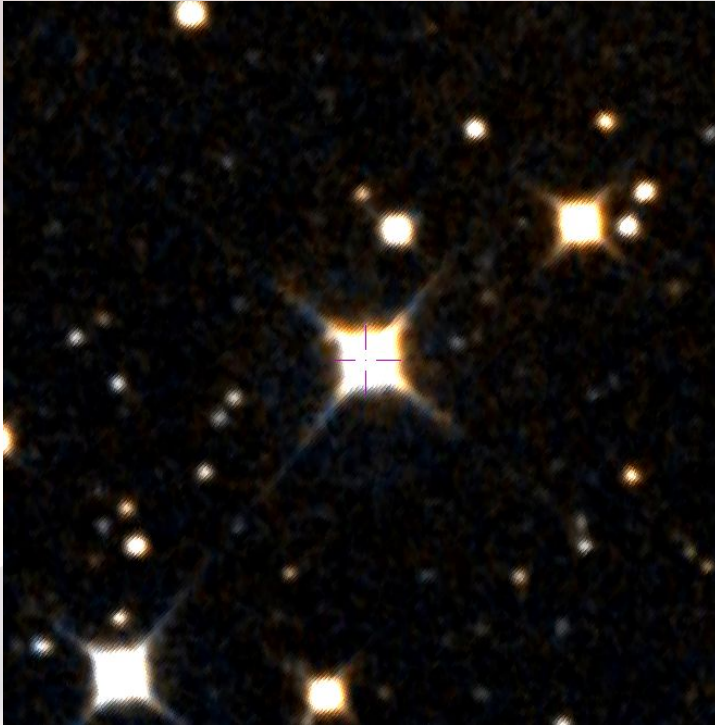
- Velká velikost pixelu na detektoru - možnost blendy s objektem v pozadí
=> pozorování s větším rozlišením
- Velké planety jsou velikostně srovnatelné s hnědými trpaslíky a nejmenšími hvězdami
=> odhad hmotnosti přes RVs
- “Grazing” objekty produkující tranzitu podobné křivky
=> odhad hmotnosti přes RVs



Čistě fotometrie může napovědět srovnáním sudých a lichých tranzitů, velmi malá hloubka sekundárního tranzitu, periodová analýza s použitím různých metod

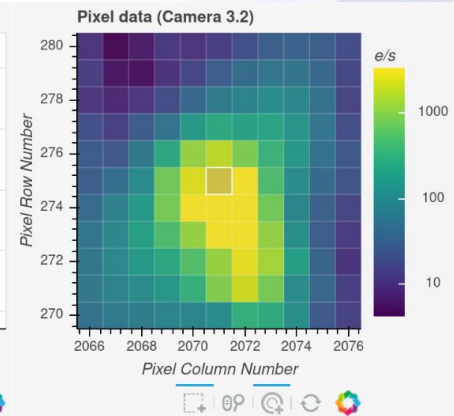
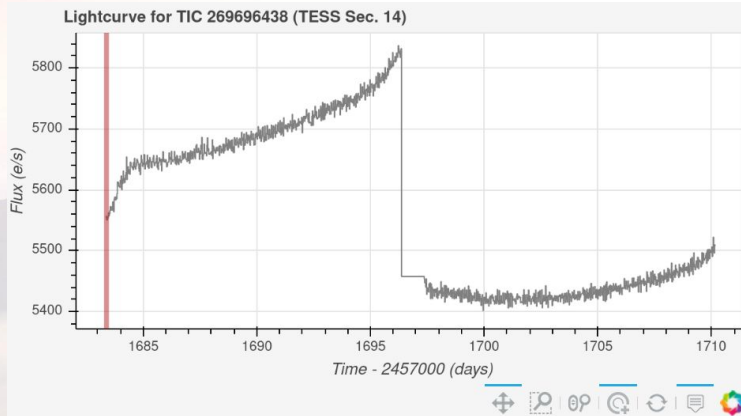
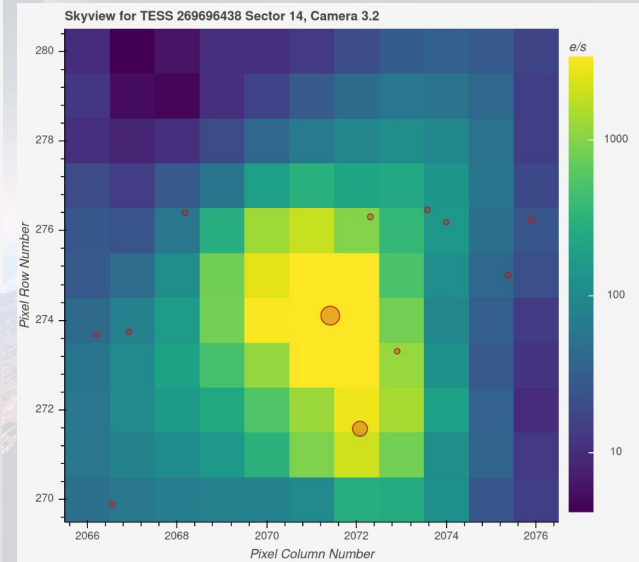
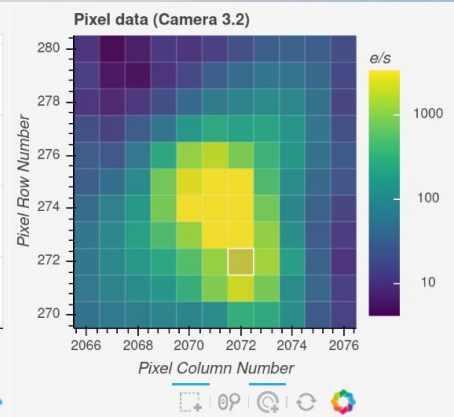
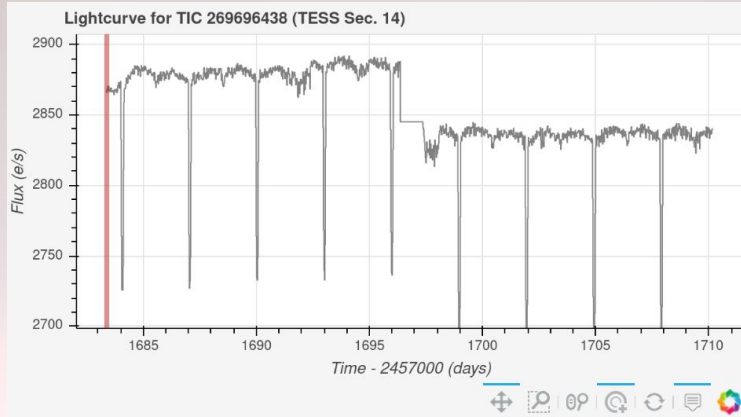
Falešné detekce

TESS - 21"/px



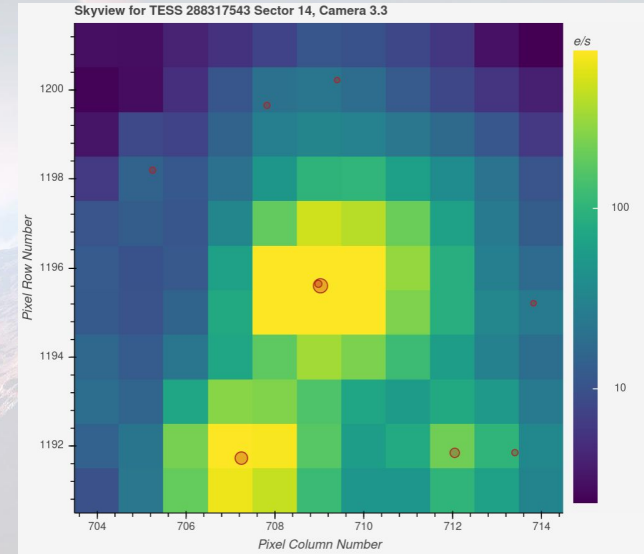
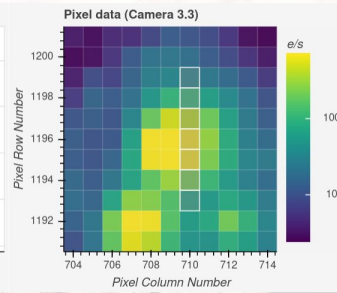
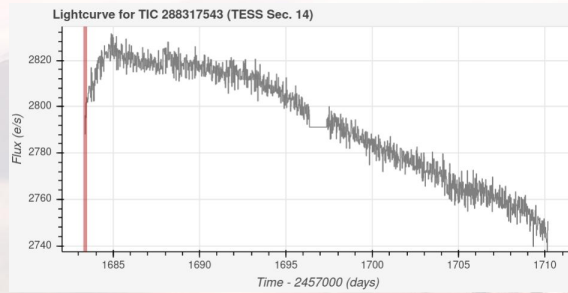
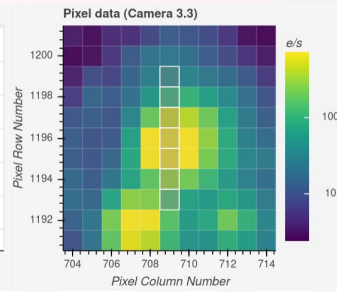
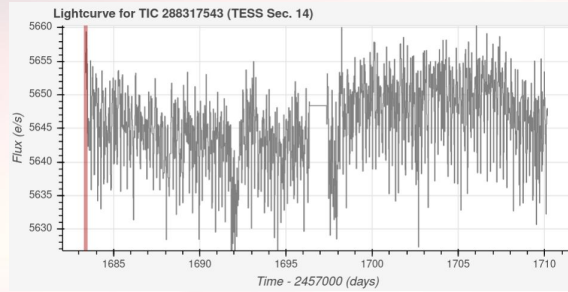
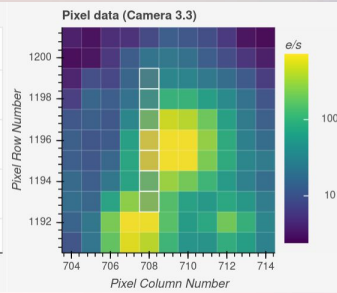
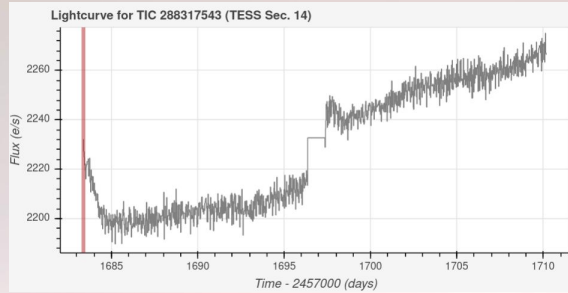
Hoyer et al. 2020, odesláno do MNRAS

Falešné detekce



BLEND :-)

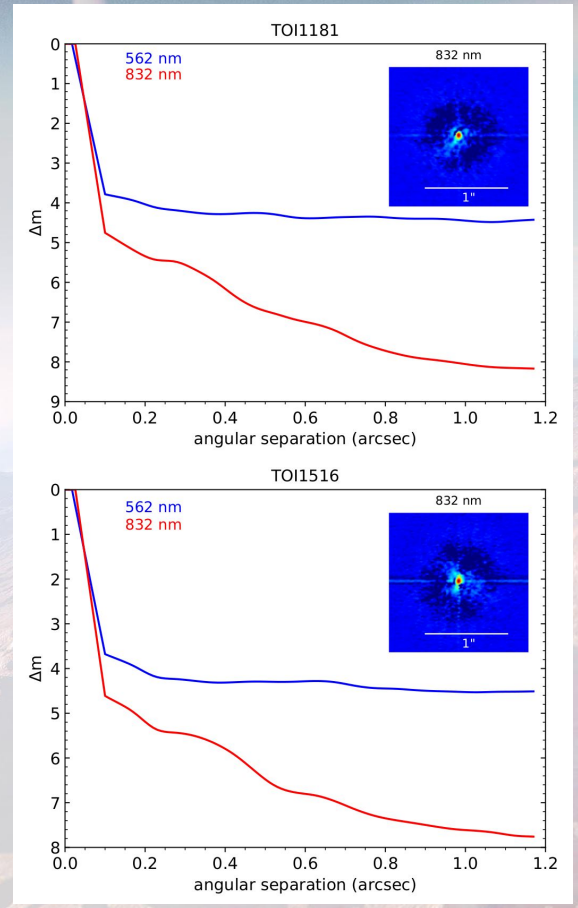
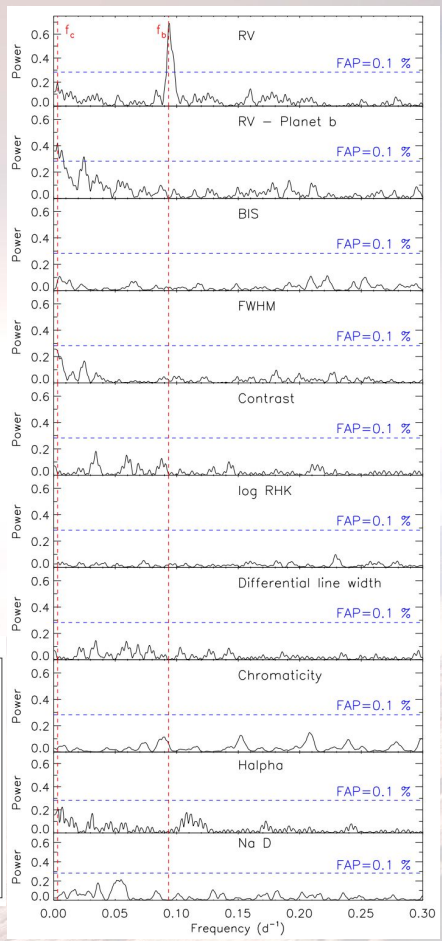
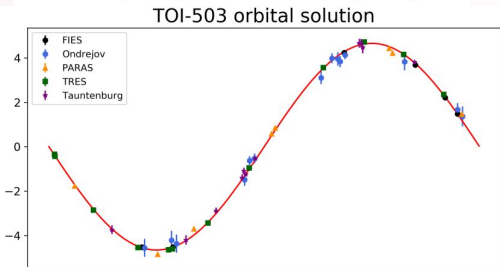
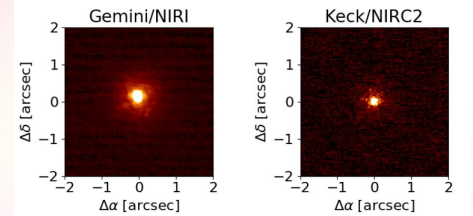
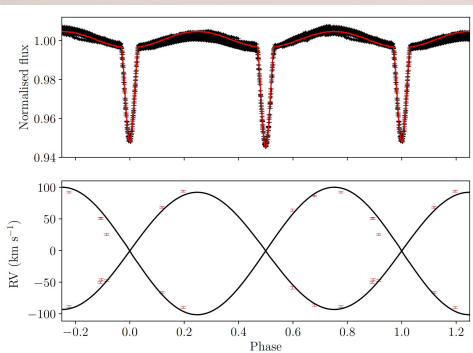
Falešné detekce



BLEND :-)

Falešné detekce

Kabáth et al. 2020, PASP, 132, 5002



Šubjak et al. 2020, AJ, 159, 151

Kabáth et al., under review