

F7514 Exoplanety

Pozorování exoplanetárních tranzitů

Marek Skarka

1.11.2023

Strategie

- Potřeba přesných měření $< \sim 0.05$ mag (pod 0.1 % velmi obtížné z povrchu Země)
- Měření v širokopásmových filtrech (větší účinnost a S/N)
- Monitoring velkého množství hvězd najednou výrazně zvýší šance na detekci
- Délka měření zvyšuje šanci na detekci
- Dlouhá nepřerušovaná měření nutná pro detekci planet na širokých drahách - střídání dne a noci velmi limitující

Co je žádoucí:

- Velké zorné pole
- Citlivý detektor
- Mimo atmosféru

Procento detekovatelných planet u
hvězd pozorovaných v poli:
cca 0.05 %

$$F = f_P \cdot f_T \cdot f_{m,sp}$$

Procento hvězd,
které mají
detekovatelné
planety (~ 2 %)

Procento tranzitujících
planet (5 %)

Procento hvězd s $m < 12$
mag, sp. Typ A5-M5 (50 %)

The photometric method of detecting other planetary systems

Show affiliations

Borucki & Summers 1984, Icarus, 58, 121

Borucki, W. J.; Summers, A. L.

The photometric method detects planets orbiting other stars by searching for the reduction in the light flux or the change in the color of the stellar flux that occurs when a planet transits a star. A transit by Jupiter or Saturn would reduce the stellar flux by approximately 1% while a transit by Uranus or Neptune would reduce the stellar flux by 0.1%. A highly characteristic color change with an amplitude approximately 0.1 of that for the flux reduction would also accompany the transit and could be used to verify that the source of the flux reduction was a planetary transit rather than some other phenomenon. Although the precision required to detect major planets is already available with state-of-the-art photometers, the detection of terrestrial-sized planets would require a precision substantially greater than the state-of-the-art and a spaceborne platform to avoid the effects of variations in sky transparency and scintillation. Because the probability is so small of observing a planetary transit during a single observation of a randomly chosen star, the search program must be designed to continuously monitor hundreds or thousands of stars. The most promising approach is to search for large planets with a photometric system that has a single-measurement precision of 0.1%. If it is assumed that large planets will have long-period orbits, and that each star has an average of one large planet, then approximately 10^4 stars must be monitored continuously. To monitor such a large groups of stars simultaneously while maintaining the required photometric precision, a detector array coupled by a fiber-optic bundle to the focal plane of a moderate aperture (≈ 1 m), wide field of view ($\approx 50^\circ$) telescope is required. Based on the stated assumptions, a detection rate of one planet per year of observation appears possible.

- **duotransits: P_{orb} is still unknown, but there now exists a discrete set of allowed period aliases P_n :**

$$P_n = T_{diff}/n,$$

where T_{diff} is the time between the two transit events,
and $n \in \{1, 2, 3 \dots n_{max}\}$ (n_{max} is determined by the non-detection of a third transit).

Strategie

- Potřeba přesných měření $< \sim 0.05$ mag (pod 0.1 % velmi obtížné z povrchu Země)
- Měření v širokopásmových filtrech (větší účinnost a S/N)
- Monitoring velkého množství hvězd najednou výrazně zvýší šance na detekci
- Délka měření zvyšuje šanci na detekci
- Dlouhá nepřerušovaná měření nutná pro detekci planet na širokých drahách - střídání dne a noci velmi limitující

Co je žádoucí:

- Velké zorné pole
- Citlivý detektor
- Mimo atmosféru

Procento detekovatelných planet u hvězd pozorovaných v poli: cca 0.05 %

$$F = f_P \cdot f_T \cdot f_{m,sp}$$

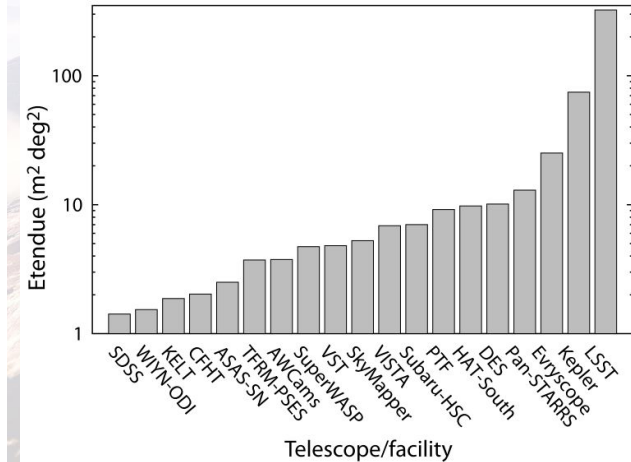
The photometric method of detecting other planetary systems

Show affiliations

Borucki & Summers 1984, Icarus, 58, 121

Borucki, W. J.; Summers, A. L.

The photometric method detects planets orbiting other stars by searching for the reduction in the light flux or the change in the color of the stellar flux that occurs when a planet transits a star. A transit by Jupiter or Saturn would reduce the stellar flux by approximately 1% while a transit by Uranus or Neptune would reduce the stellar flux by 0.1%. A highly characteristic color change with an amplitude approximately 0.1 of that for the flux reduction would also accompany the transit and could be used to verify that the source of the flux reduction was a planetary transit rather than some other phenomenon. Although the precision required to detect major planets is already available with state-of-the-art photometers, the detection of terrestrial-sized planets would require a precision substantially greater than the state-of-the-art and a spaceborne platform to avoid the effects of variations in sky transparency and scintillation. Because the probability is so small of observing a planetary transit during a single observation of a randomly chosen star, the search program must be designed to continuously monitor hundreds or thousands of stars. The most promising approach is to search for large planets with a photometric system that has a single-measurement precision of 0.1%. If it is assumed that large planets will have long-period orbits, and that each star has an average of one large planet, then approximately 10^4 stars must be monitored continuously. To monitor such a large groups of stars simultaneously while maintaining the required photometric precision, a detector array coupled by a fiber-optic bundle to the focal plane of a moderate aperture (≈ 1 m), wide field of view ($\approx 50^\circ$) telescope is required. Based on the stated assumptions, a detection rate of one planet per year of observation appears possible.



Efektivita/účinnost (etendue)

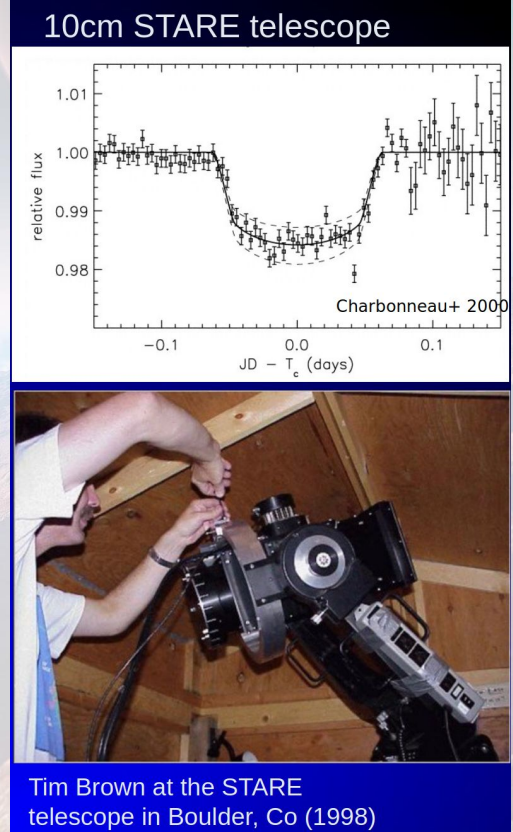
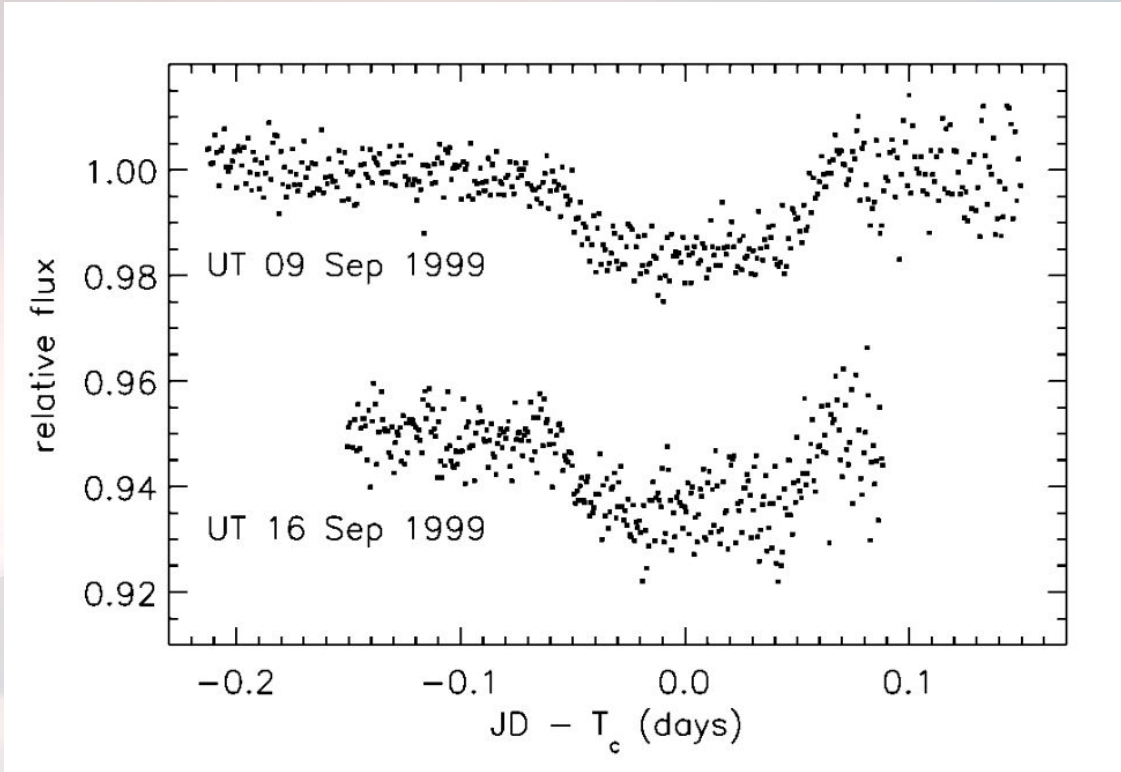
$$E = A \cdot \Omega$$

Plocha dalekohledu

Velikost zorného pole

První tranzit

Charbonneau et al. (2000), ApJ, 529, 45; HD 209458 10cm dalekohledem, pozorování podle předpovědi z RVs



Postup při potvrzování exokandidátů

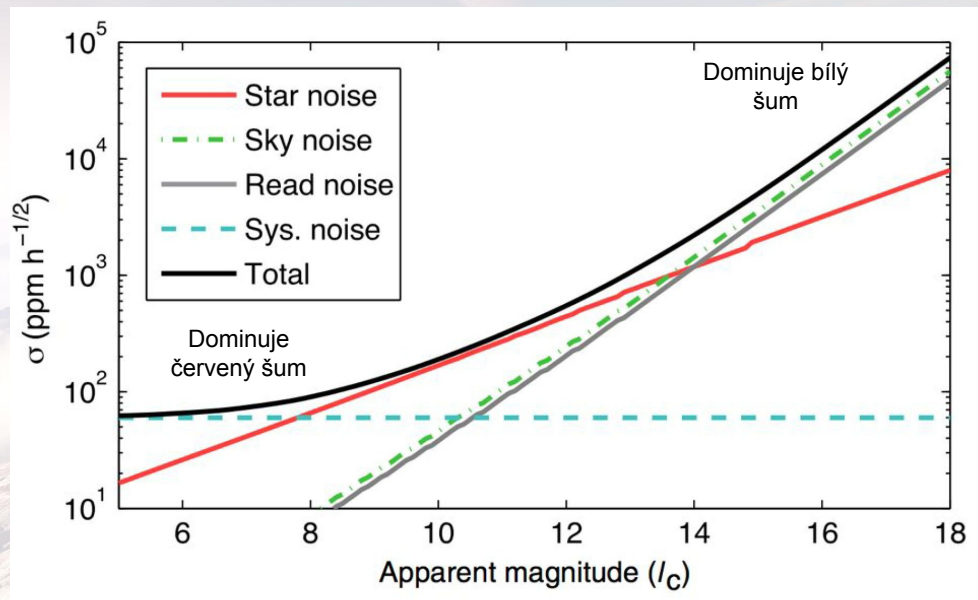
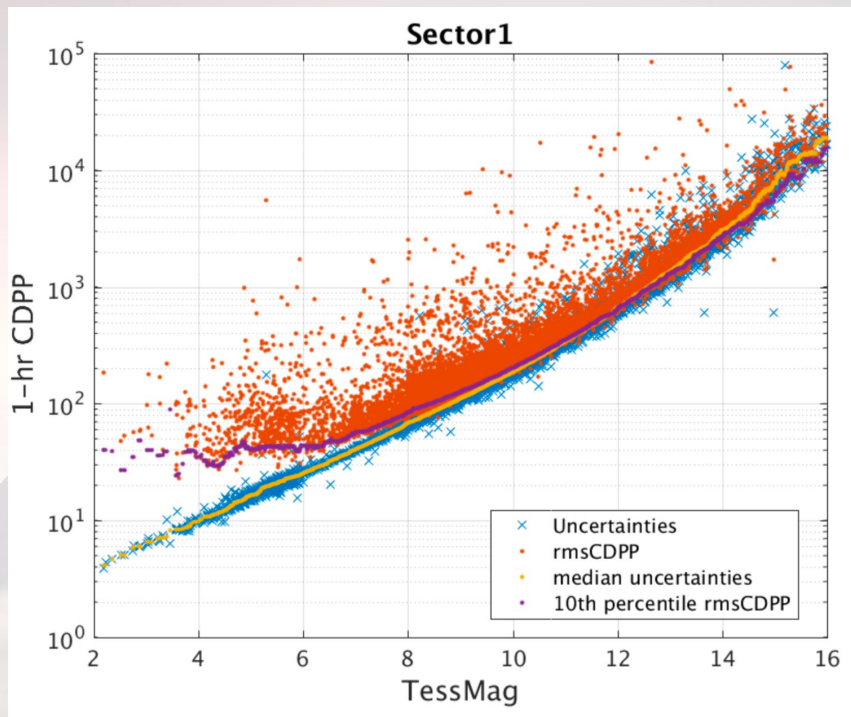
1. Zpracování dat
 - a. astrometrie
 - b. redukce snímků (bias, dark, flat-field, odstranění parazitního světla a gradientů jasu)
 - c. fotometrie (většinou Image subtraction method a/nebo aperturní, profilová)
2. Detrending dat a identifikace kandidátů (box-car fitting algoritmus - sfázovat data, nafitovat obdélníkovou funkcí, zjistit rozptyl => periodogram)
3. Potvrdit tranzit větším dalekohledem (u pozemních přehlídek s malou aperturou)
4. Vyřadit falešné detekce
 - b. blending se zákrytovými dvojhvězdami (pozorování s vyšším úhlovým rozlišením)
 - c. obří hvězdy vs. trpaslíci (ze svítivosti a vlastních pohybů)
 - d. eliptické proměnné (ze změn mimo tranzity)
5. Potvrdit exoplanetární povahu metodou radiálních rychlostí
 - c. Dvojčárové dvojhvězdy a rychlé rotátory - stačí jedno měření
 - d. Jednočárové dvojhvězdy - dvě měření
 - e. Planety - více měření

Pozorování tranzitů

Tranzity mají typicky hloubku < 0.01 mag \Rightarrow potřeba přesných pozorování

Základní zdroj šumu je fotonový šum (bílý šum): $\sigma \sim \sqrt{N}$ - čím více fotonů, tím menší relativní chyba měření

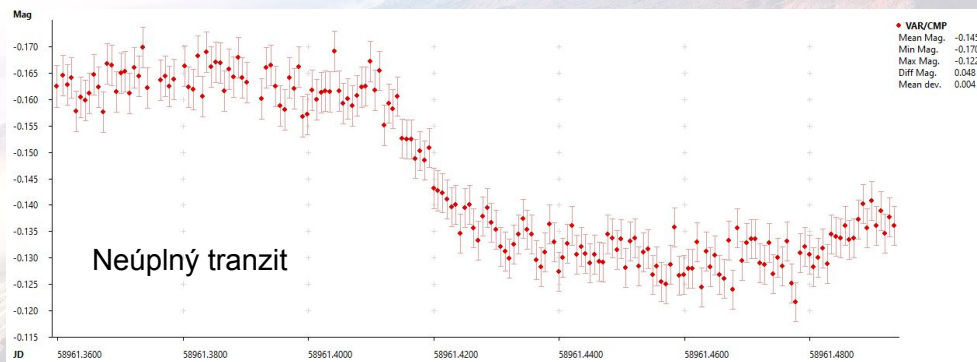
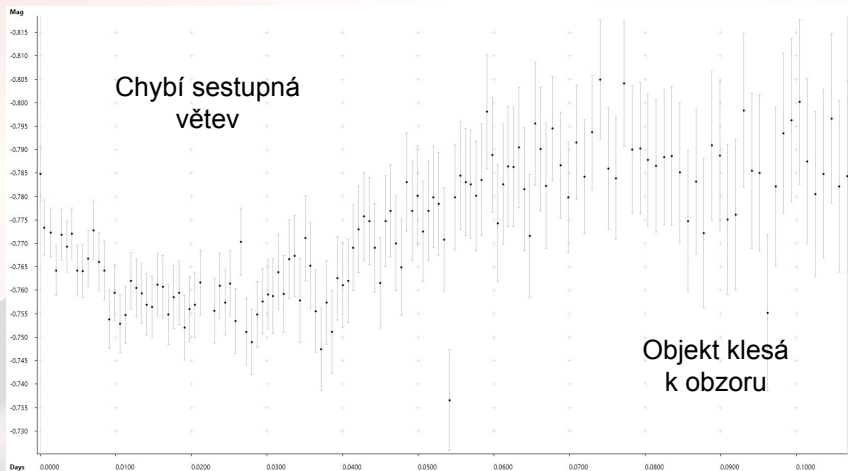
Dalšími zdroji šumu jsou jevy spojené s přístrojem a pozorovacími podmínkami - tzv. červený šum



Fotometrie tranzitů

Obecná doporučení k CCD měření tranzitů:

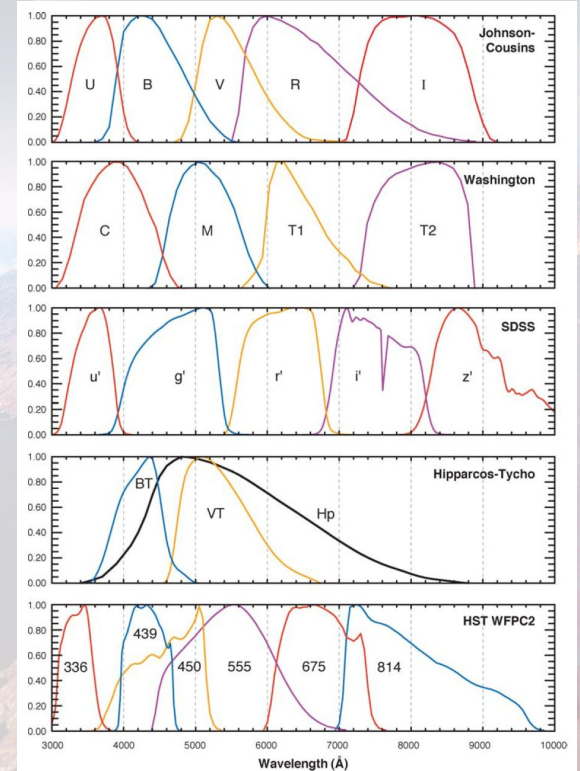
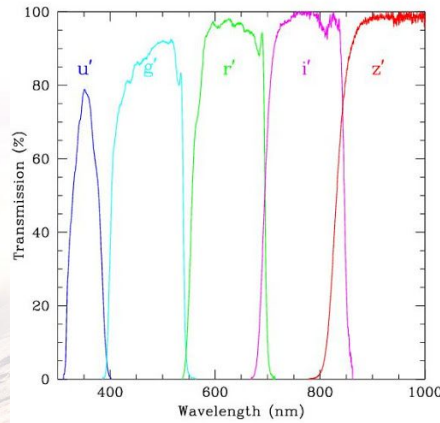
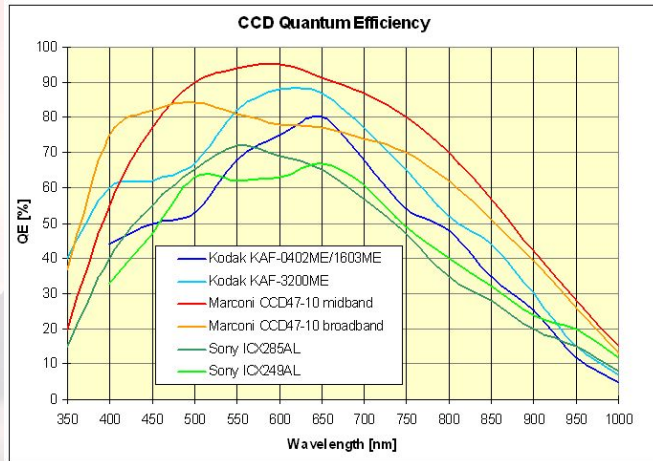
1. Měřit efektivně vzhledem k přístroji a observatoři
 - a. Vhodnost cíle (jasnost, poloha na obloze, délka pozorovatelnosti, okolí hvězdy, pokles, délka tranzitu)



Fotometrie tranzitů

Obecná doporučení k CCD měření tranzitů:

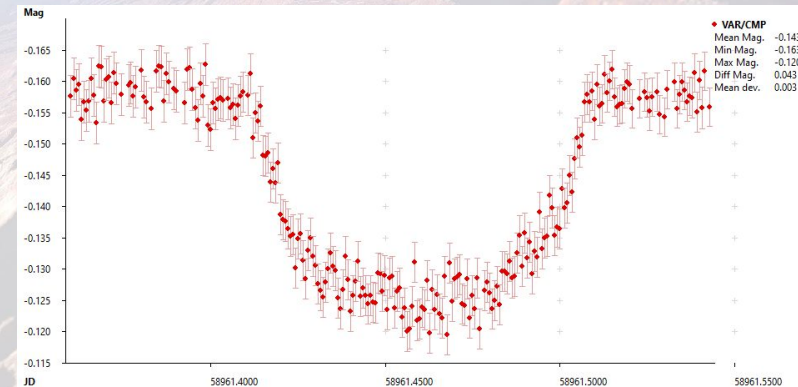
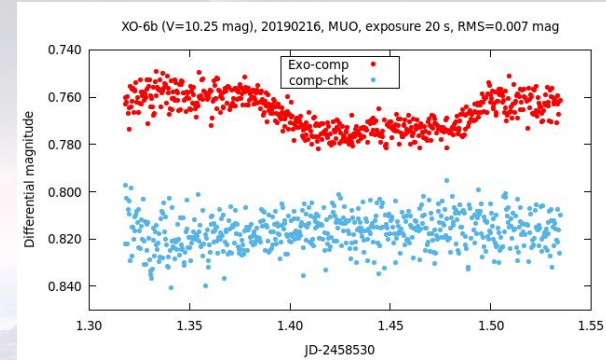
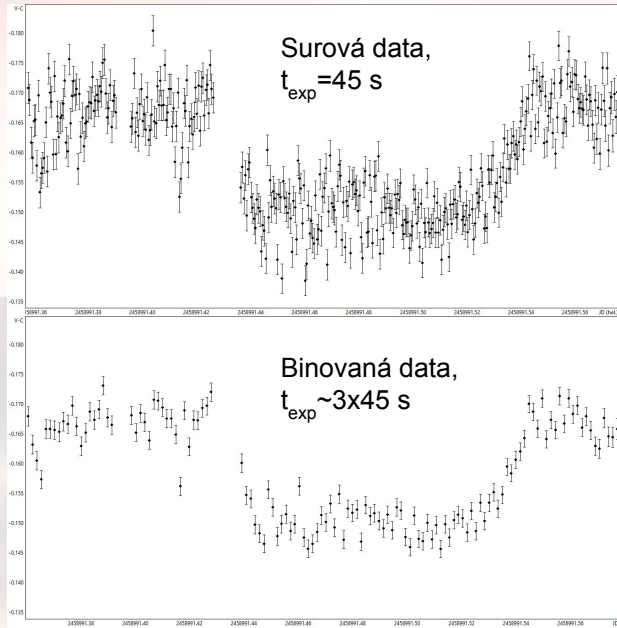
1. Měřit efektivně vzhledem k přístroji a observatoři
 - a. Vhodnost cíle (jasnost, poloha na obloze, délka pozorovatelnosti, okolí hvězdy, pokles, délka tranzitu)
 - b. Vhodný filtr



Fotometrie tranzitů

Obecná doporučení k CCD měření tranzitů:

1. Měřit efektivně vzhledem k přístroji a observatoři
 - a. Vhodnost cíle (jasnost, poloha na obloze, délka pozorovatelnosti, okolí hvězdy, pokles, délka tranzitu)
 - b. Vhodný filtr
 - c. Používat autoguiding
 - d. Expozice (dostatek fotonů vs. kadence dat)



Fotometrie tranzitů

Obecná doporučení k CCD měření tranzitů:

1. Měřit efektivně vzhledem k přístroji a observatoři
2. Správně redukovat data
 - a. Bias, Dark frame, Flat-field frame, detrending



bias



flat

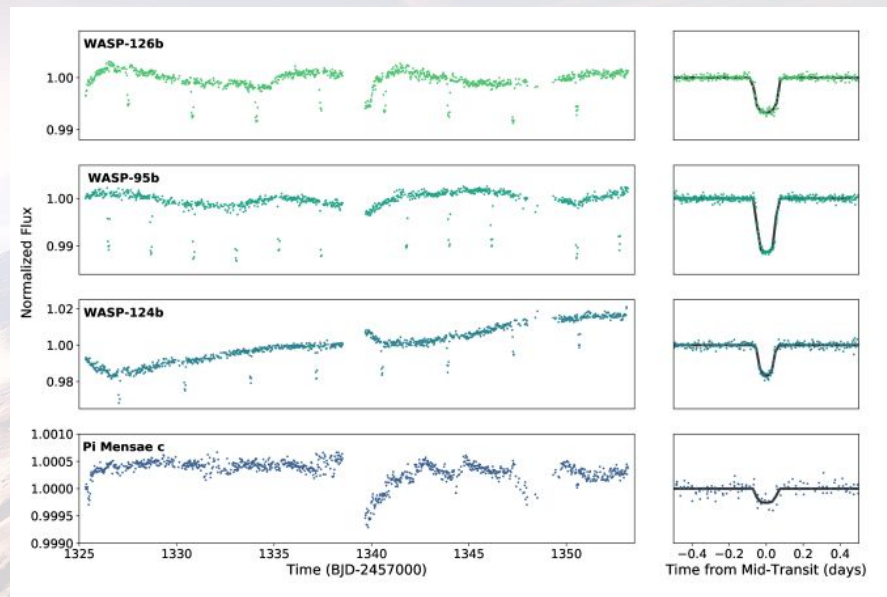
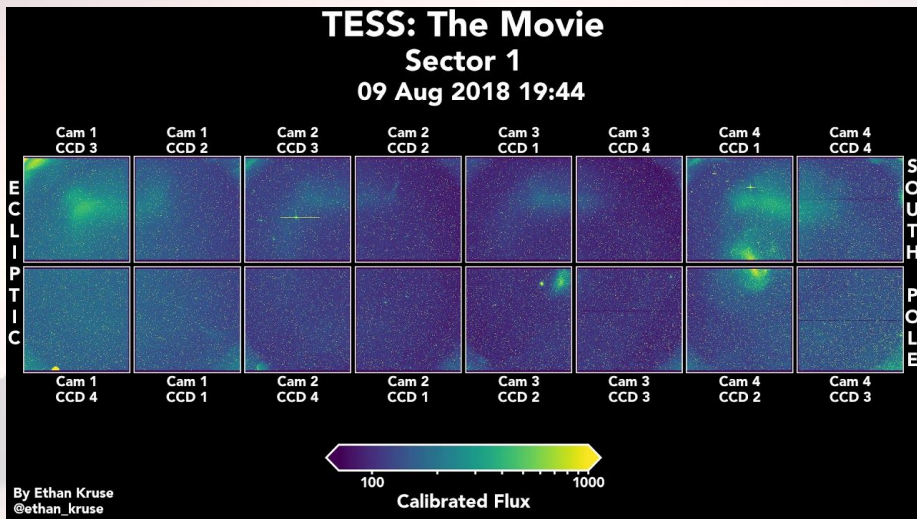


snímek

Fotometrie tranzitů

Obecná doporučení k CCD měření tranzitů:

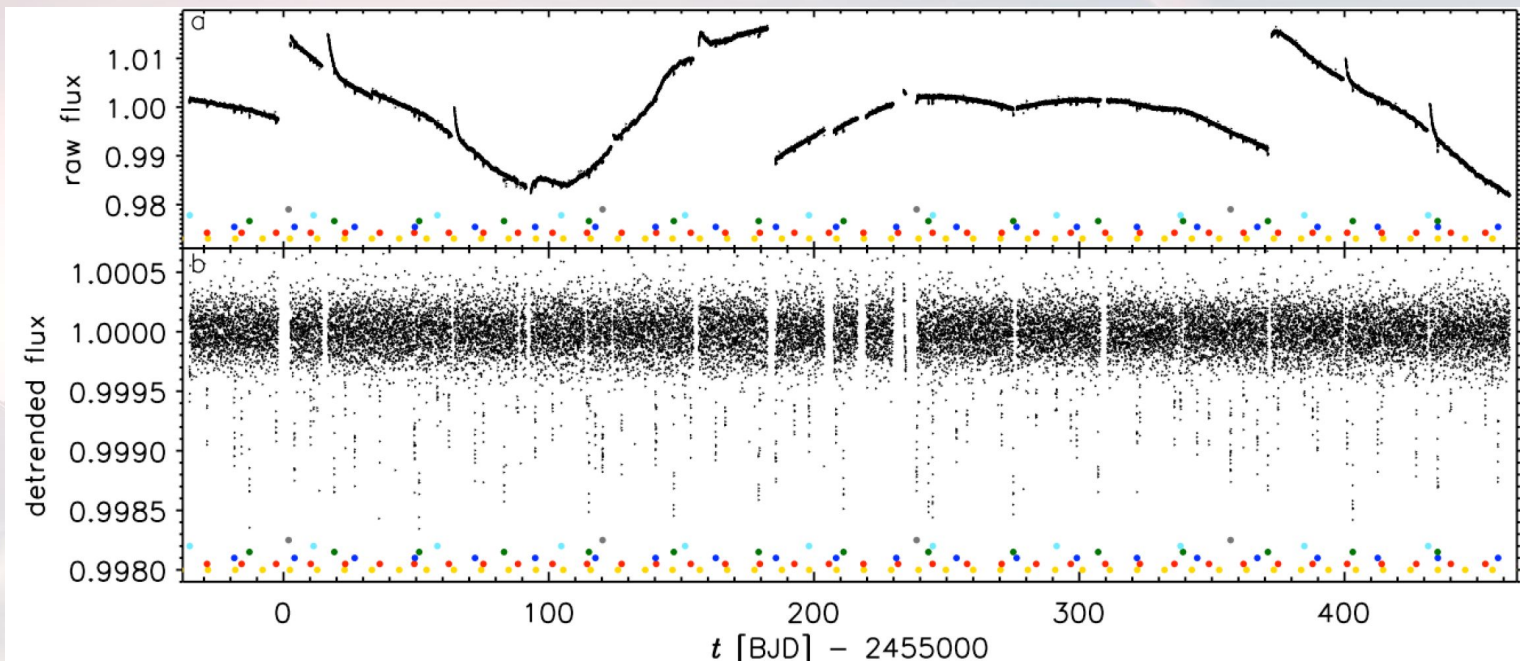
1. Měřit efektivně vzhledem k přístroji a observatoři
2. Správně redukovat data
 - a. Bias, Dark frame, Flat-field frame, detrending



Fotometrie tranzitů

Obecná doporučení k CCD měření tranzitů:

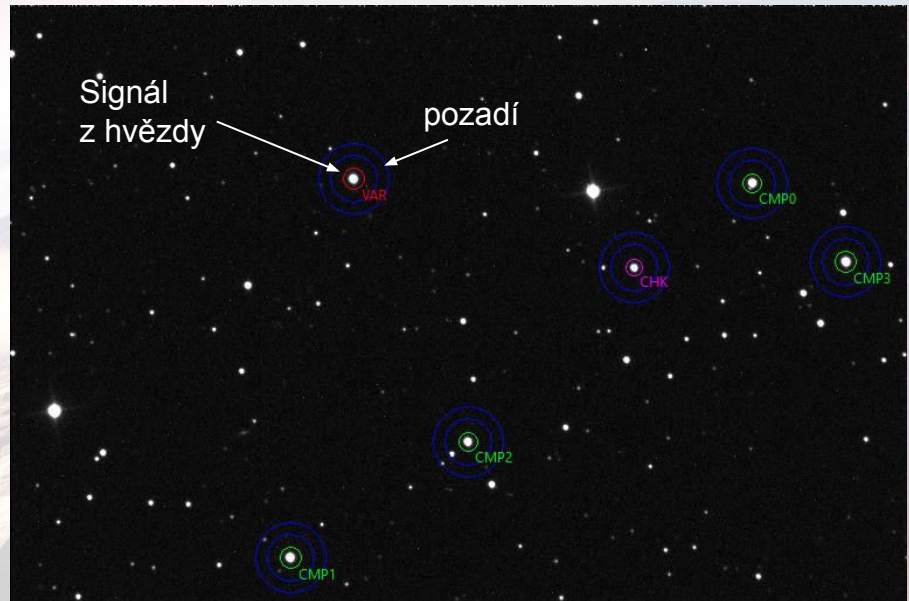
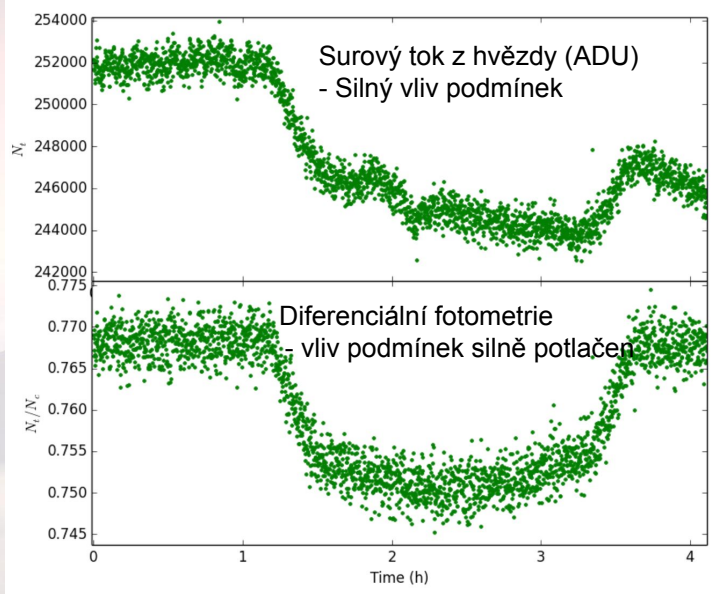
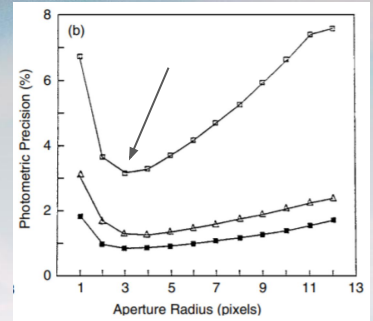
1. Měřit efektivně vzhledem k přístroji a observatoři
2. Správně redukovat data
 - a. Bias, Dark frame, Flat-field frame, detrending



Fotometrie tranzitů

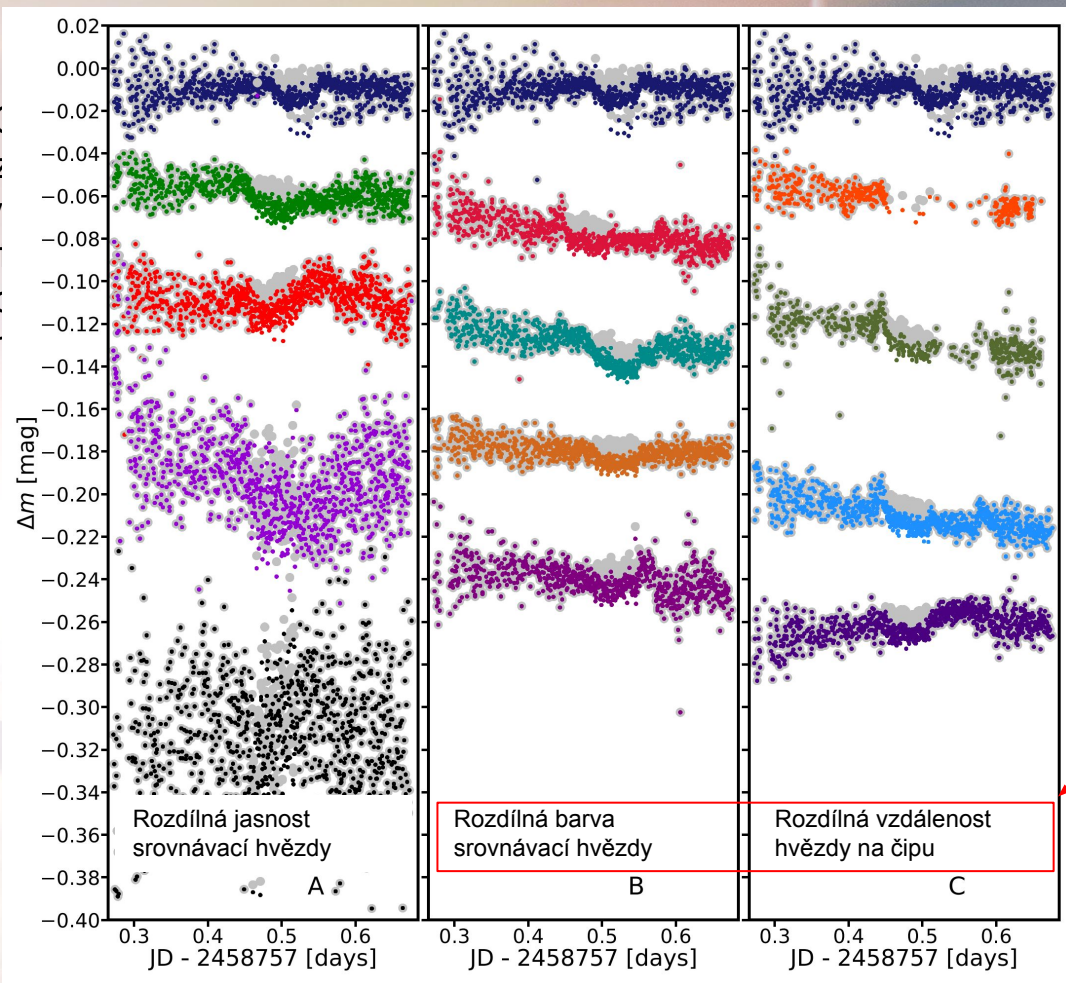
Obecná doporučení k CCD měření tranzitů:

1. Měřit efektivně vzhledem k přístroji a observatoři
2. Správně redukovat data
 - a. Bias, Dark frame, Flat-field frame, detrending
 - b. Správná clonka + diferenciální fotometrie
 - c. Volba srovnávací hvězdy (kombinace hvězd blízko měřené)

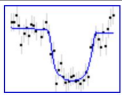
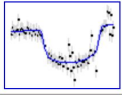
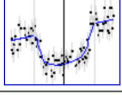
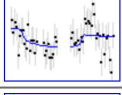
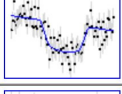
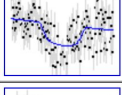
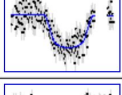
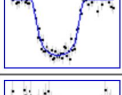
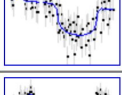



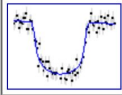
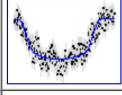
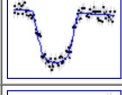
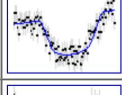
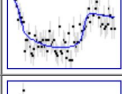
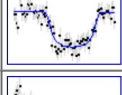
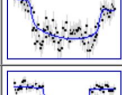

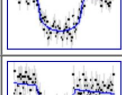

Obecná doporučení k (

1. Měřit efektivně vz
2. Správně redukov
 - a. Bias, Dark
 - b. Správná cl
 - c. Volba srovn



Vznikají trendy

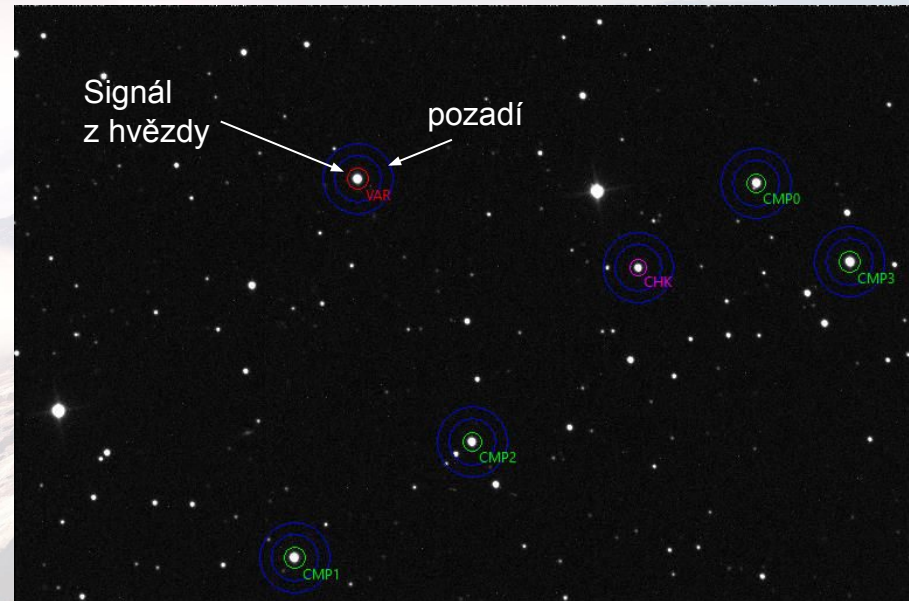
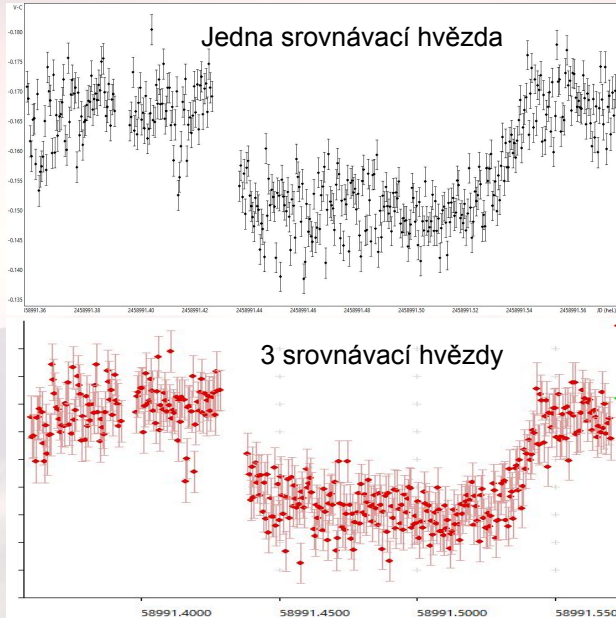
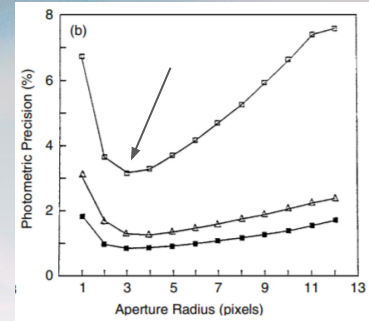
10950	HAT-P-68 b	R	2022-10-30 00:55:11 Ukaž v ETD		Antonino Brosio ABOobservatory 2022-10-30
10949	WASP-76 b	R	2022-10-28 22:50:42 Ukaž v ETD		Antonino Brosio ABOobservatory 2022-10-30
10948	HATS-46 b	Clear	2022-10-28 03:50:08 Ukaž v ETD		Anaël Wünsche El Sauce Observatory 2022-10-29
10947	KOI 1546 b	Clear	2022-10-28 20:51:03 Ukaž v ETD		Giovanni Calapai Home Astronomical Observatory 2022-10-29
10946	K2-30 b	R	2022-10-26 22:56:46 Ukaž v ETD		Antonino Brosio ABOobservatory 2022-10-27
10945	WASP-52 b	Clear	2022-10-26 22:00:10 Ukaž v ETD		Gerhard Bösch Balkonsternwarte Nagold 2022-10-27
10944	WASP-52 b	Clear	2022-08-24 22:00:14 Ukaž v ETD		Volker Wickert VdS Sternwarte Kirchheim 2022-10-27
10943	WASP-10 b	R	2022-10-25 20:55:45 Ukaž v ETD		Antonino Brosio ABOobservatory 2022-10-26
10942	WASP-77 b	Clear	2022-10-25 22:44:51 Ukaž v ETD		Bernhard Wenzel Balcony Observatory Vienna 2022-10-26
10941	WASP-95 b	R	2022-10-25 02:51:38 Ukaž v ETD		Anaël Wünsche El Sauce Observatory 2022-10-26

10962	WASP-89 b	Clear	2022-10-23 02:00:17 Ukaž v ETD		Yves Jongen Deep Sky Chile 2022-11-01
10961	WASP-8 b	R	2022-11-01 02:23:24 Ukaž v ETD		Yves Jongen Deep Sky Chile 2022-11-01
10960	WASP-98 b	Clear	2022-10-21 05:49:18 Ukaž v ETD		Yves Jongen Deep Sky Chile 2022-11-01
10959	K2-30 b	R	2022-10-31 01:21:17 Ukaž v ETD		Veli-Pekka Hentunen Taurus Hill Observatory (A95), Varkaus, Finland 2022-10-31
10958	HAT-P-52 b	R	2022-10-30 20:39:40 Ukaž v ETD		Veli-Pekka Hentunen Taurus Hill Observatory (A95), Varkaus, Finland 2022-10-31
10957	TOI-3714 b	Clear	2022-10-30 22:52:14 Ukaž v ETD		Manfred Raetz Privatsternwarte Herges-Hallenberg 2022-10-31
10956	HAT-P-58 b	Clear	2022-10-01 02:04:35 Ukaž v ETD		Yves Jongen Rasteau Observatory 2022-10-31
10955	WASP-4 b	Clear	2022-09-30 03:50:16 Ukaž v ETD		Yves Jongen Deep Sky Chile 2022-10-31
10954	HATS-30 b	Clear	2022-09-29 05:23:09 Ukaž v ETD		Yves Jongen Deep Sky Chile 2022-10-31
10953	KPS-1 b	Clear	2022-10-31 01:49:07 Ukaž v ETD		Gianluca Rossi Private telescope 2022-10-31

Fotometrie tranzitů

Obecná doporučení k CCD měření tranzitů:

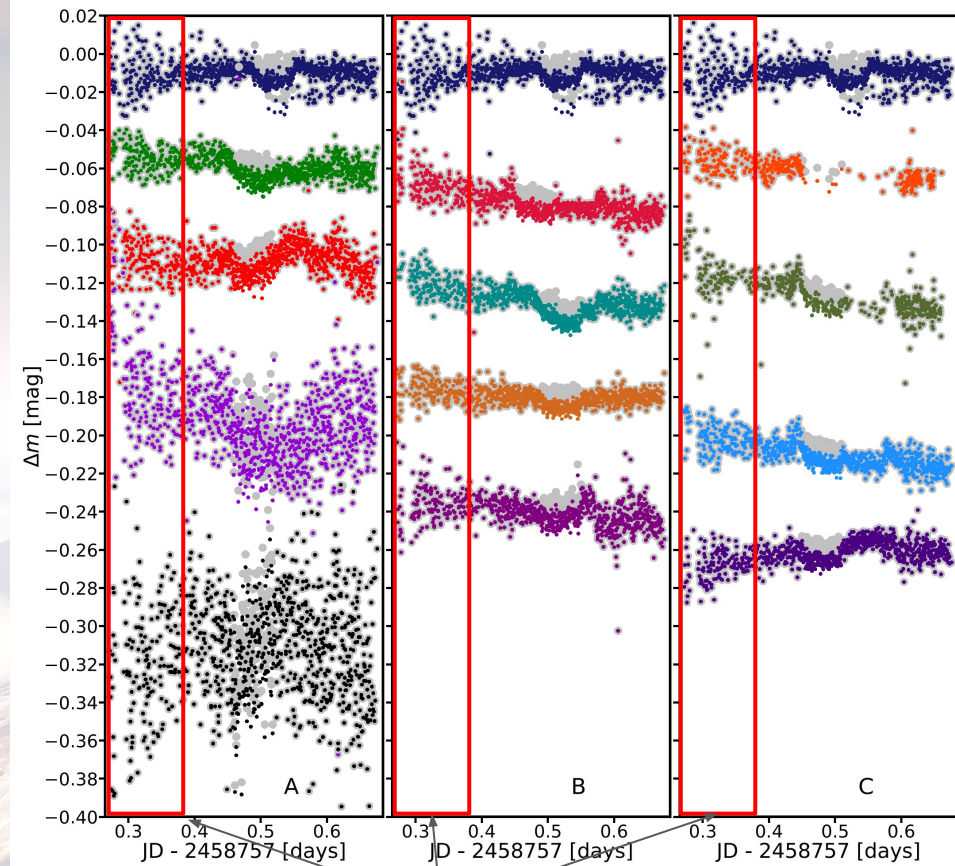
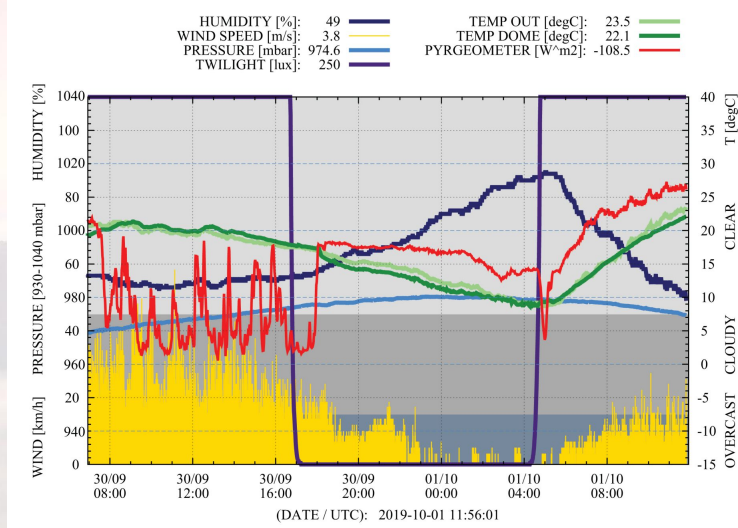
1. Měřit efektivně vzhledem k přístroji a observatoři
2. Správně redukovat data
 - a. Bias, Dark frame, Flat-field frame, detrending
 - b. Správná clonka + diferenciální fotometrie
 - c. Volba srovnávací hvězdy (kombinace hvězd blízko měřené)



Fotometrie tranzitů

Obecná doporučení k CCD měření tranzitů:

1. Měřit efektivně vzhledem k přístroji a observatoři
2. Správně redukovat data
3. Měřit v dobrých podmínkách
 - a. Čistá obloha
 - b. Nízká vlhkost
 - c. Vítr
 - d. Vysoko na obloze
 - e. Daleko od Měsíce a zdrojů světla

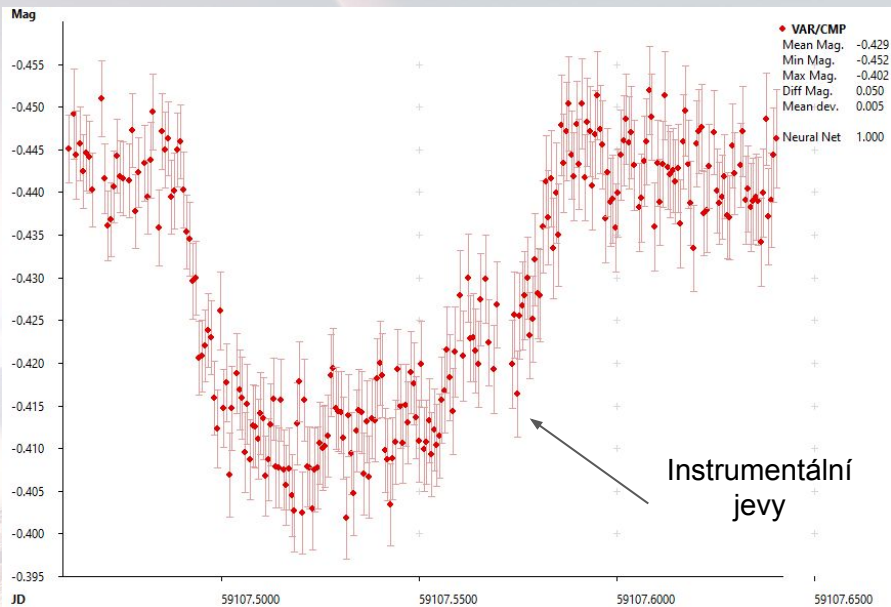
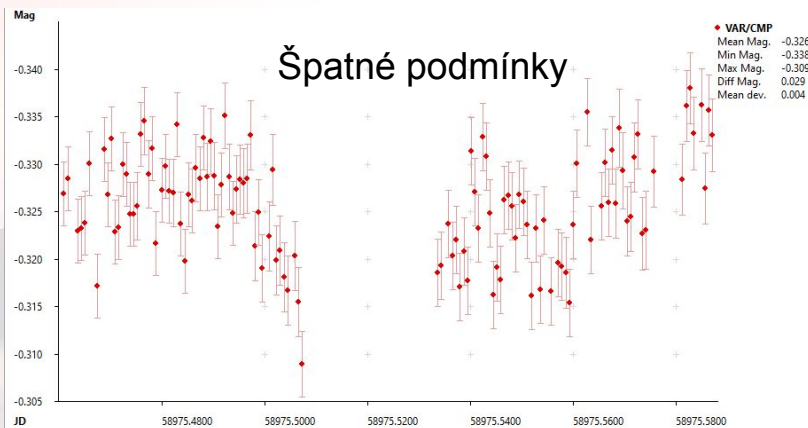


Oblačnost + vítr

Fotometrie tranzitů

Obecná doporučení k CCD měření tranzitů:

1. Měřit efektivně vzhledem k přístroji a observatoři
2. Správně redukovat data
3. Měřit v dobrých podmínkách
 - a. Čistá obloha
 - b. Nízká vlhkost
 - c. Vítr
 - d. Vysoko na obloze
 - e. Daleko od Měsíce a zdrojů světla



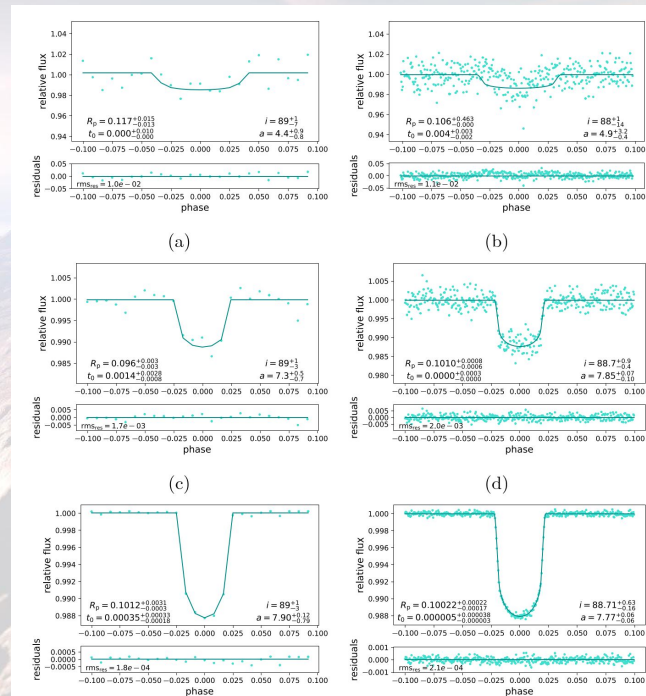
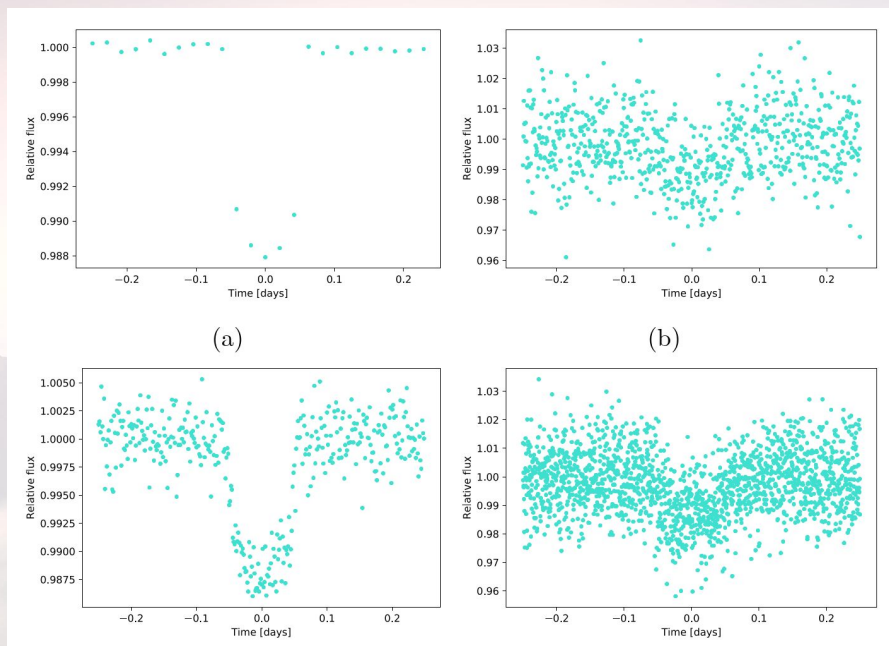
Měření vs. přesnost určení parametrů

Bakalářská práce Michaela Vítková, 2020

“Vliv kadence a rozptylu dat na přesnost určení parametrů exoplanetárních tranzitů”

Simulace:

- Exoplaneta: $P=2.5$ d, $R_p=1 R_J$ ($0.1004 R_S$), $a=0.036$ au, $i=88.7^\circ$, $e=0$, $\omega=90^\circ$
- Kadence: 25 s (60 křivek), 1 min (120 křivek), 2 min (200 křivek), 30 min (400 křivek)
- Šum: 200 ppm, 2000 ppm, 10000 ppm



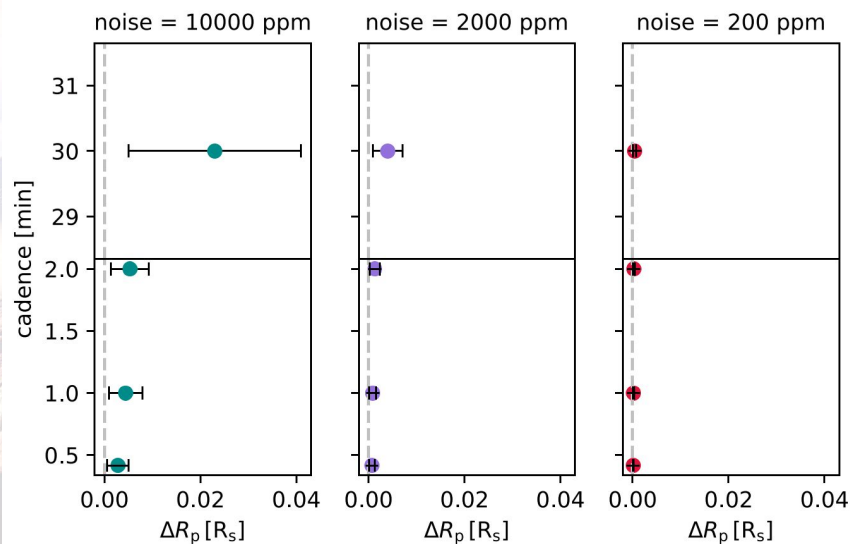
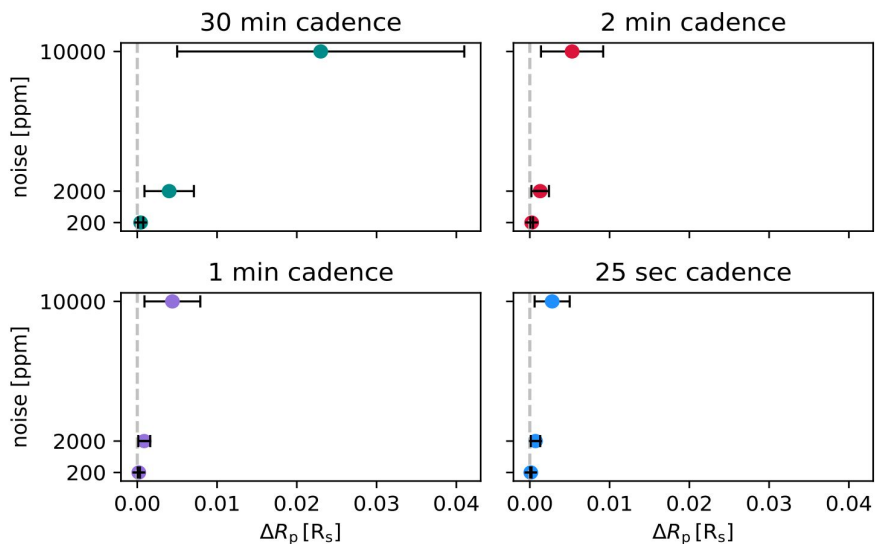
Měření vs. přesnost určení parametrů

- Exoplaneta: $P=2.5$ d, $R_p=1 R_J$ ($0.1004 R_S$), $a=0.036$ au, $i=88.7^\circ$, $e=0$, $\omega=90^\circ$

Table 4.2: Relative standart deviations for planet radius R_p

Radius

noise [ppm]	cadence			
	30 minutes	2 minutes	1 minute	25 seconds
10000	19.5 %	6.4 %	5.1 %	2.9 %
2000	4.7 %	1.6 %	1.1 %	0.9 %
200	0.5 %	0.3 %	0.2 %	0.1 %



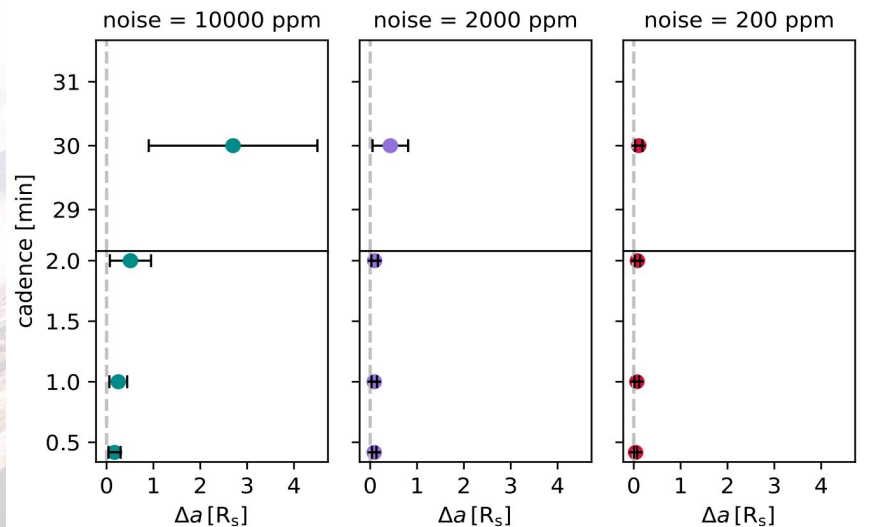
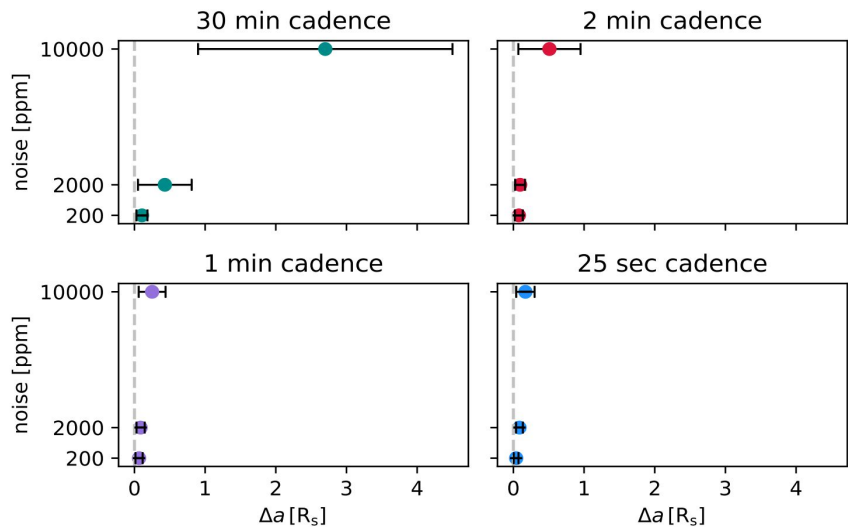
Měření vs. přesnost určení parametrů

- Exoplaneta: $P=2.5$ d, $R_p=1 R_J$ ($0.1004 R_S$), $a=0.036$ au, $i=88.7^\circ$, $e=0$, $\omega=90^\circ$

Table 4.3: Relative standart deviations for inclination a

noise [ppm]	cadence			
	30 minutes	2 minutes	1 minute	25 seconds
10000	44.9 %	8.7 %	4 %	2.8 %
2000	7.4 %	1.2 %	0.9 %	0.7 %
200	1.4 %	1.2 %	1 %	0.6 %

Semi-major axis



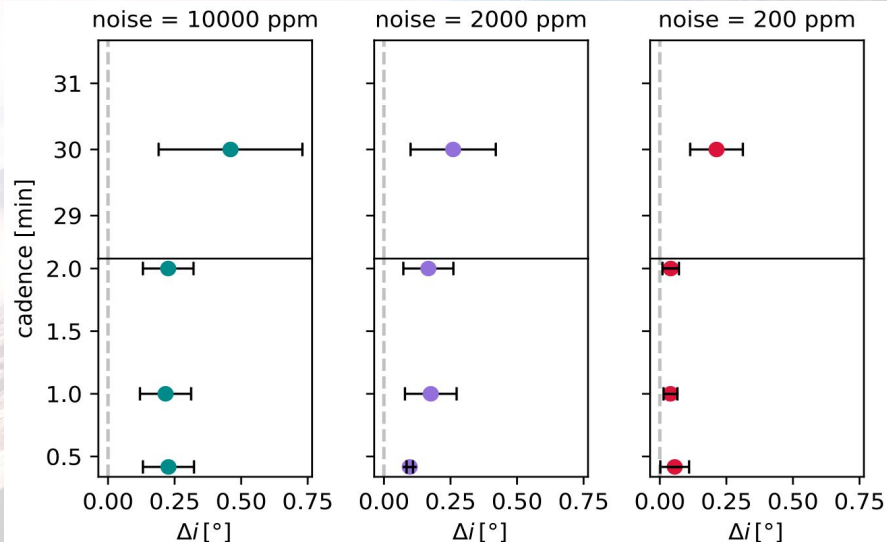
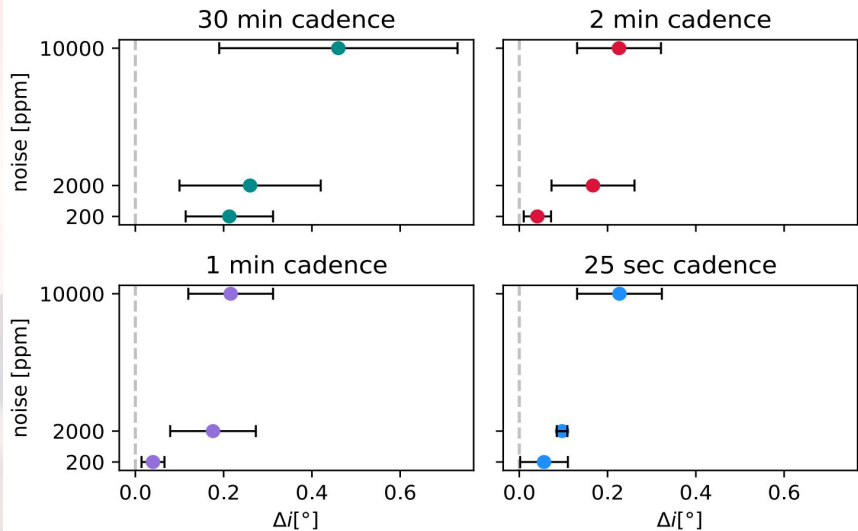
Měření vs. přesnost určení parametrů

- Exoplaneta: $P=2.5$ d, $R_p=1 R_J$ ($0.1004 R_S$), $a=0.036$ au, $i=88.7^\circ$, $e=0$, $\omega=90^\circ$

Table 4.4: Relative standart deviations for inclination i

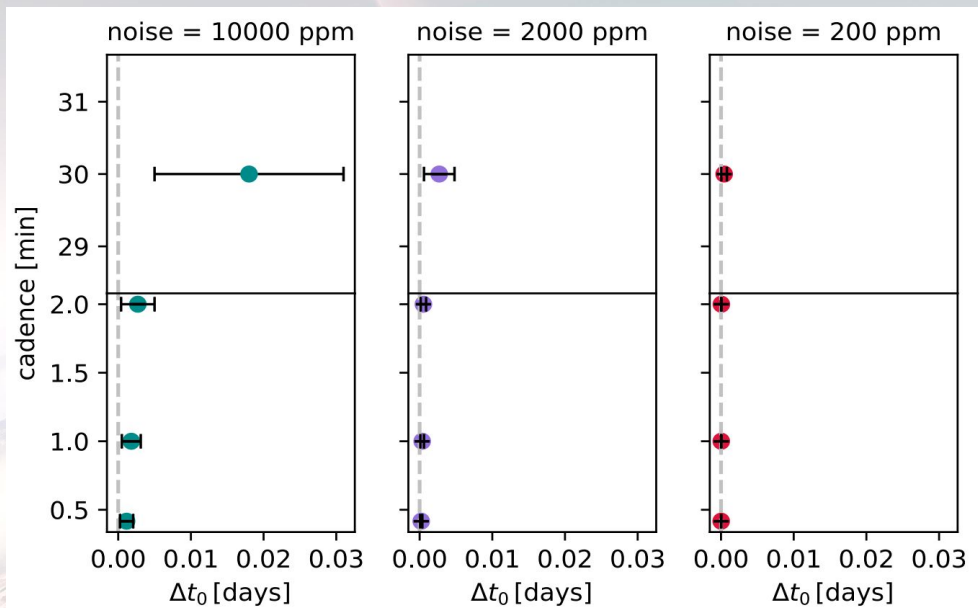
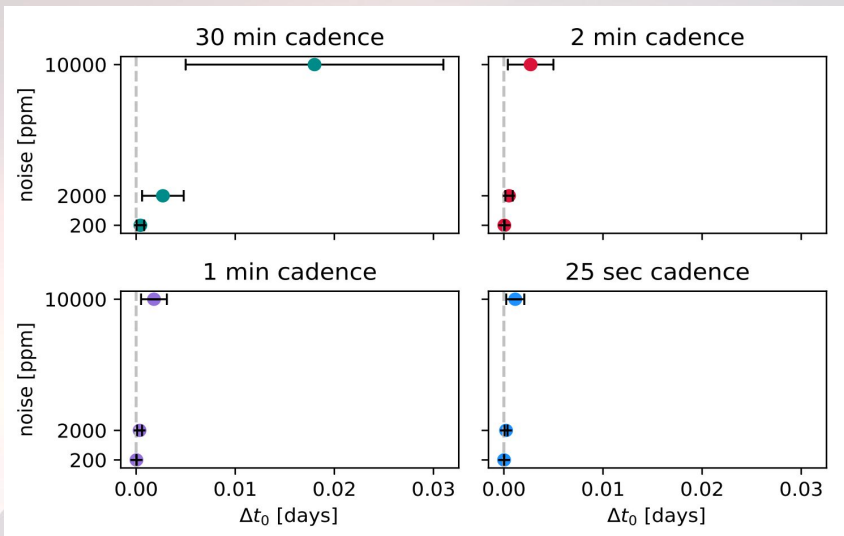
noise [ppm]	cadence			
	30 minutes	2 minutes	1 minute	25 seconds
10000	0.5 %	0.2 %	0.2 %	0.2 %
2000	0.3 %	0.1 %	0.1 %	0.07 %
200	0.2 %	0.04 %	0.04 %	0.08 %

Inclination



Měření vs. přesnost určení parametrů

- Exoplaneta: $P=2.5$ d, $R_p=1 R_J$ ($0.1004 R_S$), $a=0.036$ au, $i=88.7^\circ$, $e=0$, $\omega=90^\circ$

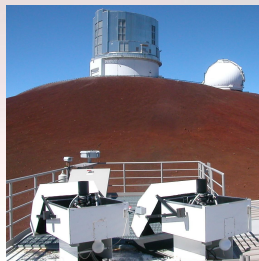


Při přesných měřeních není kadence až tak důležitá
Řídká zašumělá data jsou pouze orientační

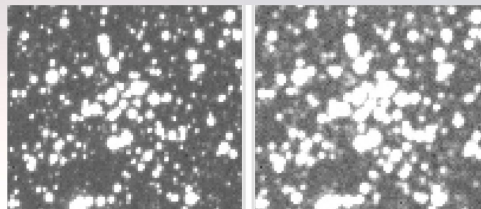
Pozemní přehlídkové projekty

HAT/HATNet (The Hungarian Automated Telescope project) Bakos et al. 2013, PASP, 125, 154; Bakos et al. 2018, arXiv:1801.00849

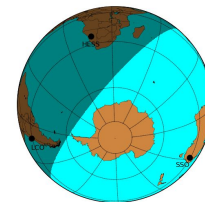
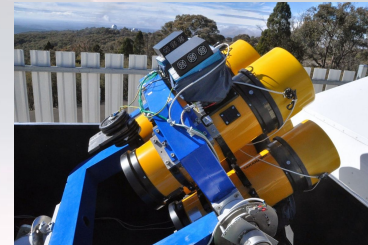
HAT-North - Arizona (5 dalekohledů) +
Havai (2 dalekohledy)



<https://hatnet.org/>

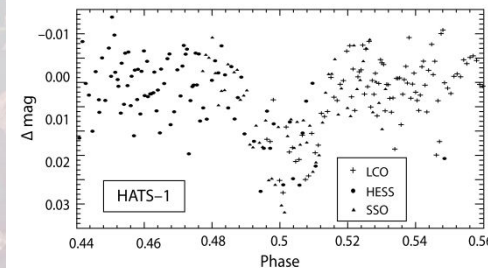
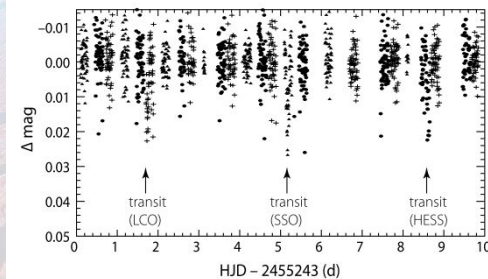


HAT-South - Chile, Austrálie, Namibie
(3x2x4 dalekohledy)



	HAT-North	HAT-South
Uvedení do provozu	2003	2009
Optika	0.11m, f/1.8	0.18m, f/2.8
Detektor	4k x 4k CCD	4k x 4k CCD
Zorné pole	10.6°x10.6°	8.2°x8.2°
Kadence	3.5 min	4 min
Přesnost 10 mag	5 mmag	6 mmag
Rozlišení	14"/px	3.7"/px
Objevených planet	70	73

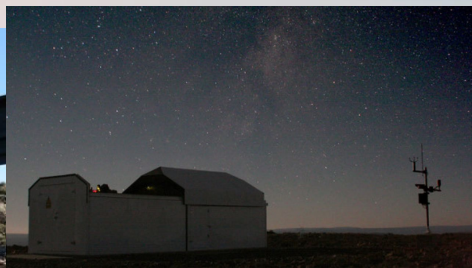
150 GB/den



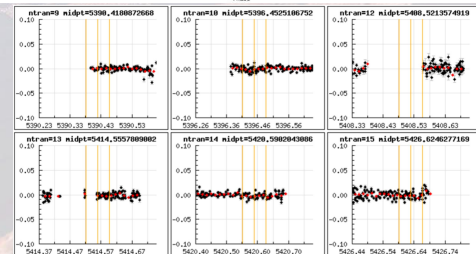
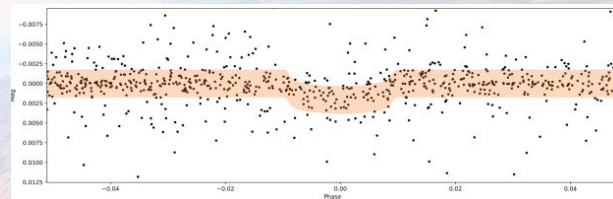
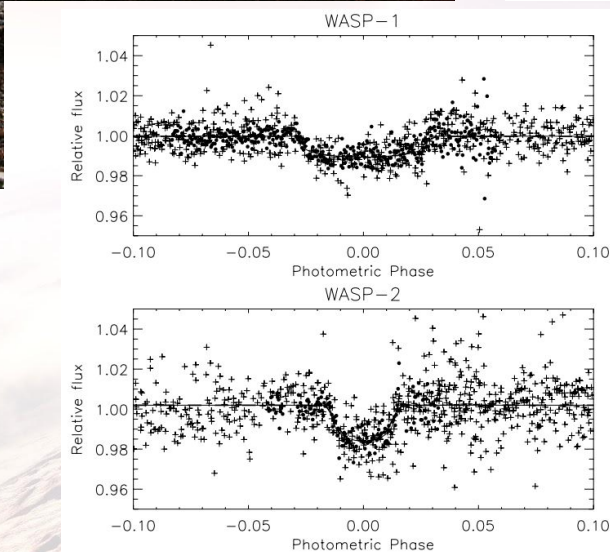
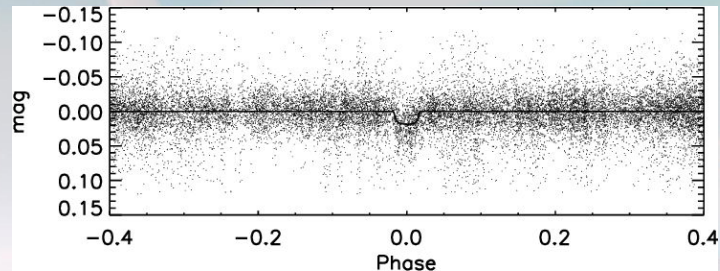
Pozemní přehlídkové projekty

SuperWASP (Wide Angle Search for Planets) Pollaco et al. 2006, PASP, 118, 1407

JAR + La Palma, 2x8 dalekohledů



WASP-37 b, Simpson et al. 2010, AJ, 141, 8



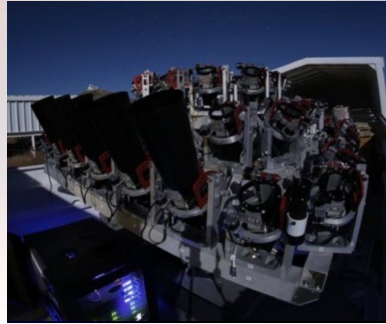
	SuperWASP
Uvedení do provozu	2003
Optika	0.11m, f/1.8
Detektor	2k x 2k CCD
Zorné pole	7.5°x7.5°
Kadence	3 min
Přesnost 10 mag	5 mmag
Rozlišení	14"/px
Objevených planet	192 (11.11.2020)

Collier-Cameron et al. 2007, MNRAS, 375, 951

HD 219666b, pokles 0.17 %
 Hellier et al. 2019, RNAAS, 3, 156
<https://wasp-planets.net>

Pozemní přehlídkové projekty

MASCARA
(The Multi-site All-Sky CAmeRA)



KELT
(The Kilodegree
Extremely Little
Telescope)
2 dalekohledy, USA,
Jižní Afrika



QES
(Qatar Exoplanet Survey, Nové Mexiko)

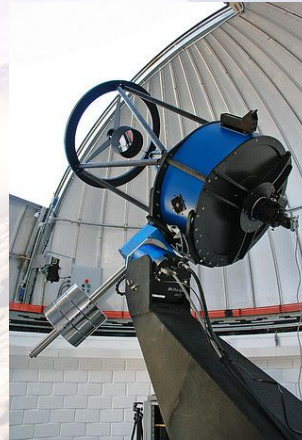
HATPI (Las Campanas)

Fly's Eye,
Maďarsko

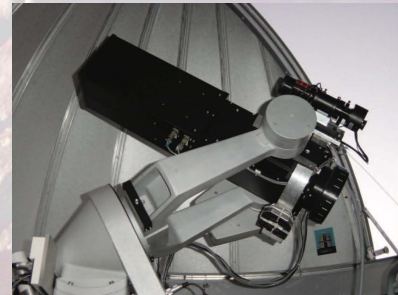


Everscope
Chile

Trappist
Chile



TrES
(The Trans-Atlantic
Exoplanet Survey
network)



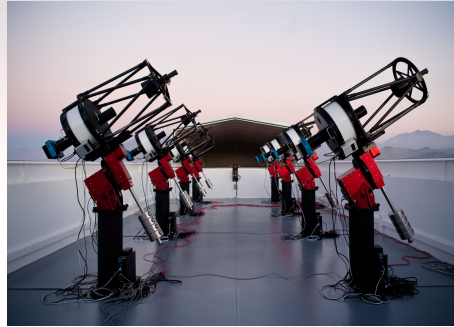
Pozemní přehlídkové projekty

NGTS

(The Next Generation Transit Survey)
12 0.2m f/2.8 dalekohledů, Paranal,
Chile



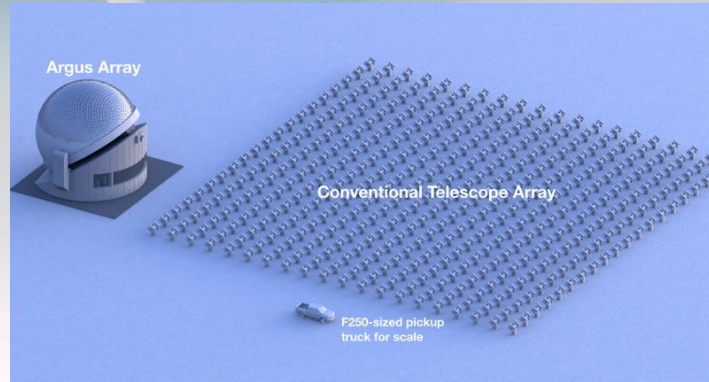
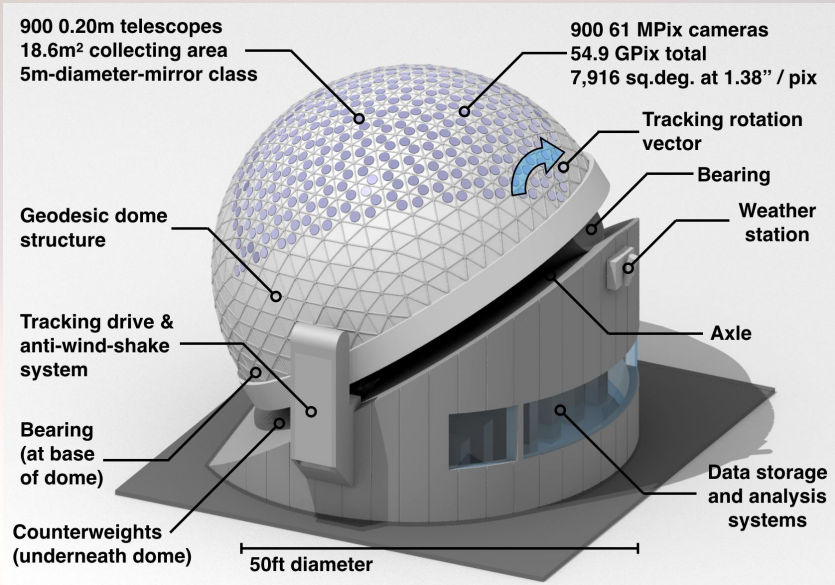
M-Earth - 40cm dalekohledy,
Cerro Tololo, Chile



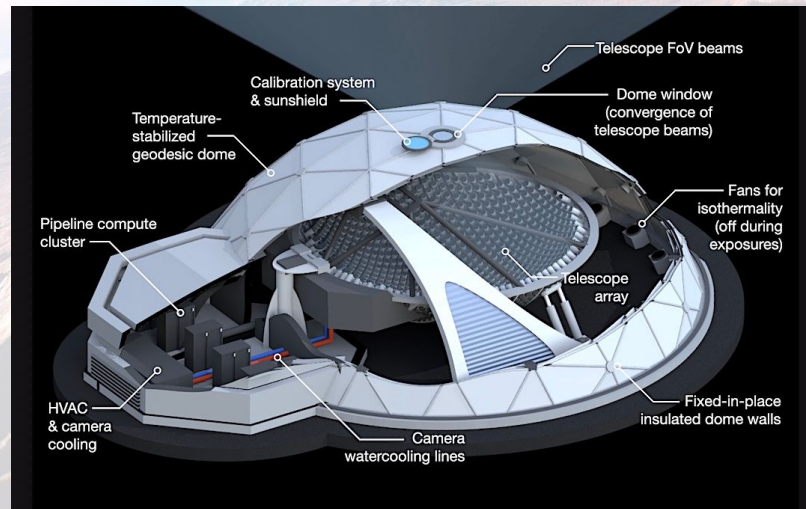
SPECULOOS - Paranal + La Palma, 1-m
dalekohledy, obyvatelné planety okolo M hvězd



Pozemní přehlídkové projekty



ARGUS - 900 20cm dalekohledů na jedné montáži pozorující celou oblohu najednou (Law et al. 2022, PASP, 134, 5003), 38 dalekohledů v provozu od 2023 na PARI v Severní Karolíně



CoRoT (Convection, Rotation and planetary Transits)

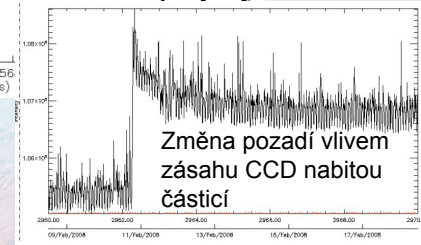
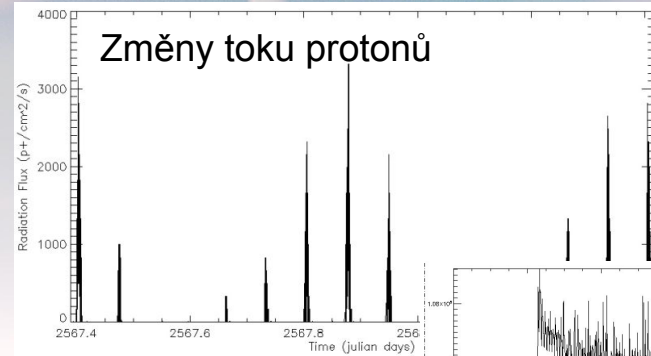
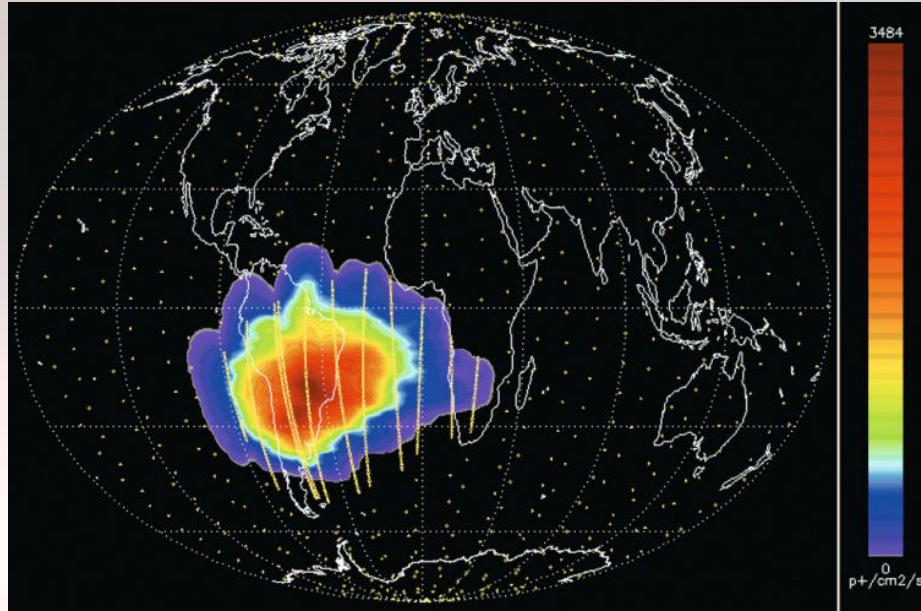
Start 27. Prosince 2006

ESA+Rakousko, Belgie, Španělsko, Německo, Brazílie



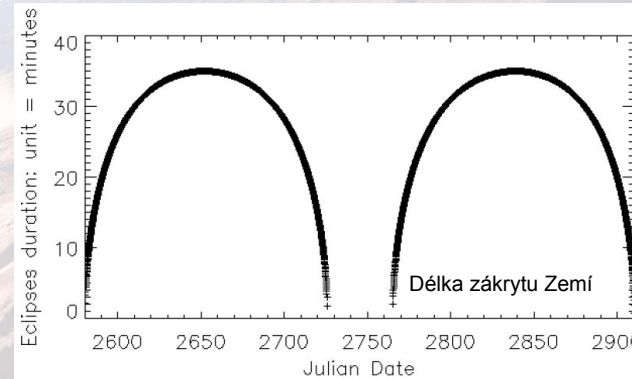
Provoz	Leden 2007-říjen 2012 (selhání počítače)
Úkoly	Exoplanety, asteroseismologie
Dráha	Polární, 900 km, 103 minut
Strategie	20 polí, 21-152 dní
Rozměry a váha	630 kg, 4x2 m
Optika	0.27m, f/4
Detektor	4x 2kx2k CCD
Zorné pole	2.7°x3.0°
Kadence	32 nebo 512 sekund
Přesnost na 15 mag	0.7 mmag při 512 expozicích
Rozlišení	2.3"/px
Objevených planet	34 ve 33 systémech
Celkový počet objektů	164000, 11-16 mag

CoRoT - okolní vlivy



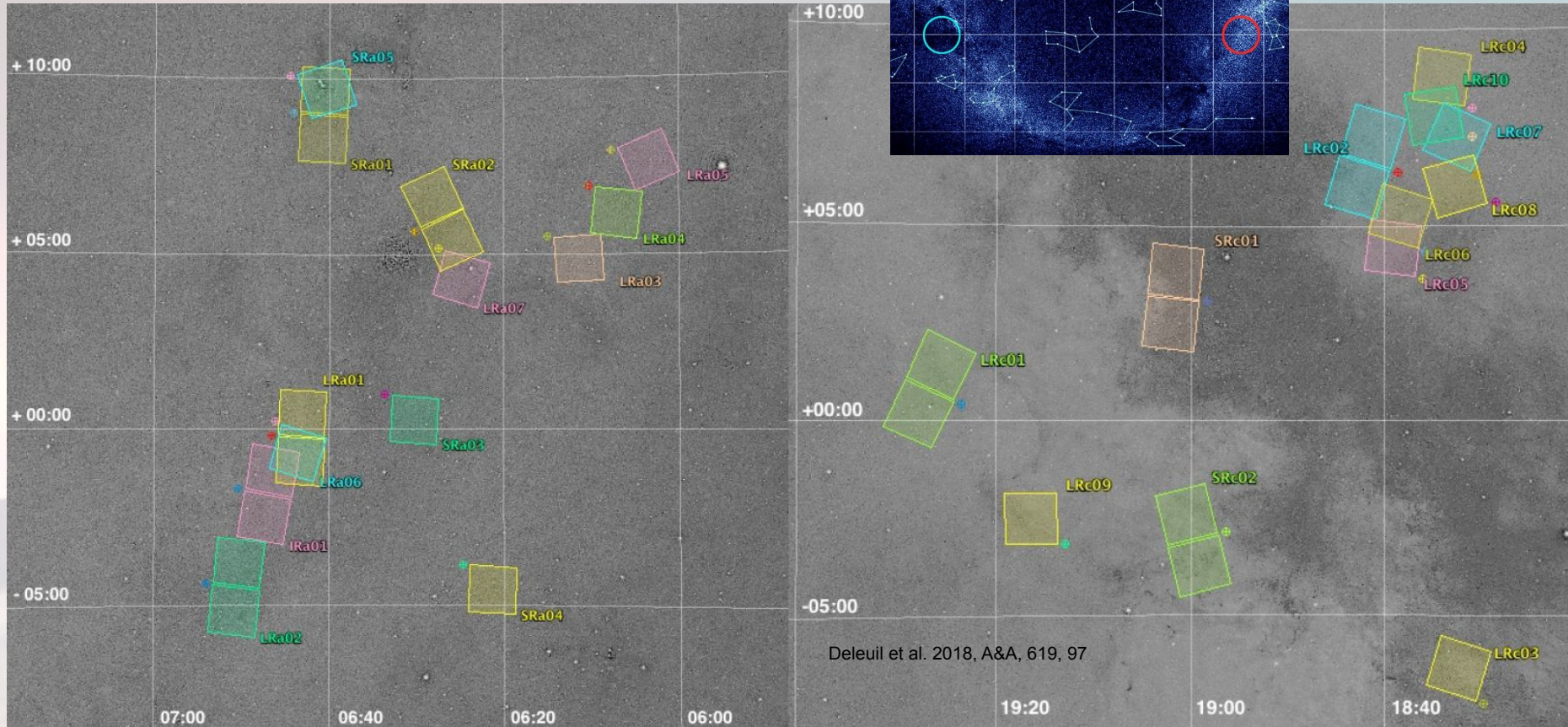
Je potřeba eliminovat

- Světlo odražené od Země a jeho změny
- Teplotní efekty spojené s nasvětlením družice
- Jihoatlantická anomálie
- Objekty na nízkých oběžných drahách

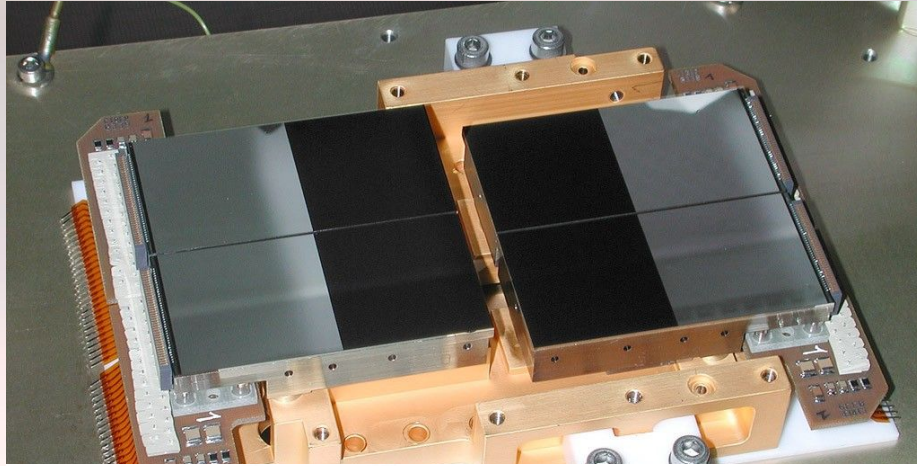


CoRoT - pozorovací okna

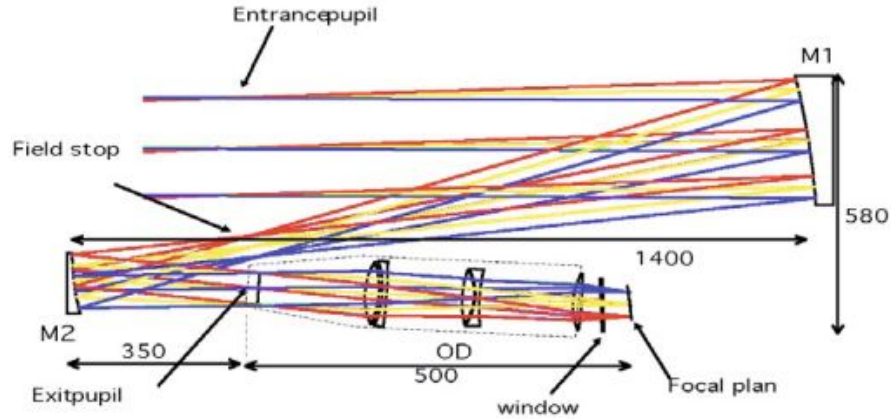
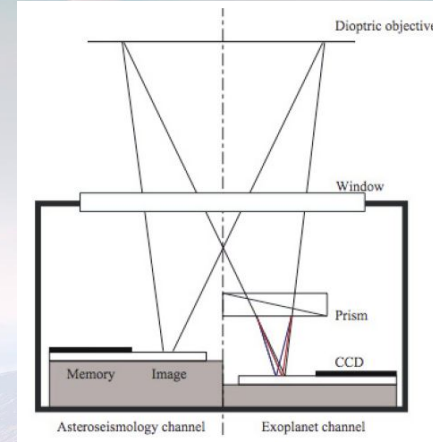
Oblasti ve směru Galaktického (anti)centra $\sim 10^\circ$



CoRoT - CCD



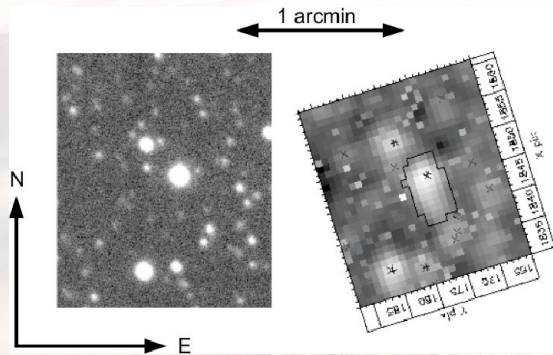
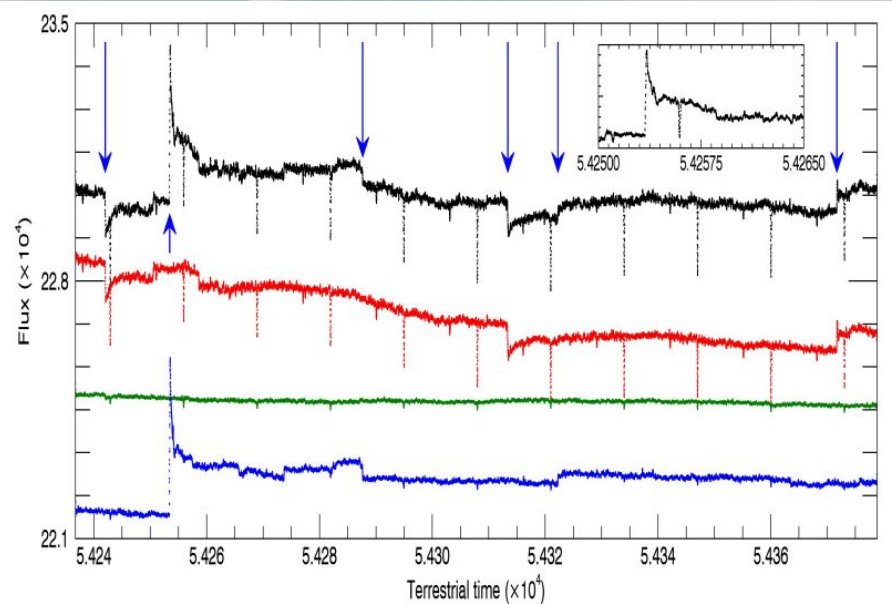
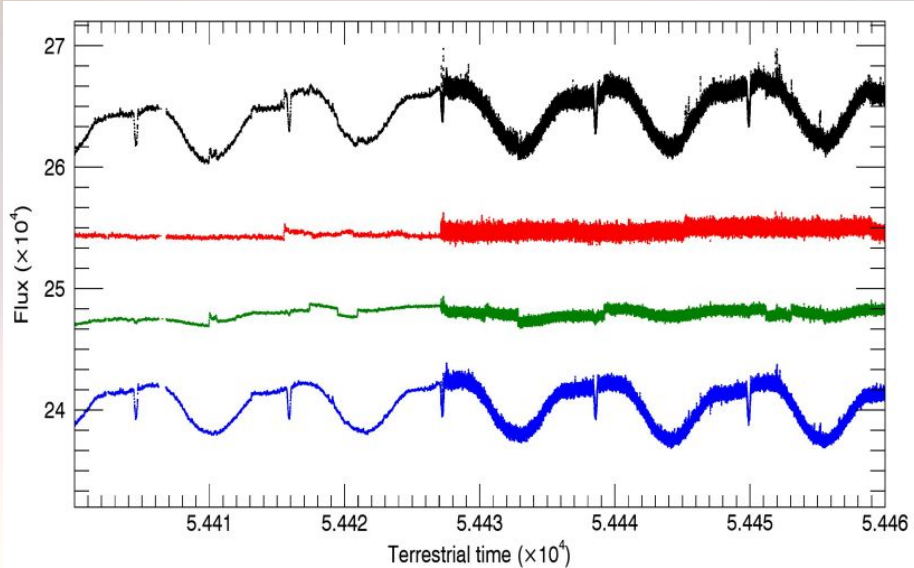
Kanál asteroseismologie - rozostřený kvůli vyšší přesnosti



Exoplanetární kanál - hvězdy 11-16 mag, 3 barvy pro snazší odlišení dvojhvězd v pozadí

2009 porucha dvou CCD - poloviční velikost

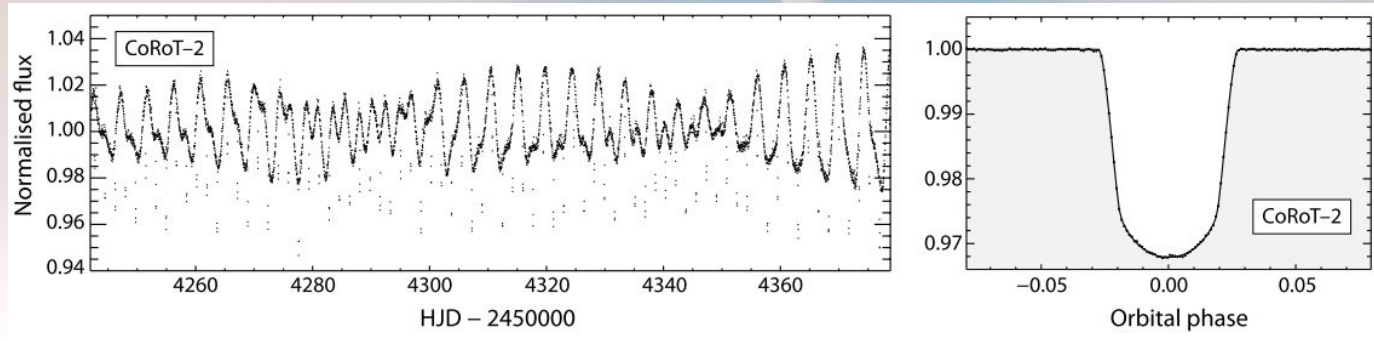
CoRoT - falešní kandidáti



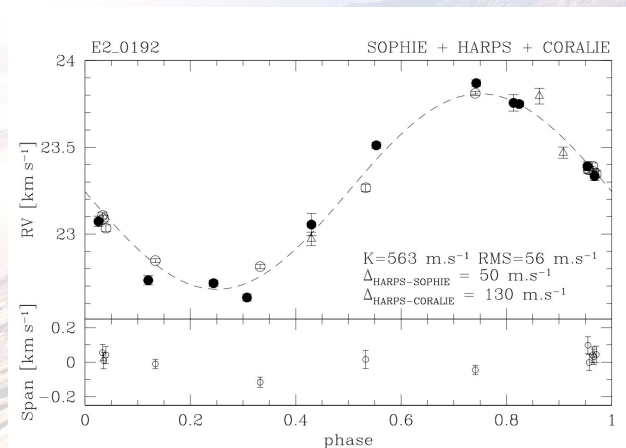
Exoplanetární kanál - hvězdy 11-16 mag, 3 barvy pro snazší odlišení dvojhvězd v pozadí

CoRoT - výsledky

Field	Total	Planet
IRa01	39	2
LRa01	52	4
SRa01	8	0
SRa02	18	1
LRa02	40	3
LRa03	16	0
SRa03	11	3
LRa04	7	0
LRa05	19	0
SRa04	11	2
SRa05	8	1
LRa06	10	0
LRa07	5	0
Total Anticentre	244	16
SRc01	47	0
LRc01	42	4
LRc02	50	6
SRc02	16	0
LRc03	45	2
LRc04	29	0
LRc05	30	2
LRc06	18	1
LRc07	10	2
LRc08	14	3
LRc09	28	1
LRc10	21	0
Total Centre	350	21
Grand Total	594	37

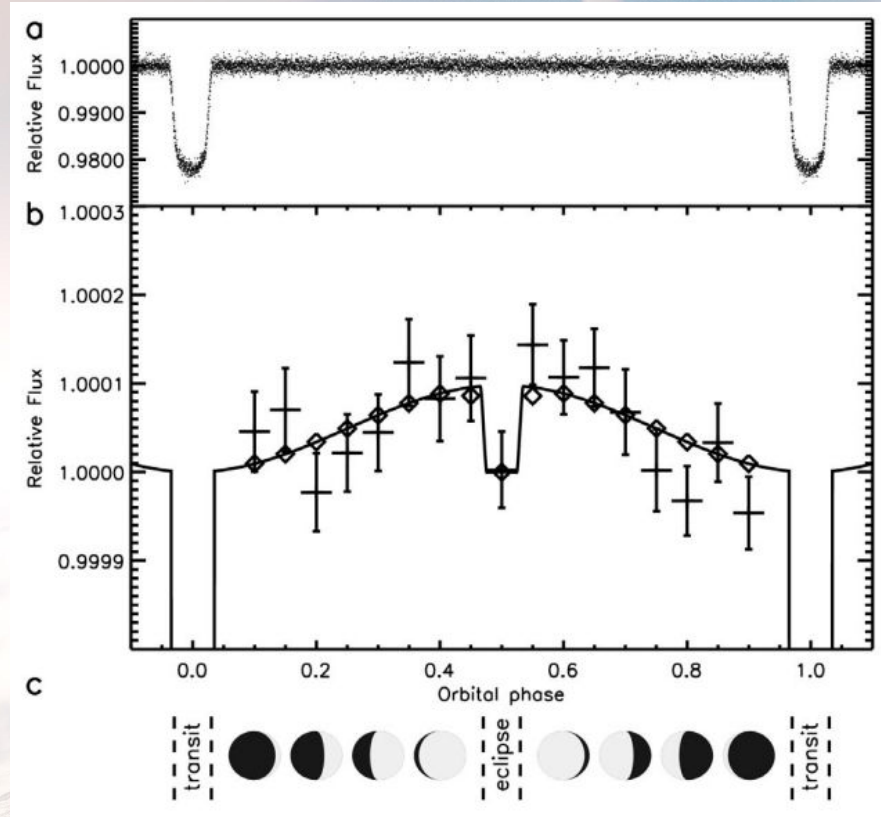


Alonso et al. 2008, A&A, 482, 21 - CoRoT-2 b - jedna z nejaktivnějších hvězd, skvrny, hvězdná rotace, sklon dráhy



CoRoT - výsledky

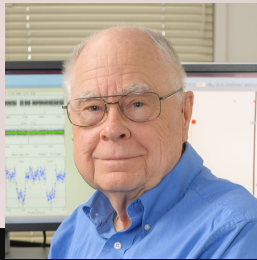
Field	Total	Planet
IRa01	39	2
LRa01	52	4
SRa01	8	0
SRa02	18	1
LRa02	40	3
LRa03	16	0
SRa03	11	3
LRa04	7	0
LRa05	19	0
SRa04	11	2
SRa05	8	1
LRa06	10	0
LRa07	5	0
Total Anticentre	244	16
SRc01	47	0
LRc01	42	4
LRc02	50	6
SRc02	16	0
LRc03	45	2
LRc04	29	0
LRc05	30	2
LRc06	18	1
LRc07	10	2
LRc08	14	3
LRc09	28	1
LRc10	21	0
Total Centre	350	21
Grand Total	594	37



Snellen et al. 2009, Nature, 459, 543 - CoRoT-1 b - první detekce sekundárních tranzitů v optické oblasti

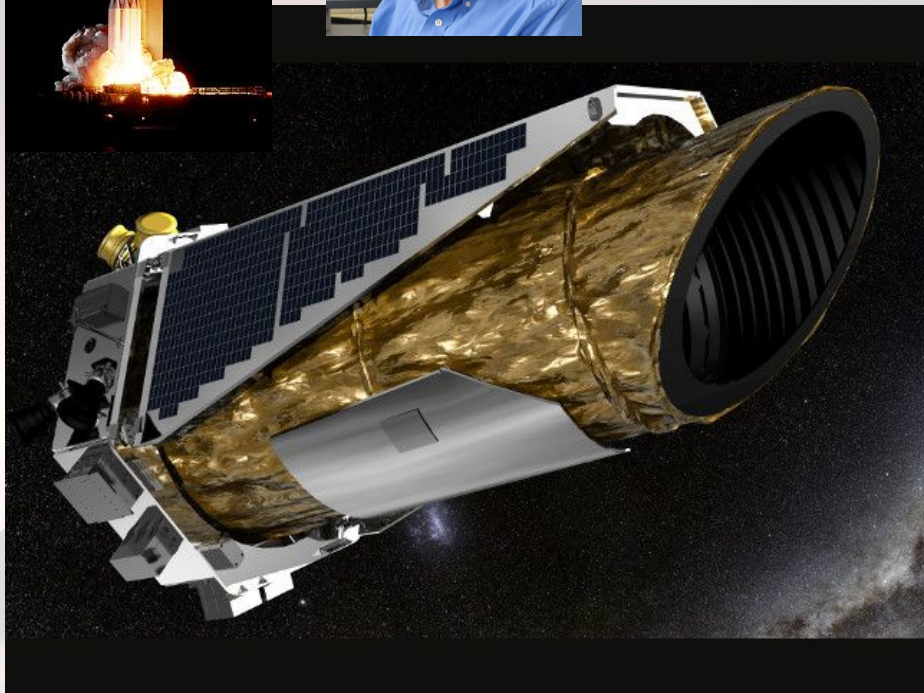


William Borucki



Kepler

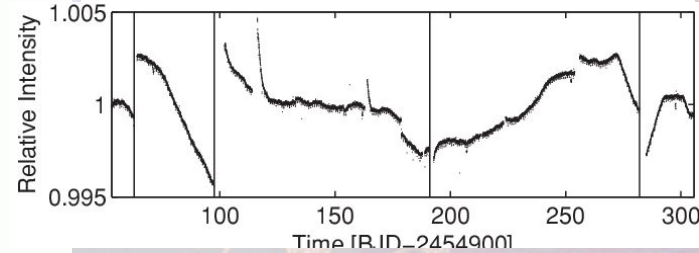
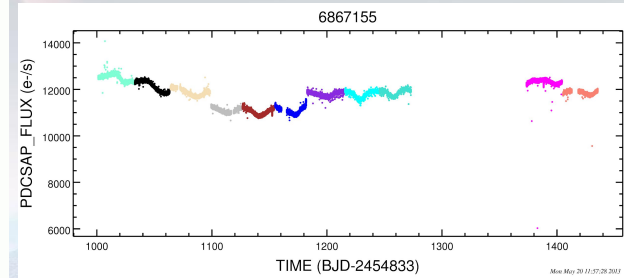
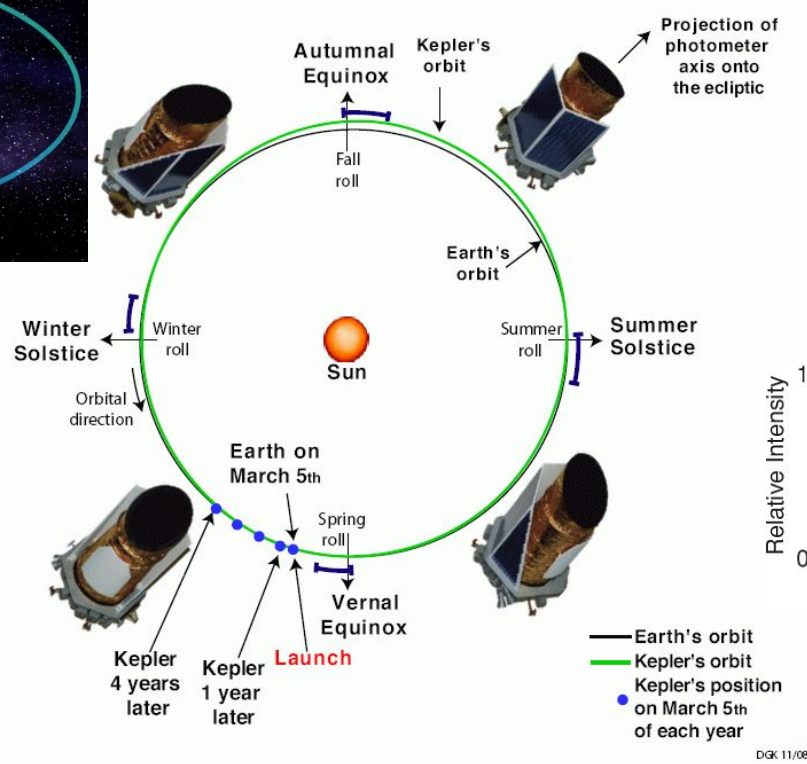
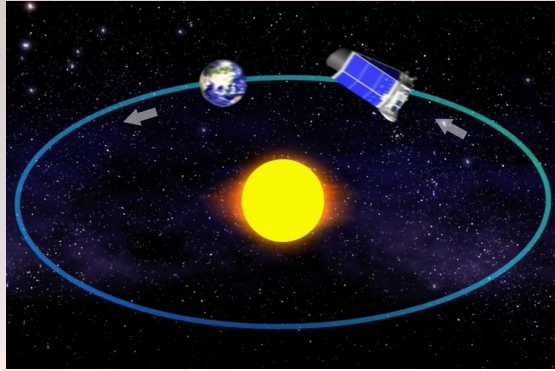
NASA



Provoz	květen 2009-říjen 2018 (došlo palivo)
Úkoly	Frekvence planet podobných Zemi Frekvence multiplanetárních systémů Statistika velikostí planet a jejich drah Vlastnosti mateřských hvězd
Dráha	Heliocentrická , 1 au, 372.5 dní
Strategie pozorování	1 (Cyg+Lyra)+19 polí (okolo ekliptiky), 4 roky + 19x80 dní
Rozměry a váha	1050 kg, 4.7x2.7 m
Optika	0.95m deska, 1.4m f/1 zrcadlo
Detektor	42 2kx1k CCD (94.6 Mpx)
Zorné pole	10.5°x10.5°
Kadence	1 nebo 30 minut
Přesnost na 12 mag	300 ppm/h
Rozlišení	4"/px
Objevených planet	~3200
Celkový počet objektů	530000, 8-16 mag

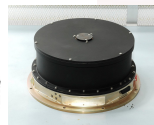
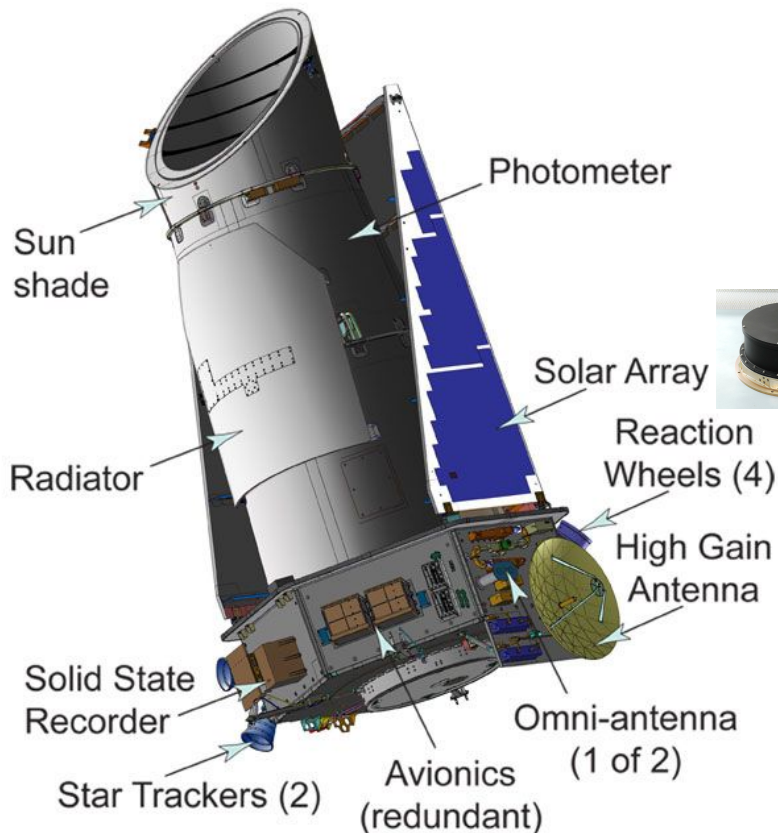
Kepler - dráha

Primární 4-letá mise - nepřetržité pozorování jednoho pole => nemůže obíhat okolo Země -> oběh okolo Slunce



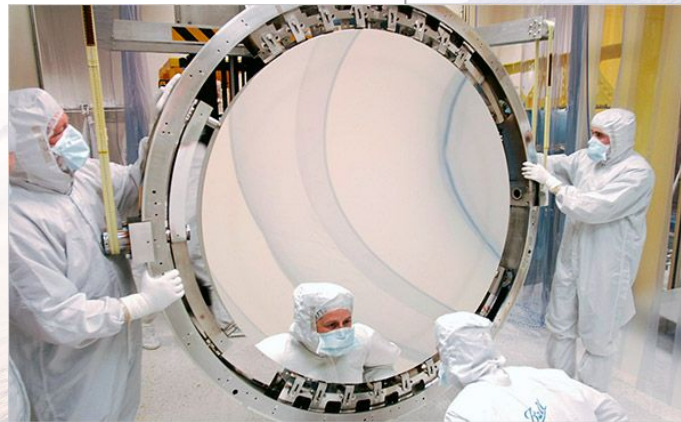
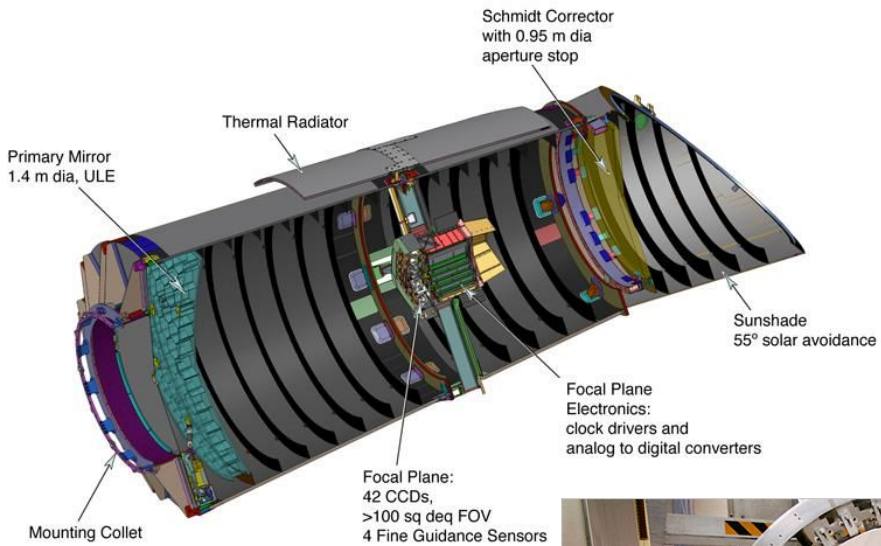
Každých 93 dní rotace o 90° - data rozdělena na tzv. Quarters + skoky v datech

Kepler - dalekohled



Provoz	květen 2009-říjen 2018 (došlo palivo)
Úkoly	Frekvence planet podobných Zemi Frekvence multiplanetárních systémů Statistika velikostí planet a jejich drah Vlastnosti mateřských hvězd
Dráha	Heliocentrická , 1 au, 372.5 dní
Strategie pozorování	1 (Cyg+Lyra)+19 polí (okolo ekliptiky), 4 roky + 19x80 dní
Rozměry a váha	1050 kg, 4.7x2.7 m
Optika	0.95m deska, 1.4m f/1 zrcadlo
Detektor	42 2kx1k CCD (94.6 Mpx)
Zorné pole	10.5°x10.5°
Kadence	1 nebo 30 minut
Přesnost na 12 mag	300 ppm/h
Rozlišení	4"/px
Objevených planet	~3200
Celkový počet objektů	530000, 8-16 mag

Kepler - dalekohled



Provoz	květen 2009-říjen 2018 (došlo palivo)
Úkoly	Frekvence plane podobných Zemi Frekvence multiplanetárních systémů Statistika velikostí planet a jejich drah Vlastnosti mateřských hvězd
Dráha	Heliocentrická , 1 au, 372.5 dní
Strategie pozorování	1 (Cyg+Lyra)+19 polí (okolo ekliptiky), 4 roky + 19x80 dní
Rozměry a váha	1050 kg, 4.7x2.7 m
Optika	0.95m deska, 1.4m f/1 zrcadlo
Detektor	42 2kx1k CCD (94.6 Mpx)
	10.5°x10.5°
	1 nebo 30 minut
	300 ppm/h při 512 expozici
	4"/px
	~3200
	530000, 8-16 mag

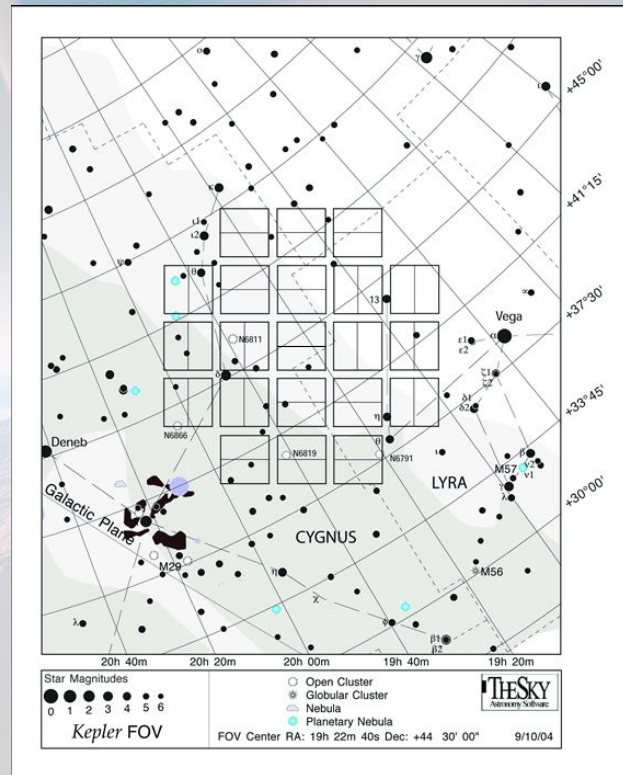
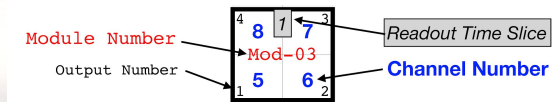
Kepler - detektor



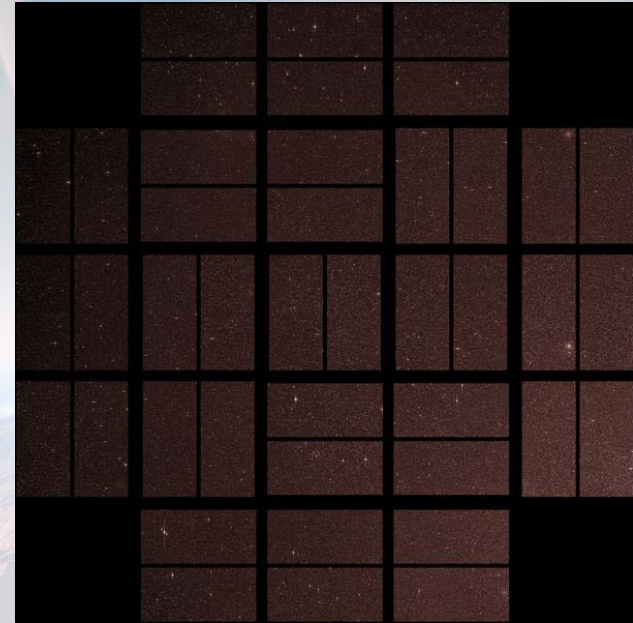
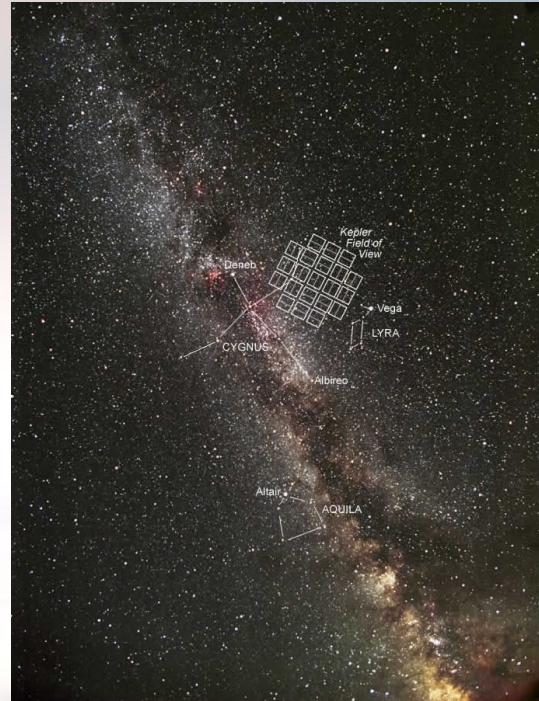
Kepler Focal Plane Layout

ECA-504	ECA-503	ECA-502	ECA-501	ECA-500
Mod-01 FGS2-CH1	4 4 3 Mod-02	4 8 7 3 Mod-03	12 3 11 Mod-04	Mod-05 FGS1-CH2
1	1 2	1 5 6 2	9 10 2	1
3 15 3 14 Mod-06	4 20 5 19 Mod-07	4 24 2 23 Mod-08	1 25 4 28 Mod-09	1 29 1 32 Mod-10
4 16 13 1	1 17 18 2	1 21 22 2	2 26 27 3	2 30 31 3
3 35 4 34 Mod-11	3 39 7 38 Mod-12	3 43 3 42 Mod-13	1 45 5 48 Mod-14	1 49 2 52 Mod-15
4 36 33 1	4 40 37 1	4 44 41 1	4 46 47 3	2 50 51 3
3 55 5 54 Mod-16	3 59 2 58 Mod-17	2 62 4 61 Mod-18	2 66 1 65 Mod-19	1 69 3 72 Mod-20
4 56 53 1	4 60 57 1	3 63 64 4	4 67 68 4	2 70 71 3
1	2 74 3 73 Mod-21	2 78 5 77 Mod-23	2 82 2 81 Mod-24	1 Mod-25
FGS2-CH2	3 75 76 4	3 79 80 4	3 83 84 4	FGS1-CH1

- 6s expozice, které se skládají do 1min a 30min
- vyčítají se jen předdefinované polohy (tzv. stamps)
- 3 moduly postupně odešly



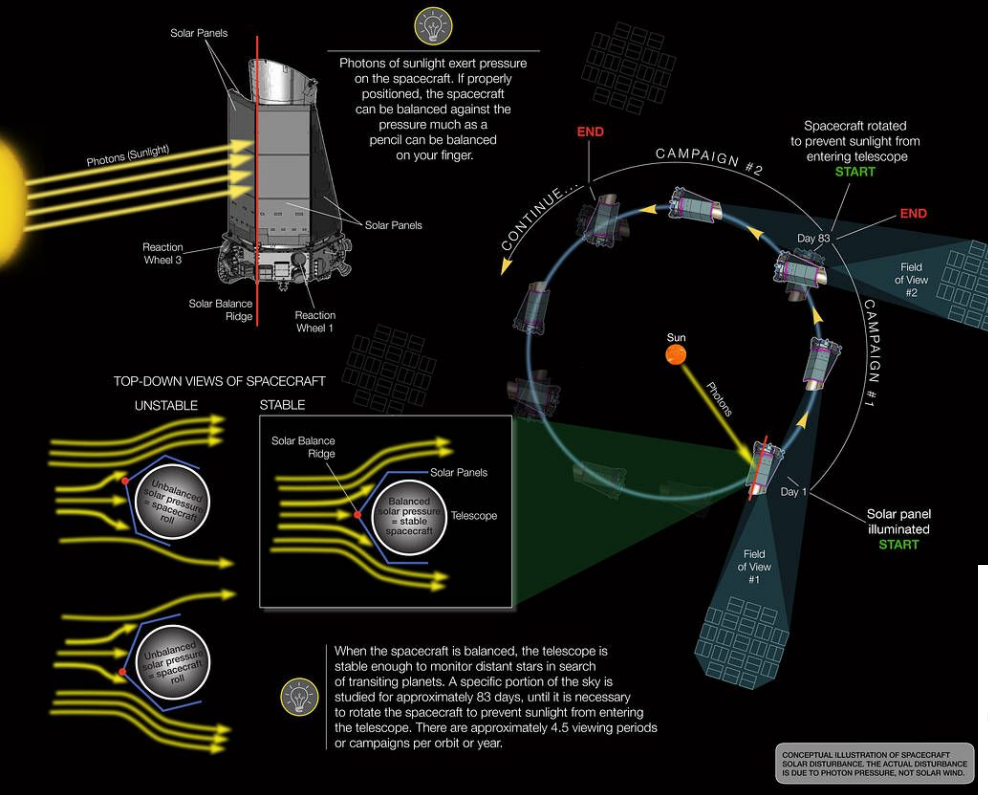
Kepler - detektor



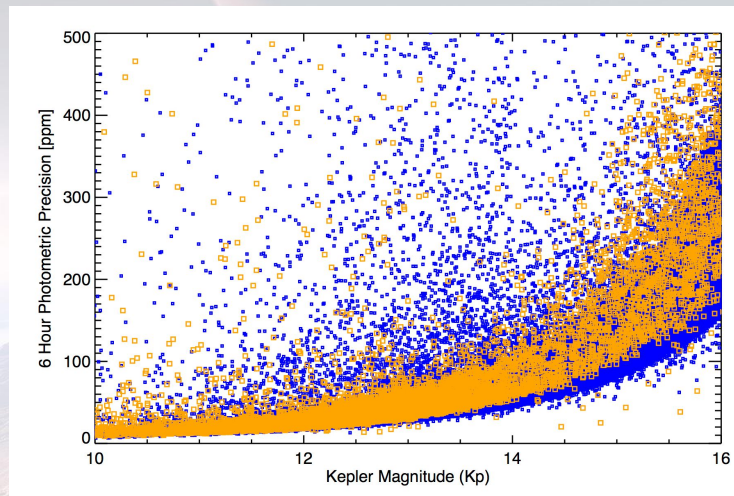
- 6s expozice, které se skládají do 1min a 30min
- vyčítají se jen předdefinované polohy (tzv. stamps)
- 3 moduly postupně odešly

Kepler - K2

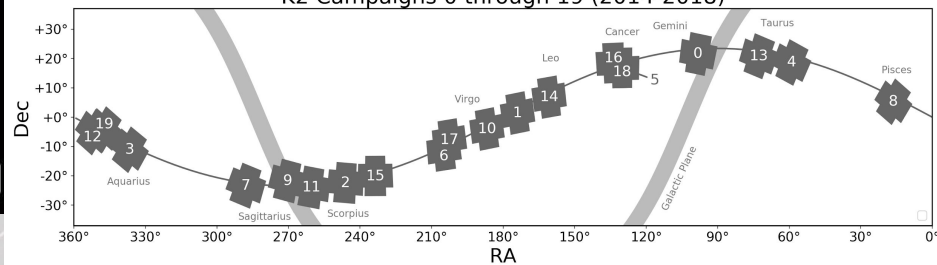
Kepler's Second Light: How K2 Will Work



Po poruše druhého gyroskopu - náhradní mise od 2014, 19 polí okolo ekliptiky po ~80 dnech



K2 Campaigns 0 through 19 (2014-2018)

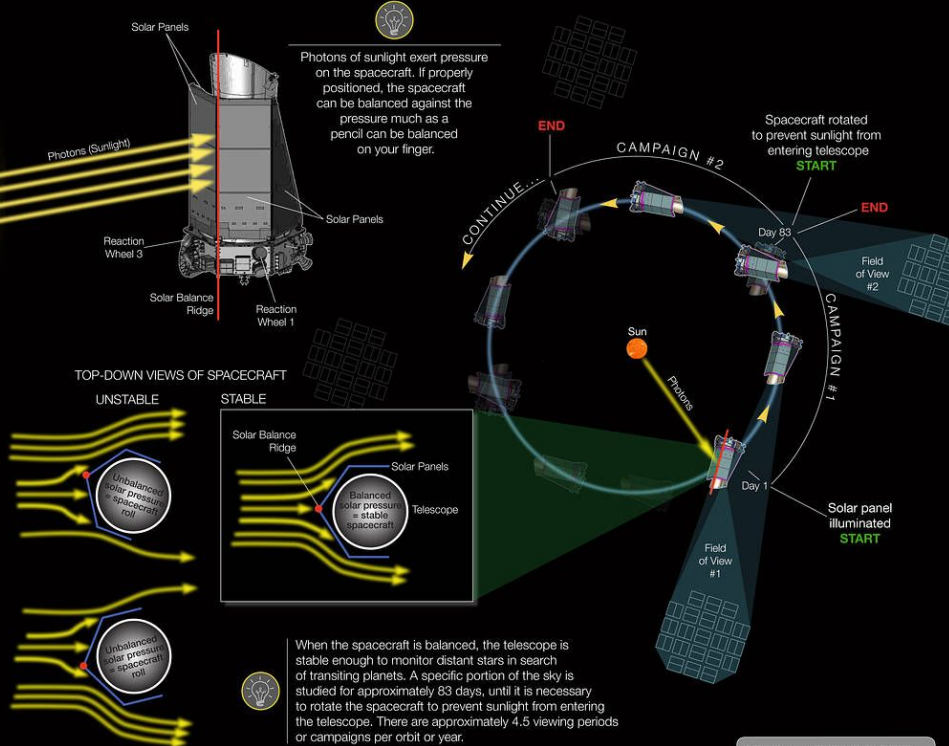


Kepler - K2

Kepler's Second Light: How K2 Will Work

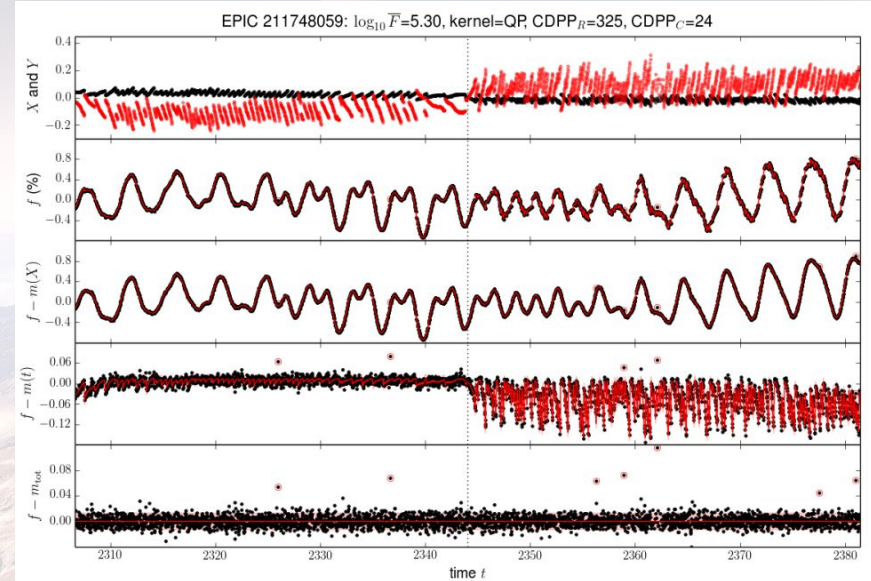


Photons of sunlight exert pressure on the spacecraft. If properly positioned, the spacecraft can be balanced against the pressure much as a pencil can be balanced on your finger.

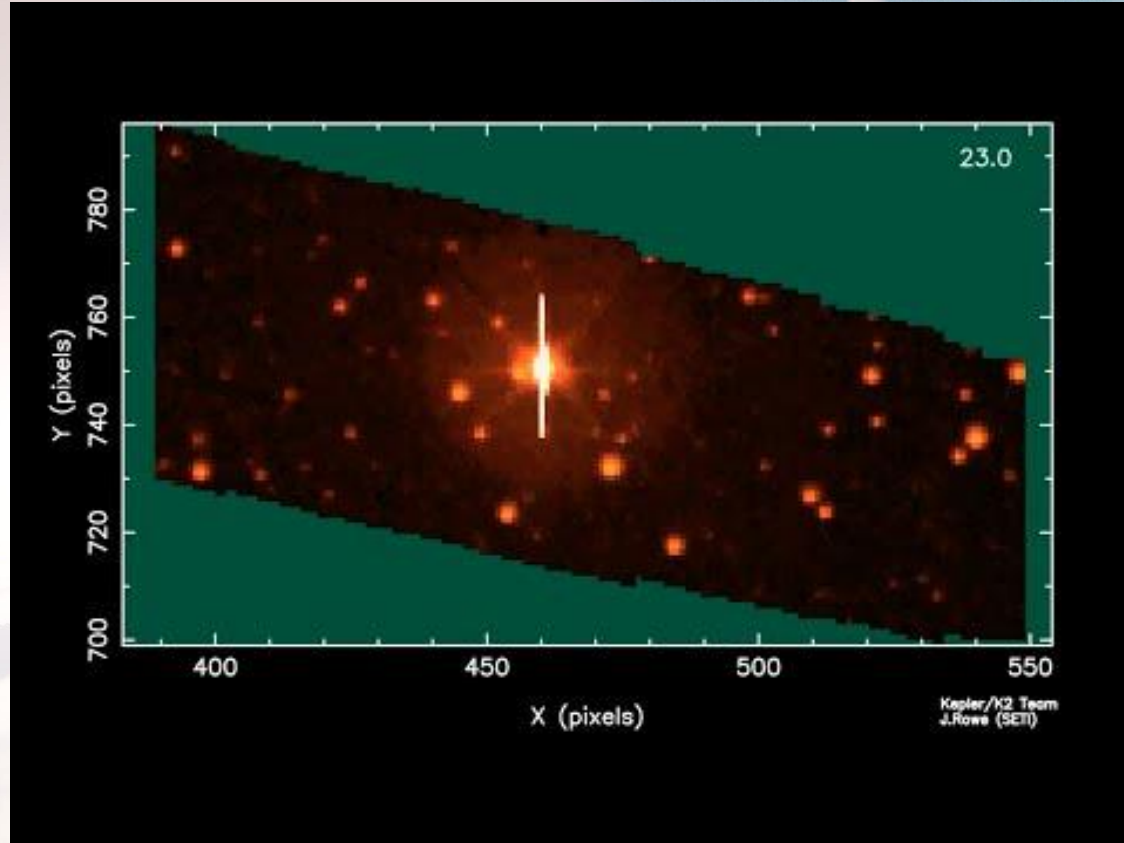


CONCEPTUAL ILLUSTRATION OF SPACECRAFT SOLAR DISTURBANCE. THE ACTUAL DISTURBANCE IS DUE TO PHOTON PRESSURE, NOT SOLAR WIND.

Po poruše druhého gyroskopu - náhradní mise od 2014, 19 polí okolo ekliptiky po ~80 dnech

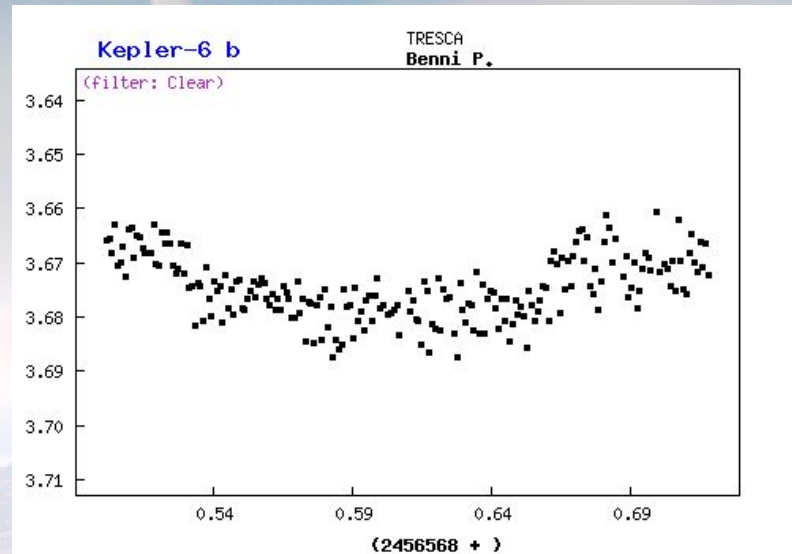
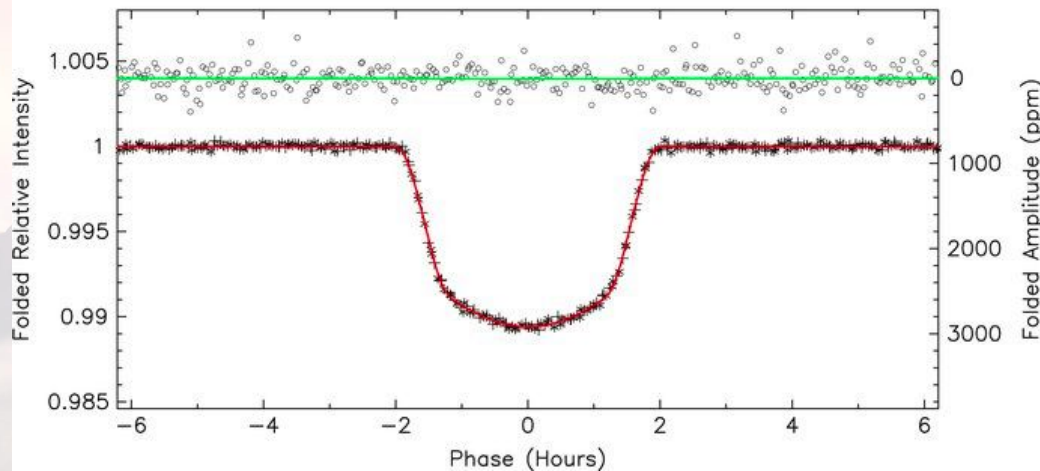
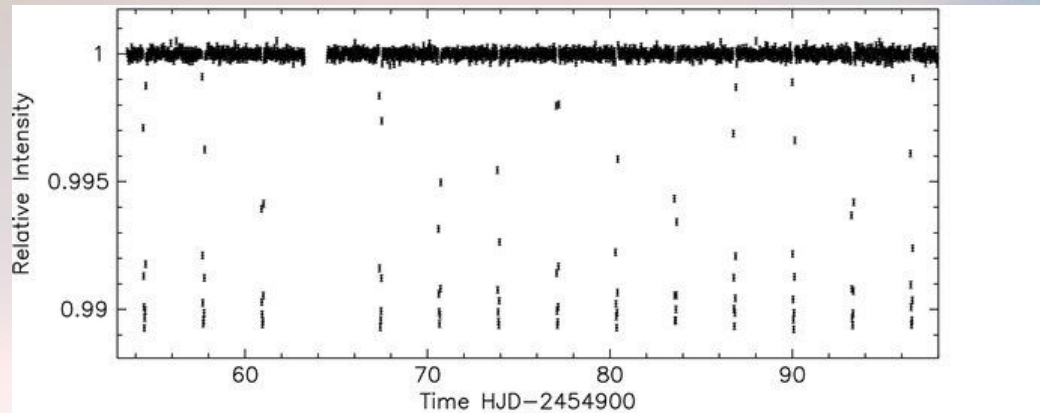


Kepler - K2



Pozorování objektů Sluneční soustavy

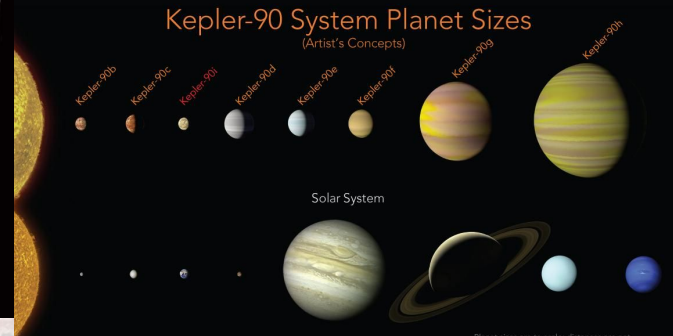
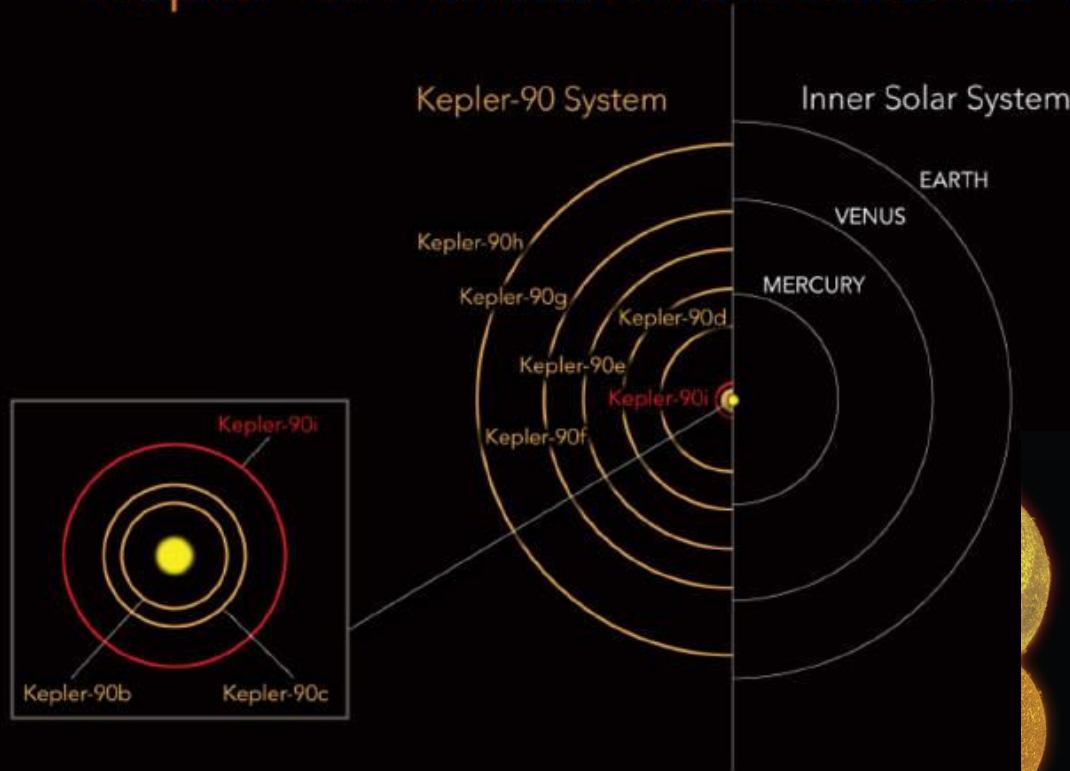
Kepler - výsledky



Srovnání s pozemními měřeními

Kepler - výsledky

Kepler-90 Planets Orbit Close to Their Star

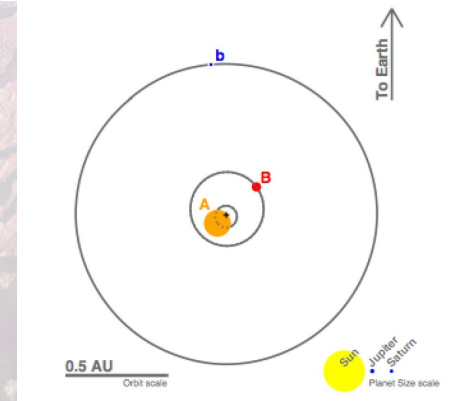
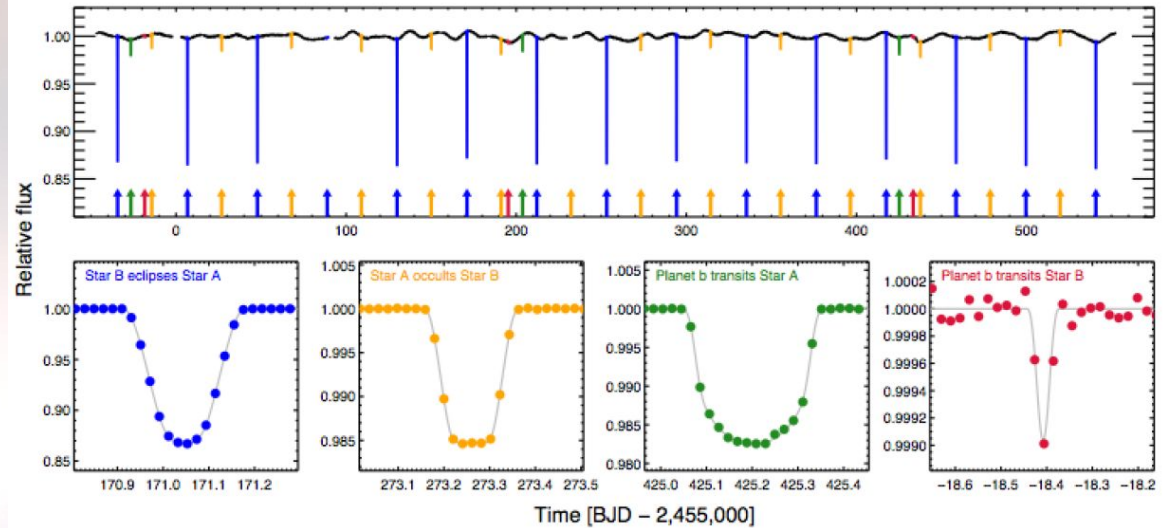


Kepler - výsledky

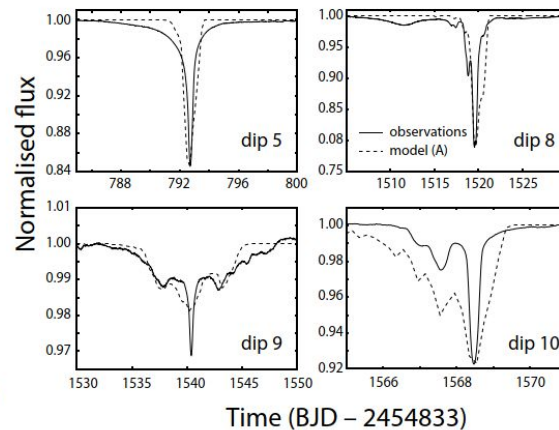
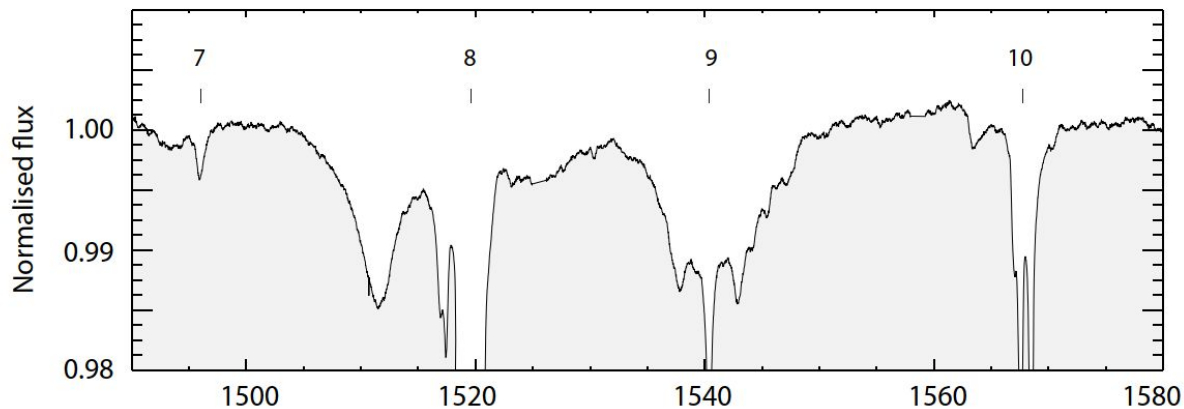
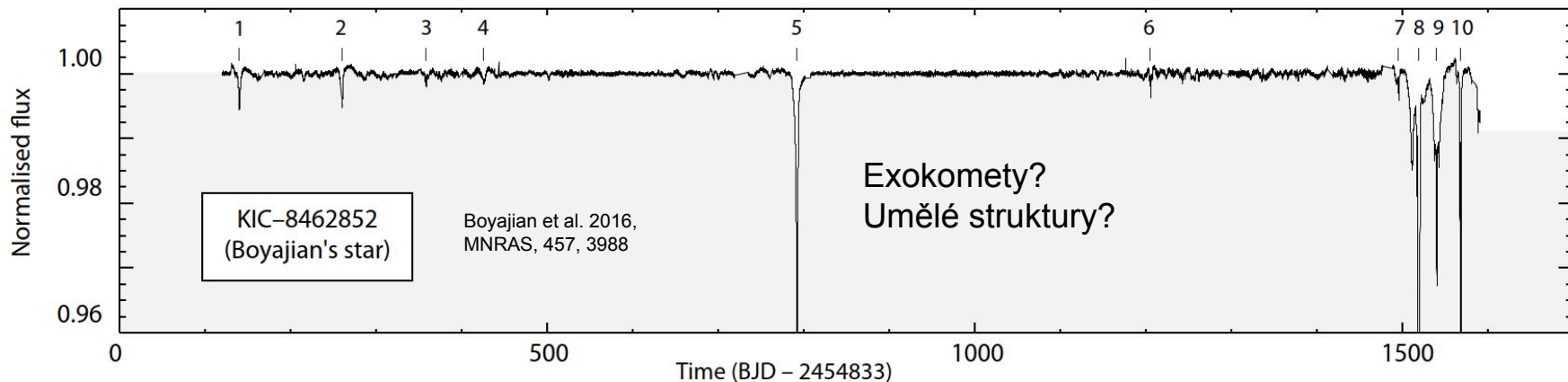


Cirkumbinární planeta - Tatooine
Doyle et al. 2011, Science, 333, 1602

Dvojhvězda: $P_{\text{orb}} = 41$ dní
Exoplaneta: $P_{\text{orb}} = 229$ dní



Kepler - výsledky



TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite)



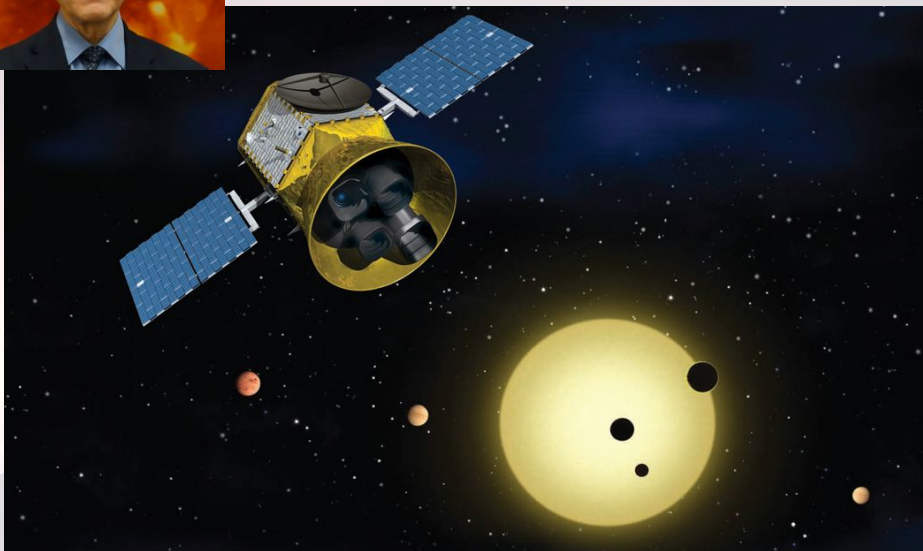
Massachusetts Institute of Technology (MIT) a Smithsonian Astrophysical Observatory (SAO); NASA

Start 18. dubna 2018, začátek měření 24.7.2018

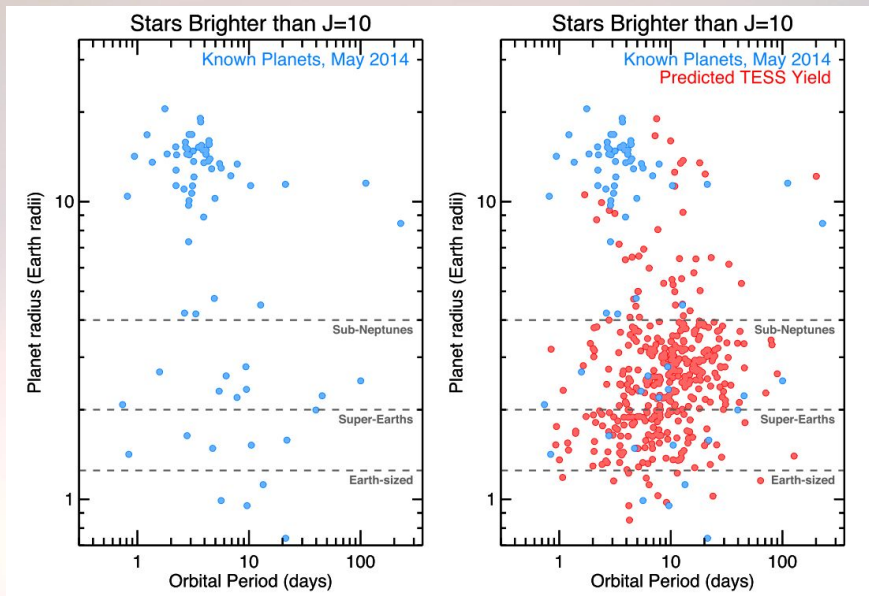
Provoz	duben 2018-
Úkoly	Exoplanety u jasných hvězd, F5-M5, asteroseismologie, kandidáti pro JWST
Dráha	Vysoká geocentrická, 13.7 dní
Strategie	x polí, 27.4-352 dní
Rozměry a váha	327 kg, 3.7x1.2x1.5 m
Optika	0.1m, f/1.4
Detektor	4x 2kx2k CCD (x4)
Zorné pole	4x24°x24°
Kadence	2 nebo 30 minut
Přesnost na 10 mag	200 ppm při 1-hodinové expozici
Rozlišení	21"/px
Objevených planet	268, 5931 kandidátů (listopad 2022)
Celkový počet objektů	200000 2min, 1 min, 10 ⁹ 30min, 3-15 mag

<https://tess.mit.edu/>

Ricker et al. 2014, SPIE, 914, 20



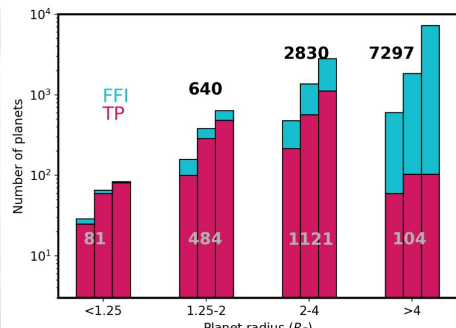
TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite)



Start 18. dubna 2018, začátek měření 24.7.2018

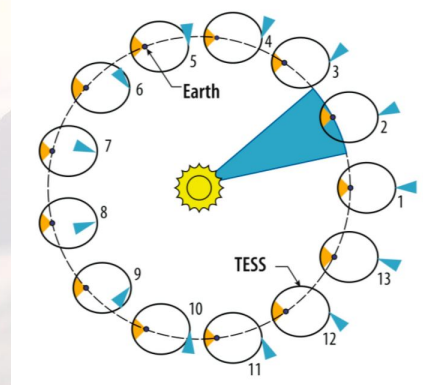
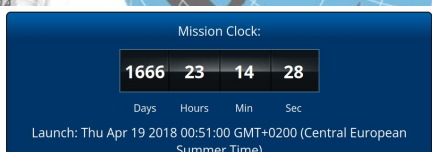
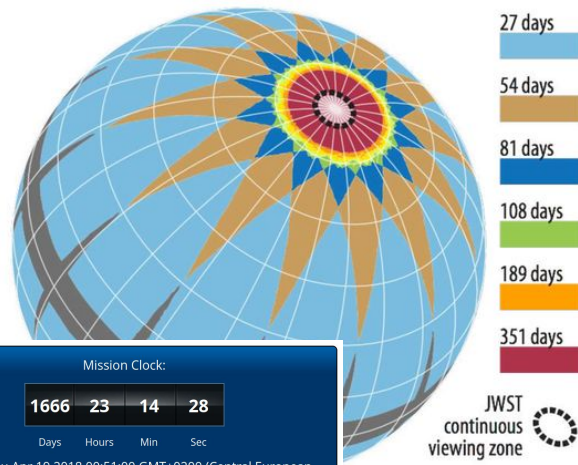
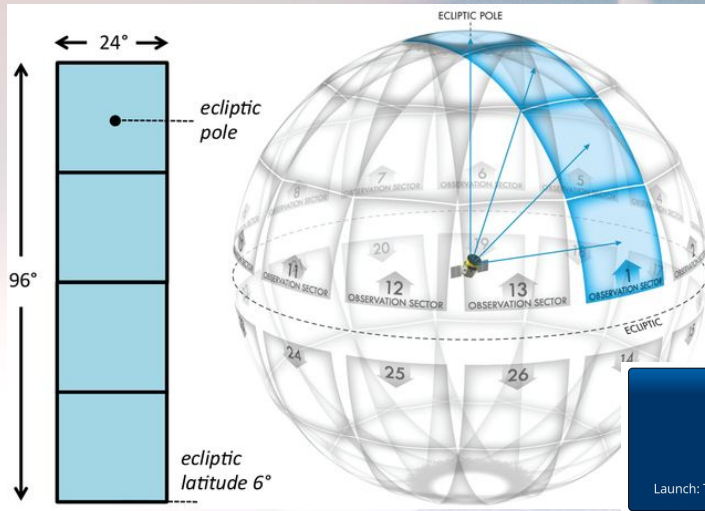
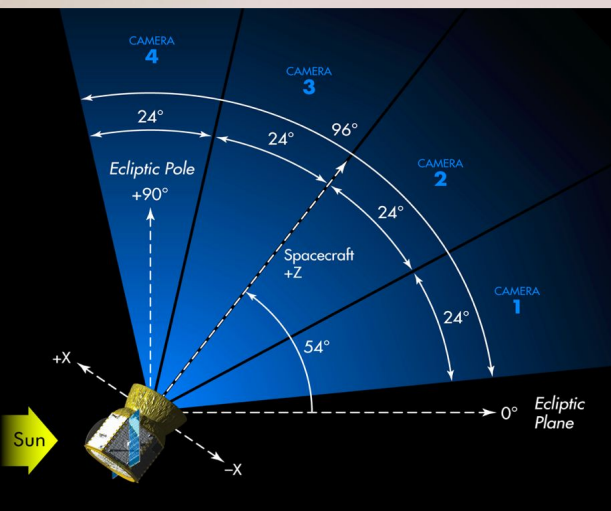
Provoz	duben 2018-
Úkoly	Exoplanety u jasných hvězd, F5-M5, asteroseismologie, kandidáti pro JWST
Dráha	Vysoká geocentrická, 13.7 dní
Strategie	x polí, 27.4-352 dní
Rozměry a váha	327 kg, 3.7x1.2x1.5 m
Optika	0.1m, f/1.4
Detektor	4x 2kx2k CCD (x4)
Zorné pole	4x24°x24°
Kadence	2 nebo 30 minut
Přesnost na 10 mag	200 ppm při 1-hodinové expozici
Rozlišení	21"/px
Objevených planet	268, 5931 kandidátů (listopad 2022)
Celkový počet objektů	200000 2min, 10 ⁹ 30min, 3-15 mag

Ricker et al. 2014, SPIE, 914, 20

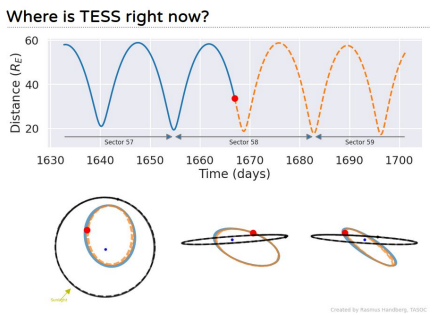


Huang et al. 2018, arXiv:1807.11129

TESS - strategie



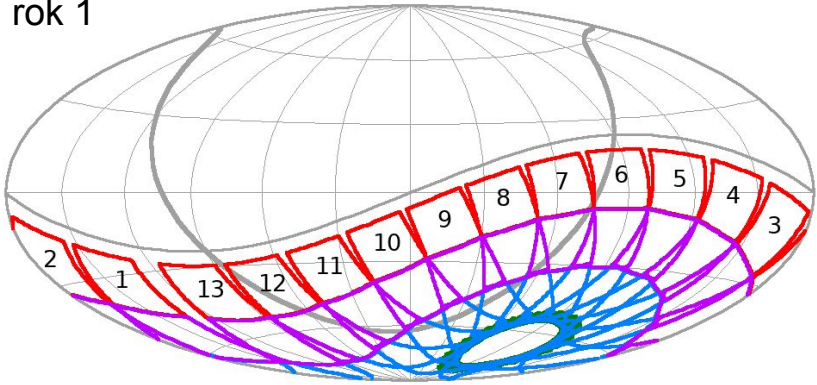
26 sektorů, každý 2x13.7 dne.
Momentálně sektor 58 (69 celkem+?)



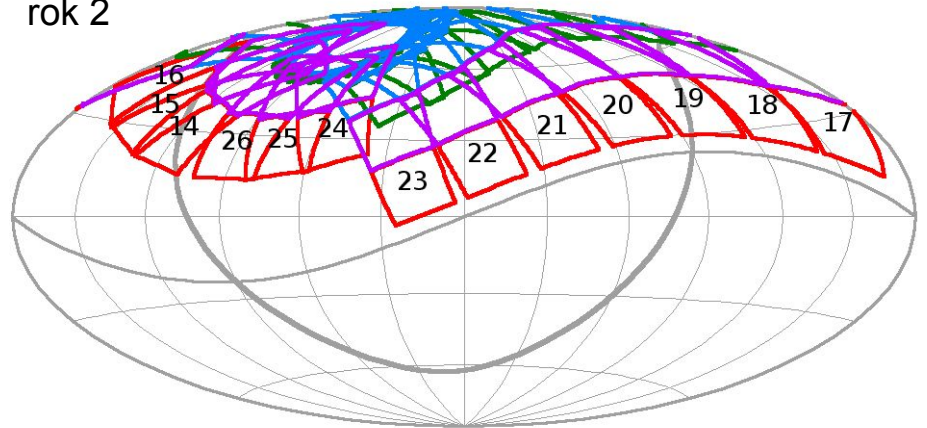
10.11.2022

TESS - strategie

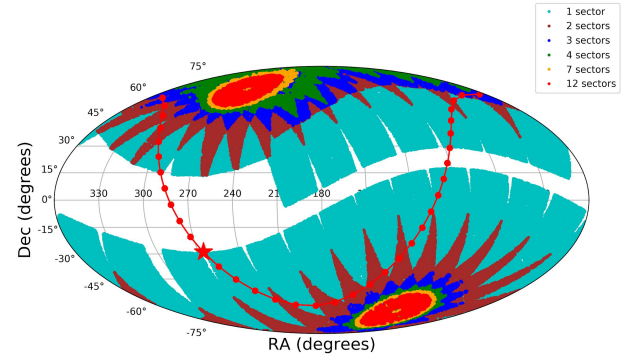
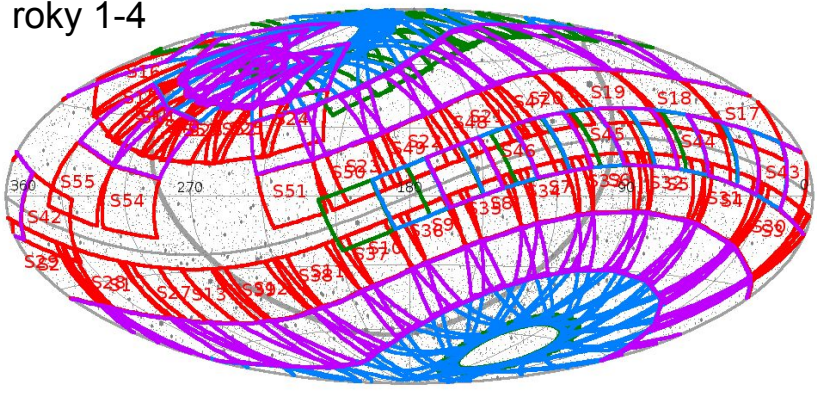
rok 1



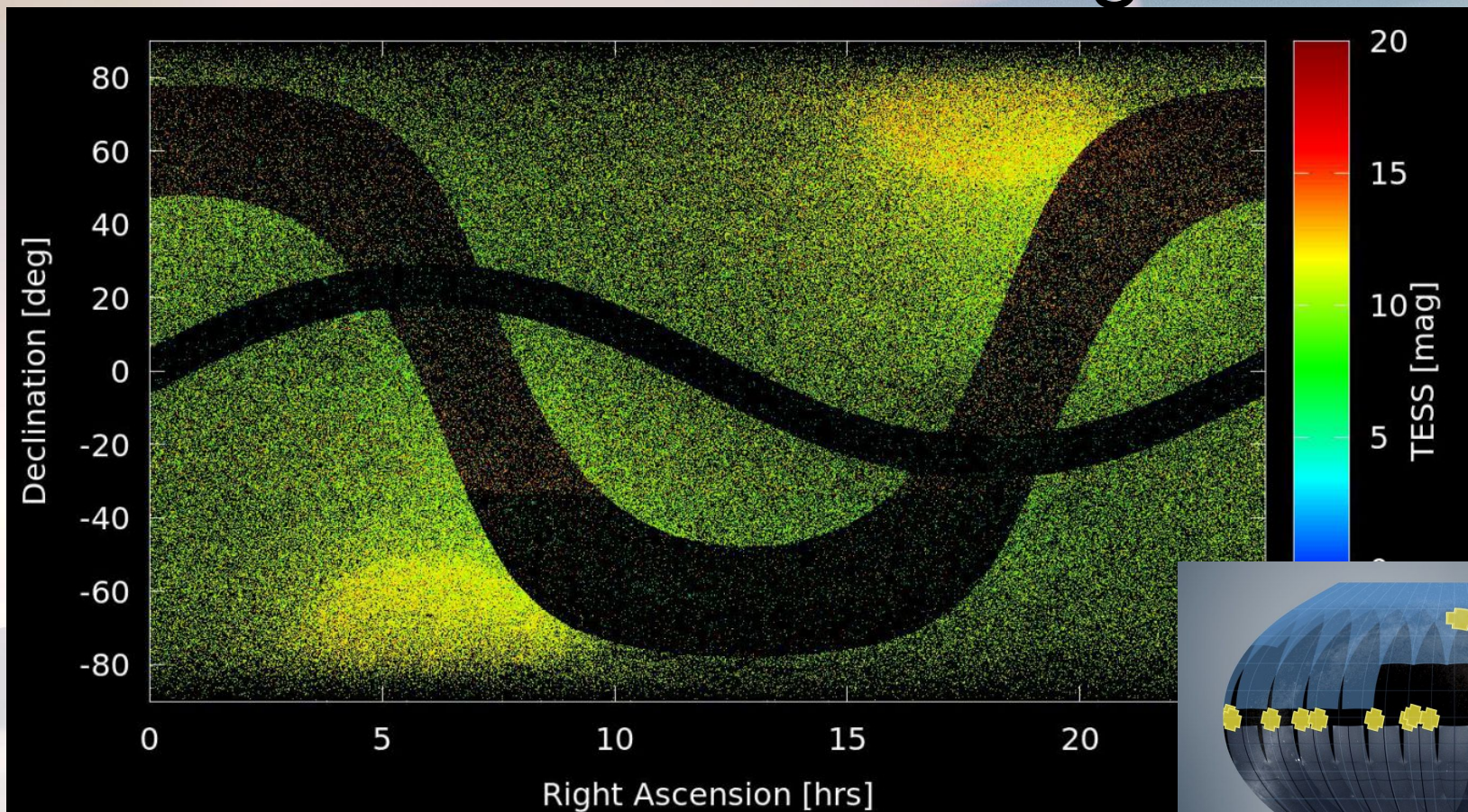
rok 2



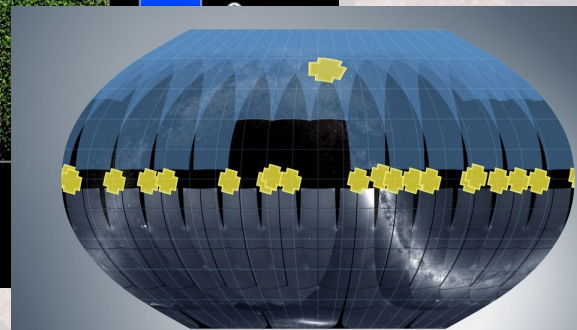
roky 1-4



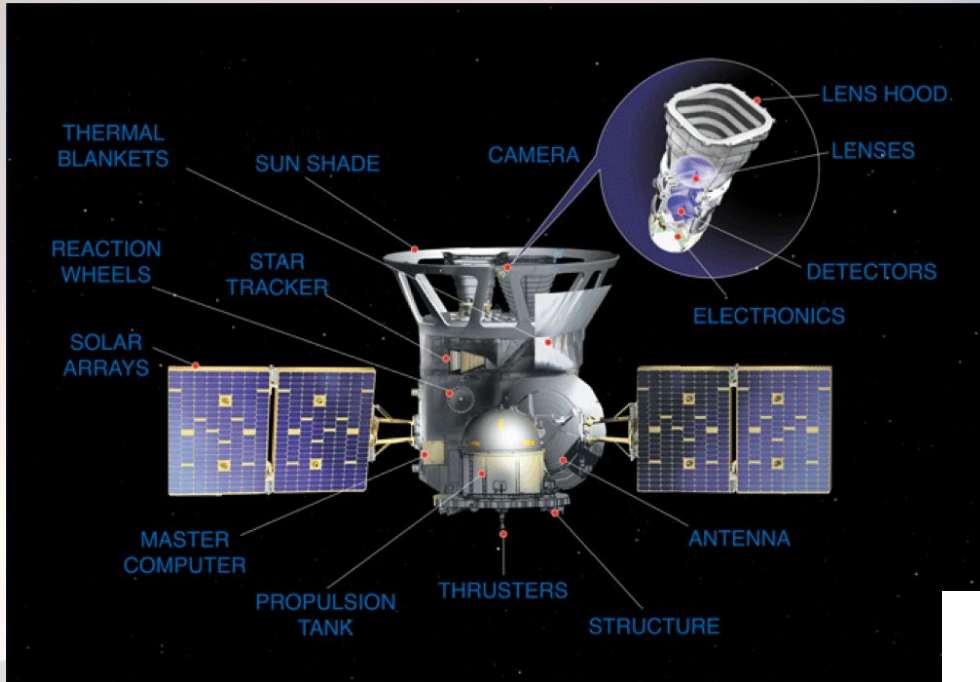
TESS - strategie



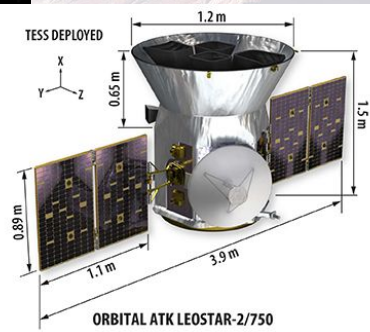
400x větší
plocha než
Kepler



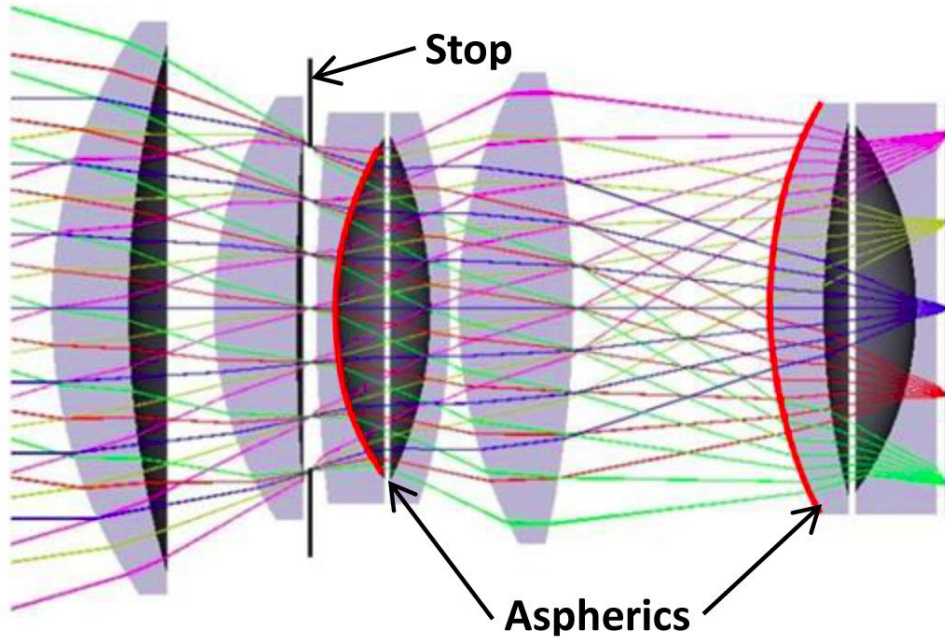
TESS - strategie



2x192 GB SSD
Přenos 100 Mbit/s
Pracovní výkon 290 W (415 W solární panely)
Pracovní teplota $\sim -75^{\circ}\text{C}$

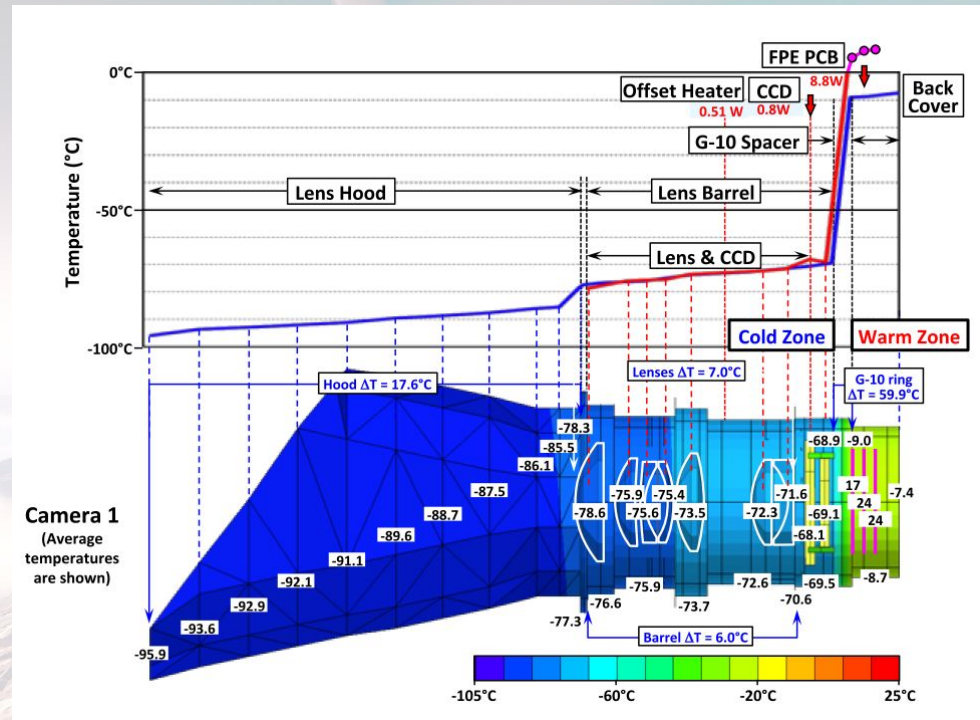
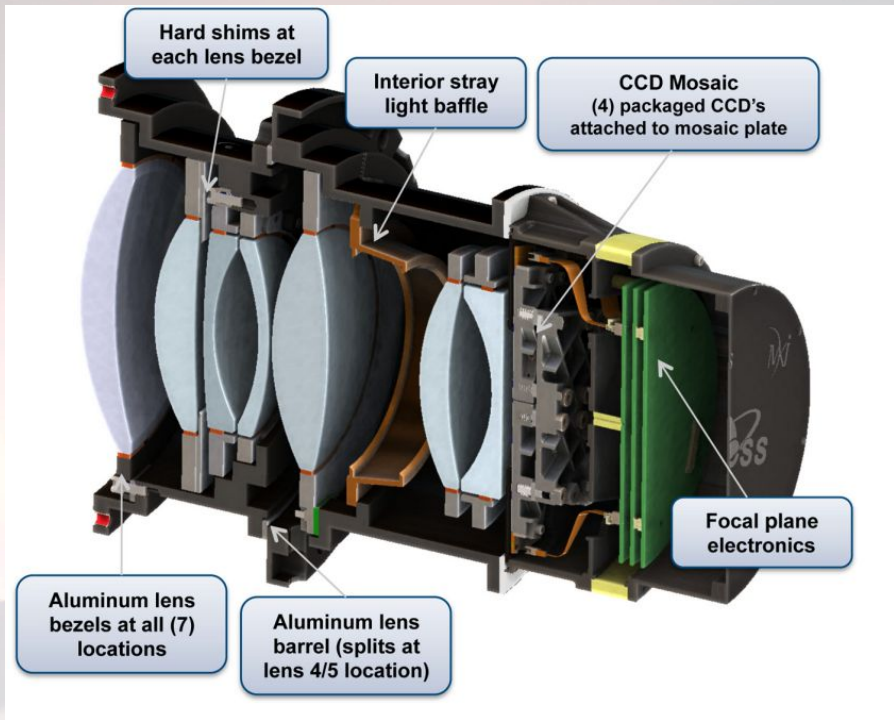


TESS - parametry

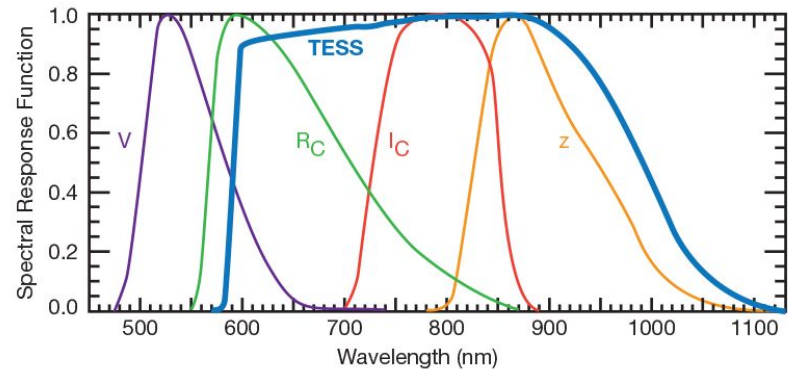
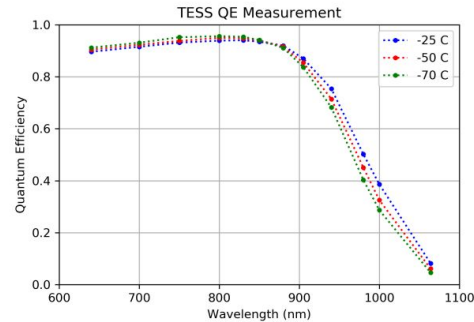
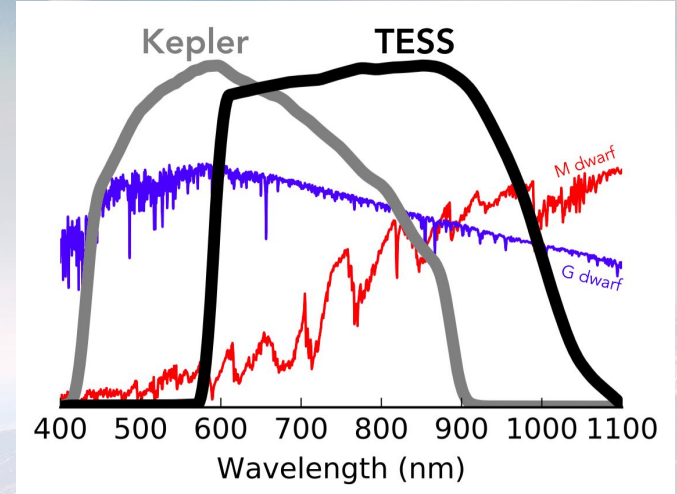
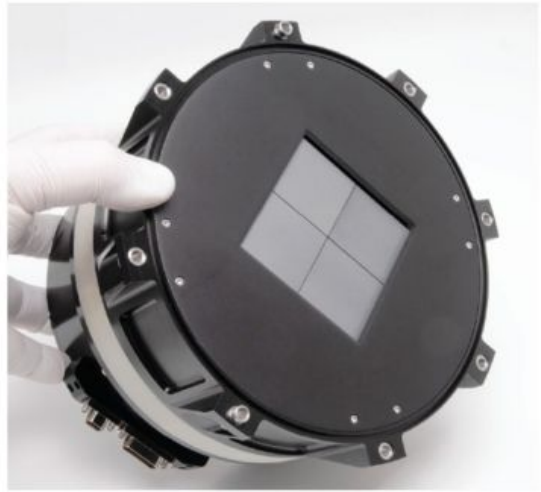
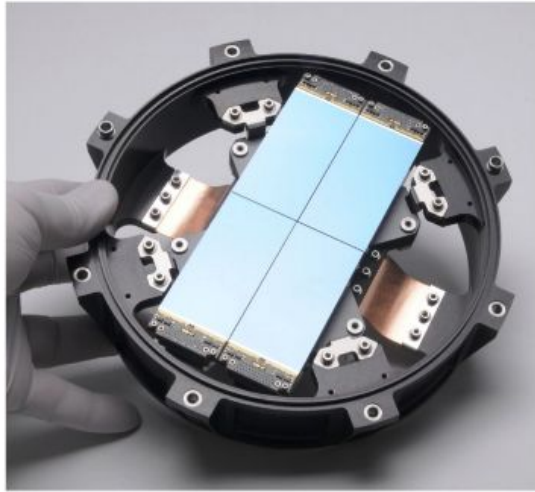


Parameter	Value
FOV	24° x 24°
FL, f/#	146 mm, f/1.4
EPD	105 mm
Wavelengths	600-1000 nm
CCD	2 x 2 detector arrays 4k x 4k pixels
Detector arrays	2048 x 2048 15 micron pixels
Transmittance	86.5% (with filter)
Mass	9.3 kg
Dimensions	17.0 cm diameter 21.1 cm long

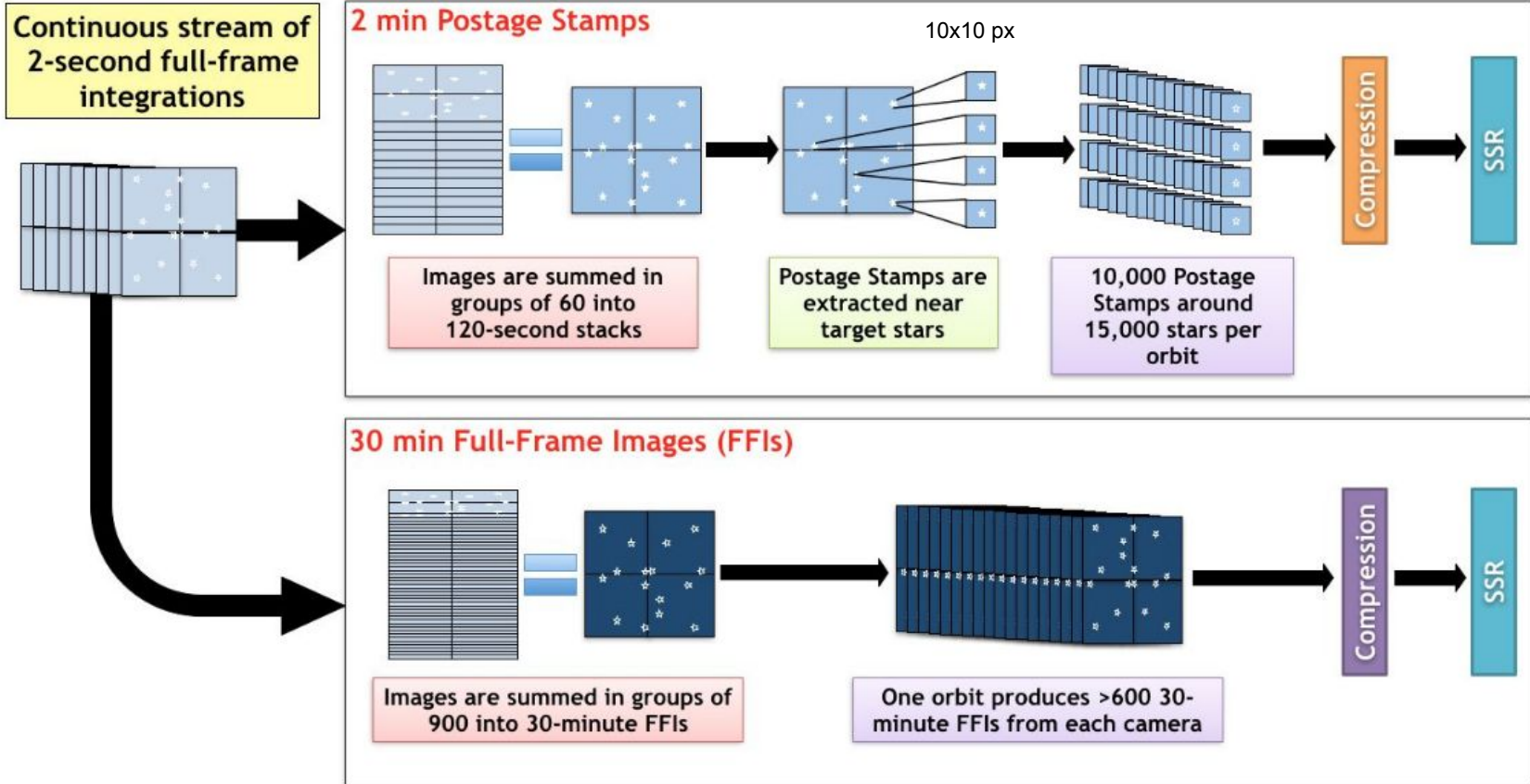
TESS - parametry



TESS - parametry

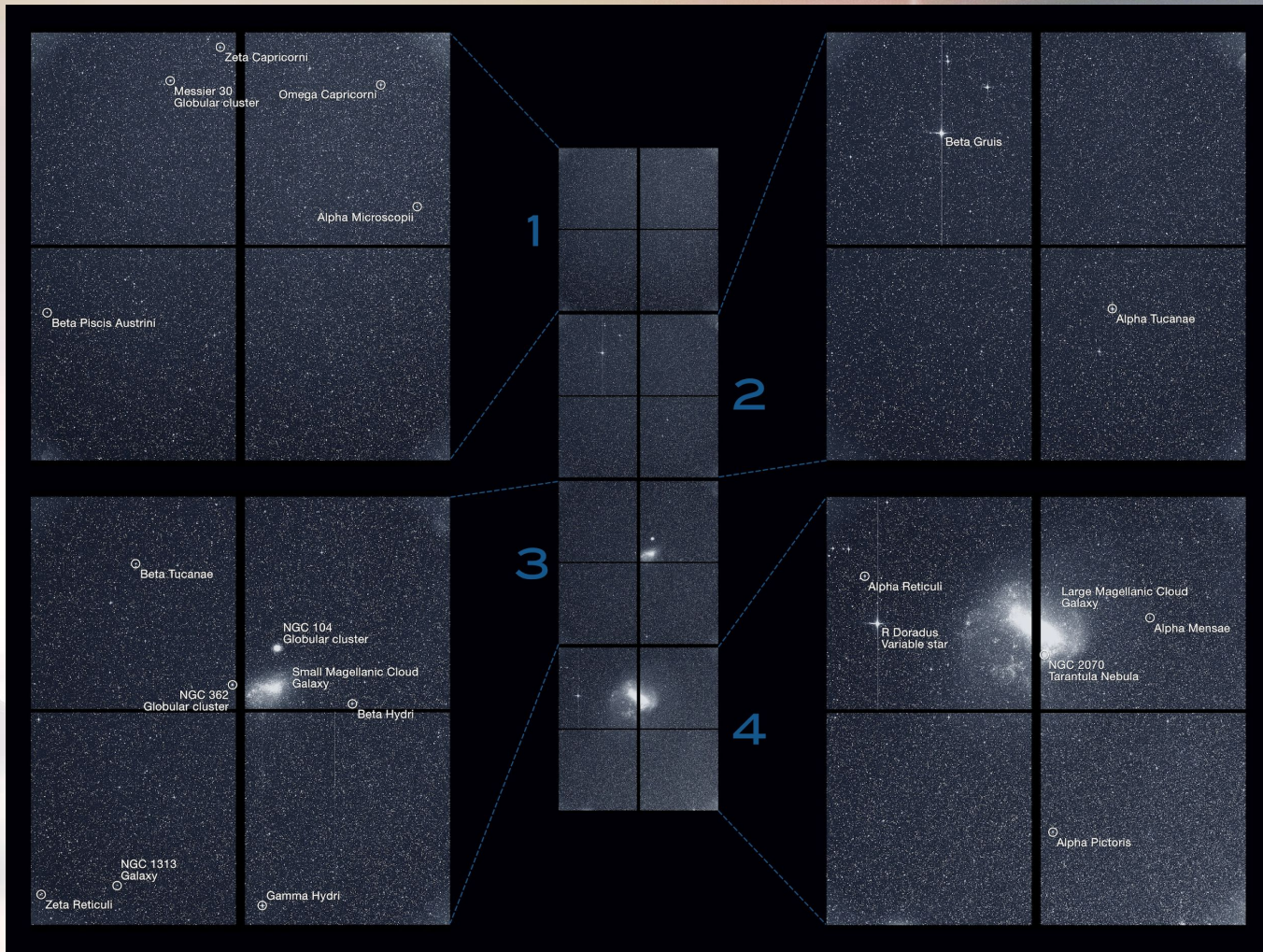


TESS - Zpracování dat

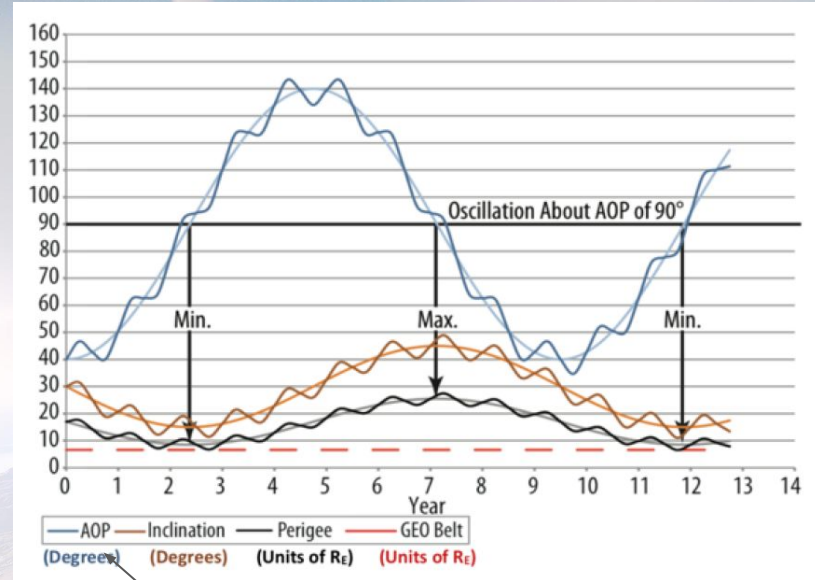
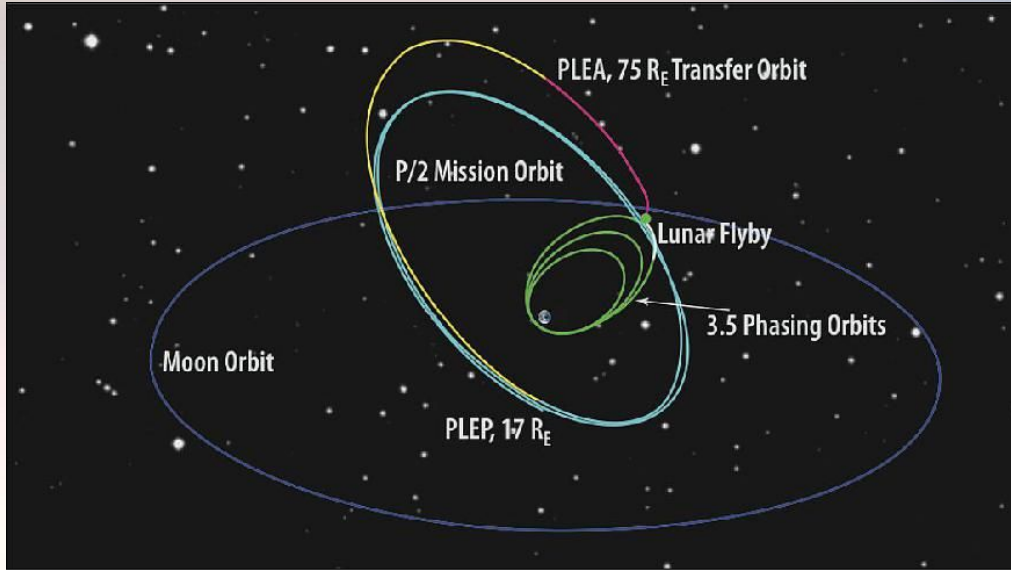


Stahování dat vždy v perigeu dráhy - díra v datech 4-16 hodin

Sektor 1



TESS - oběžná dráha



$P \sim 13.7$ d (2:1 rezonance s oběžnou dobou Měsíce)

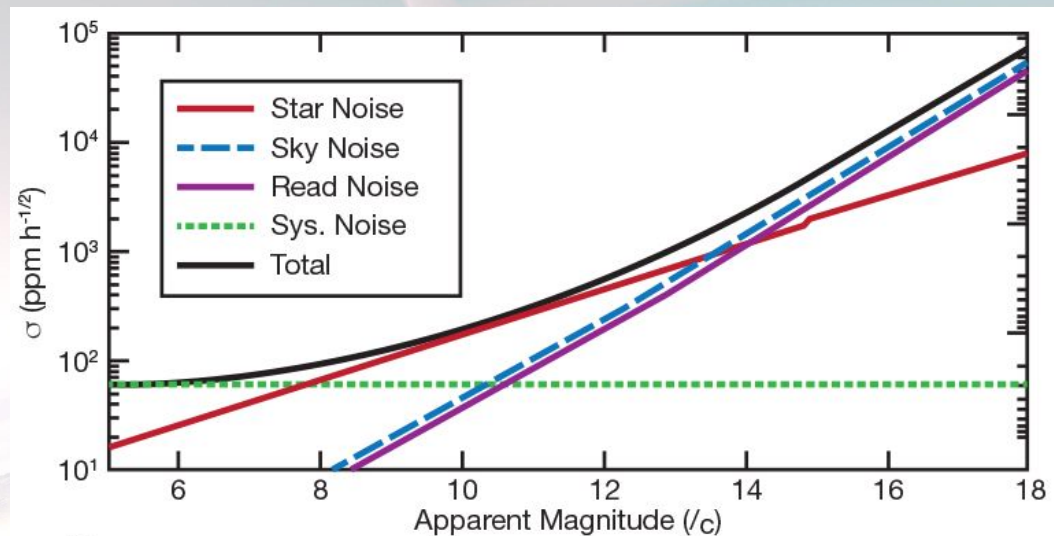
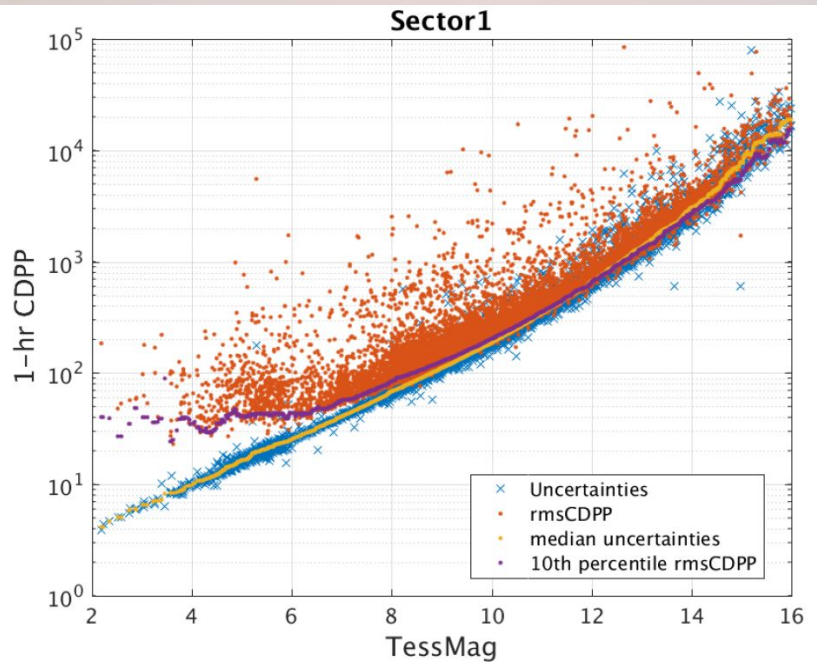
$i = 37^\circ$

Stabilní po desetiletí bez nutnosti úpravy dráhy

Nad Van Allenovými pásy - málo zásahů nabitými částicemi

Argument perigea

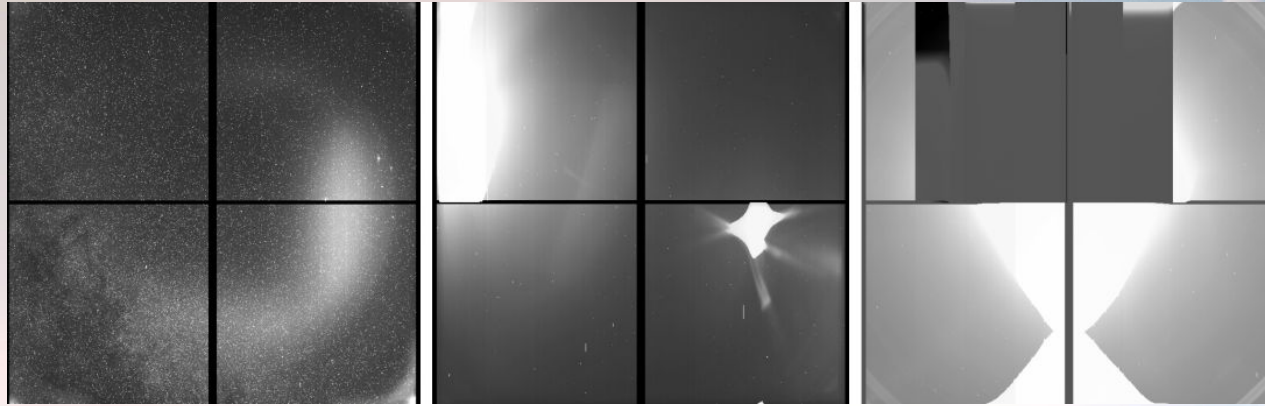
TESS - data



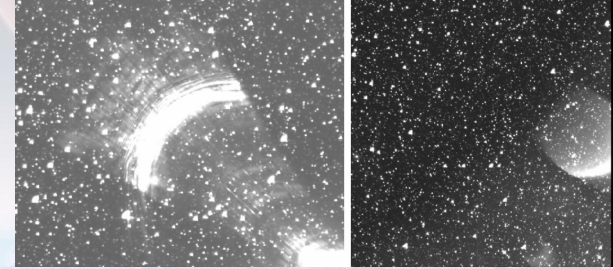
200 ppm for $I=10$ mag
10 000 ppm $I=16$ mag

TESS - data

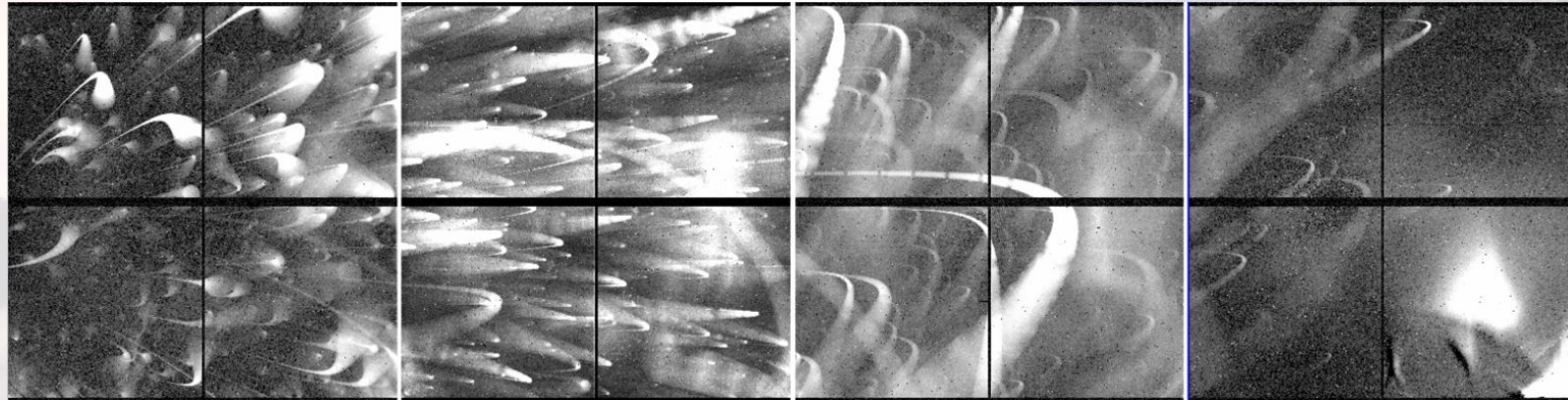
Rozptýlené světlo



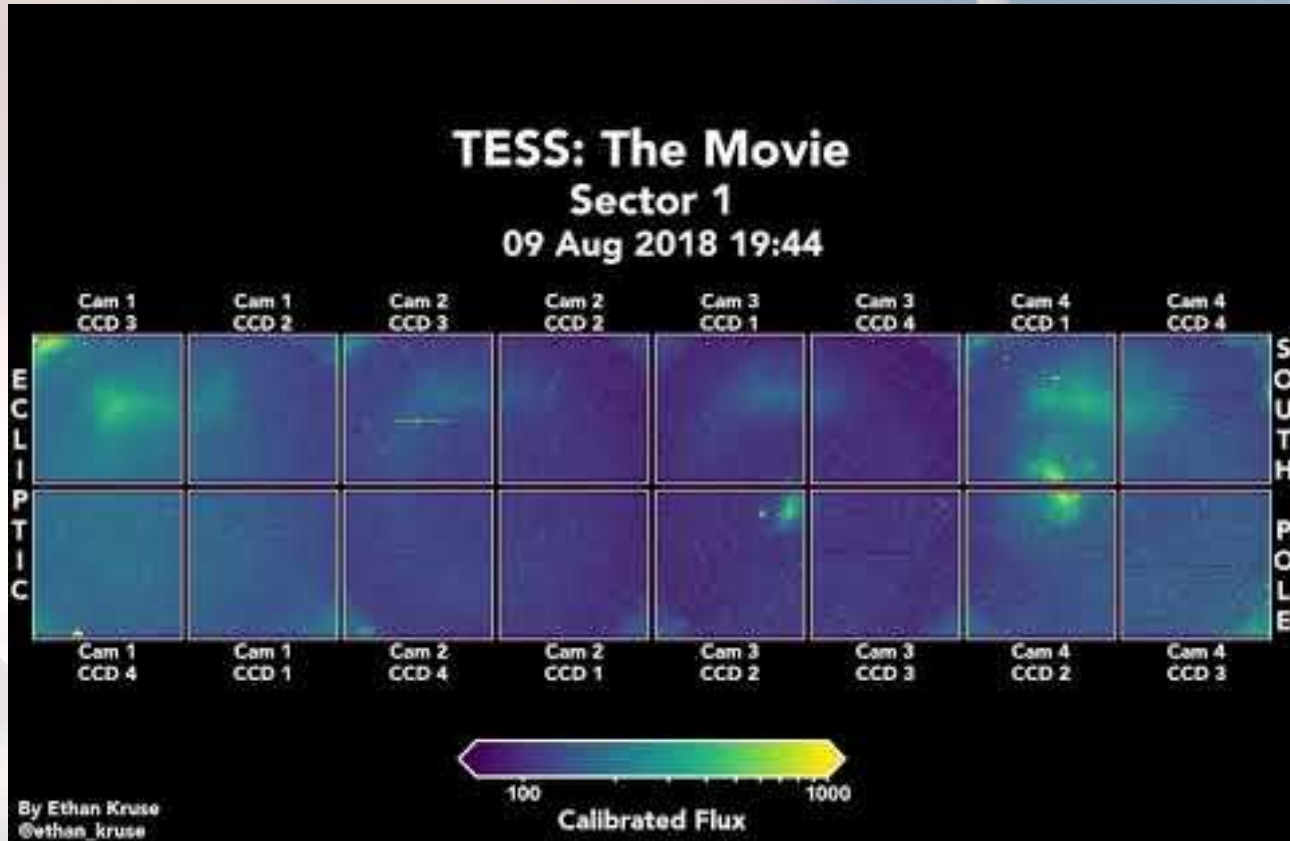
Příliš jasný objekt v blízkosti



Impakty
mikrometeoritů



TESS - data



TESS - data

<https://tess.mit.edu/>

Základní domovská stránka

<https://archive.stsci.edu/tess/index.html#documents>

<https://docs.lightkurve.org/>

<https://adina.feinste.in/eleanor/>

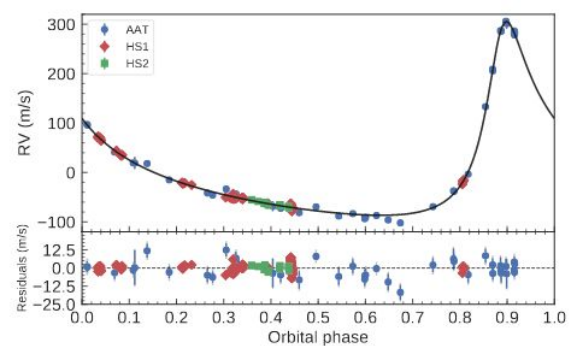
základní porál data

software pro download a zpracování dat

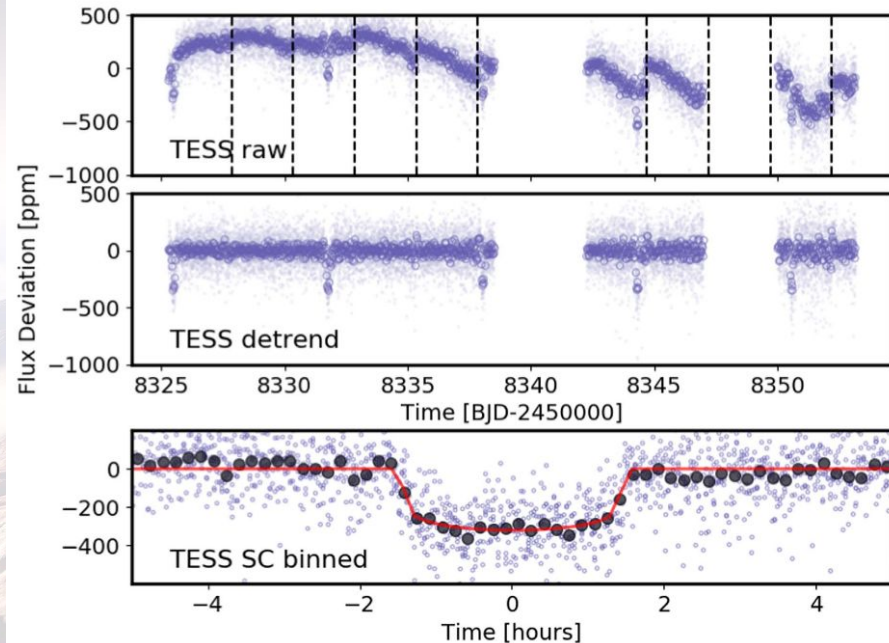
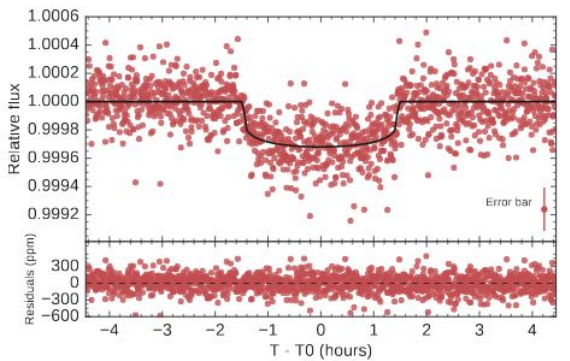
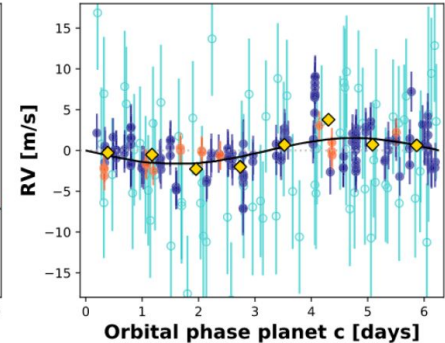
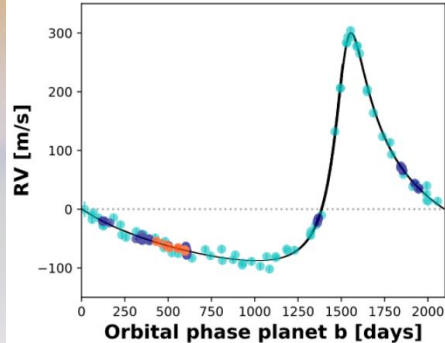
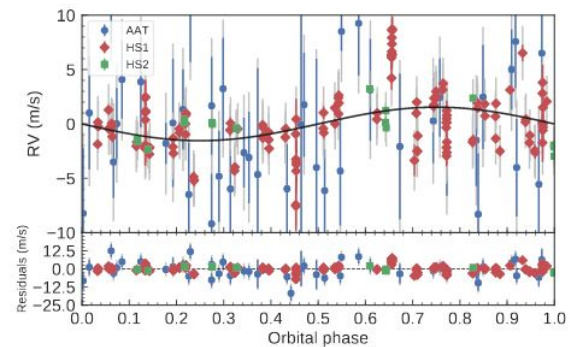
software pro download a zpracování dat

<https://heasarc.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/tess/webtess/wtv.py> pozorovatelnost cílů





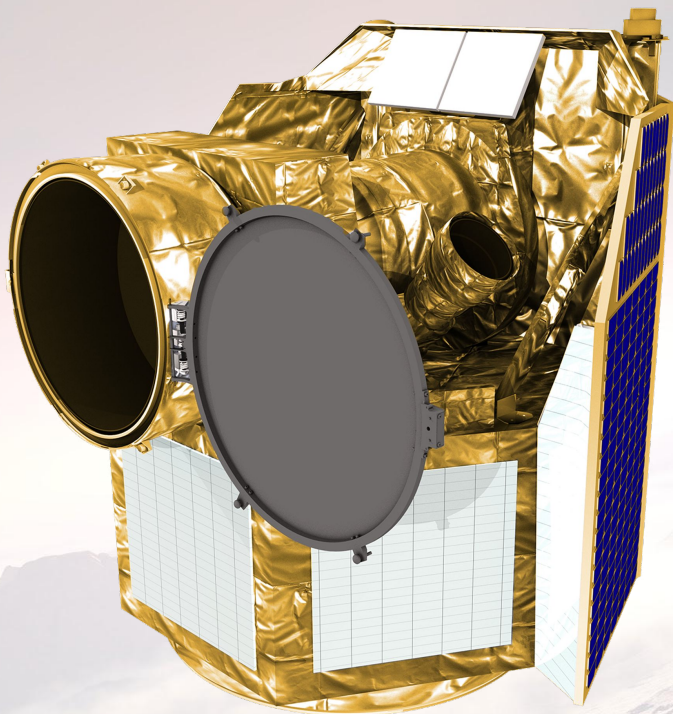
Gandolfi et al. (2018), A&A Letters, 619, 10; TESS's first planetA super-Earth transiting the naked-eye star π Mensae, 2018/09/20 – 2018/09/28



Huang et al. (2018), ApJL, 868, 39; TESS Discovery of a Transiting Super-Earth in the pi Mensae System, 2019/09/16 – 2018/11/30

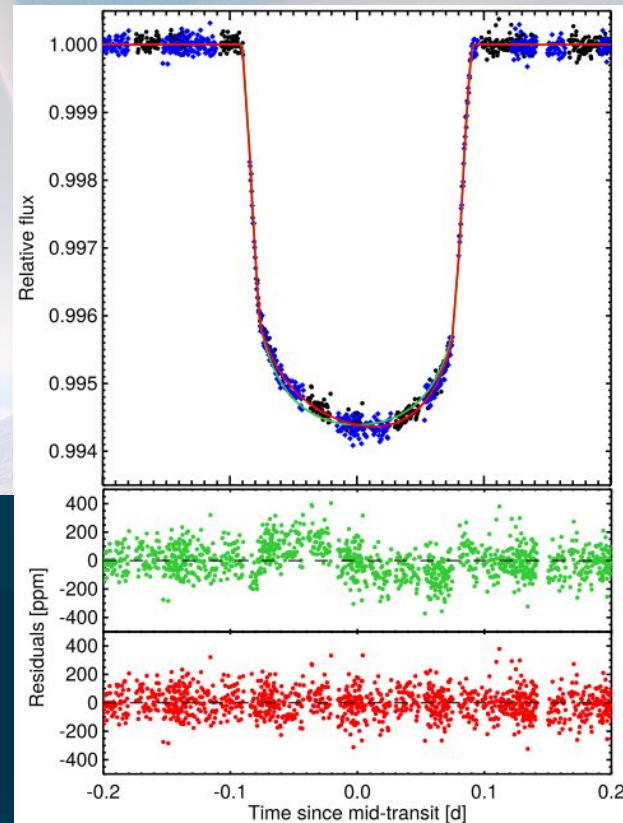
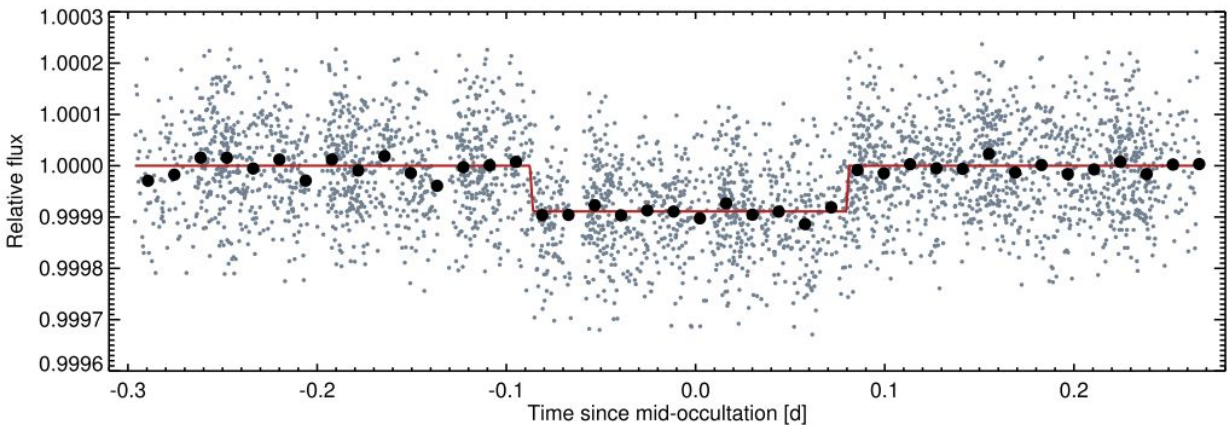
CHEOPS (CHaracterising ExOPlanet Satellite)

Start 18. Prosince 2019, ESA, Švýcarsko



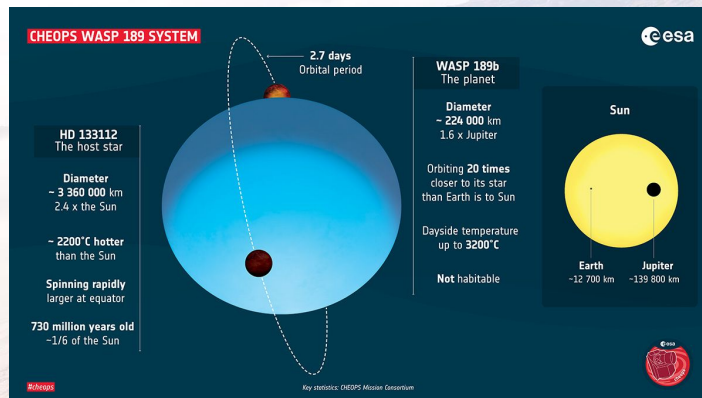
Provoz	duben 2020-
Úkoly	Poloměry exoplanet <10 %, kandidáti pro JWST a další, vztah poloměr-hmotnost
Dráha	Nízká geocentrická polární, 700 km
Strategie	Jednotlivé tranzity, ~48 hodin
Rozměry a váha	273 kg, 1.5x1.5x1.5 m
Optika	0.32m, f/8
Detektor	1kx1k CCD
Zorné pole	19'x19'
Kadence	různá
Přesnost na 9 mag	150 ppm při 1-minutové expozici
Rozlišení	1.1"/px
Objevených planet	-
Celkový počet objektů	-

CHEOPS (CHaracterising ExOPlanet Satellite)

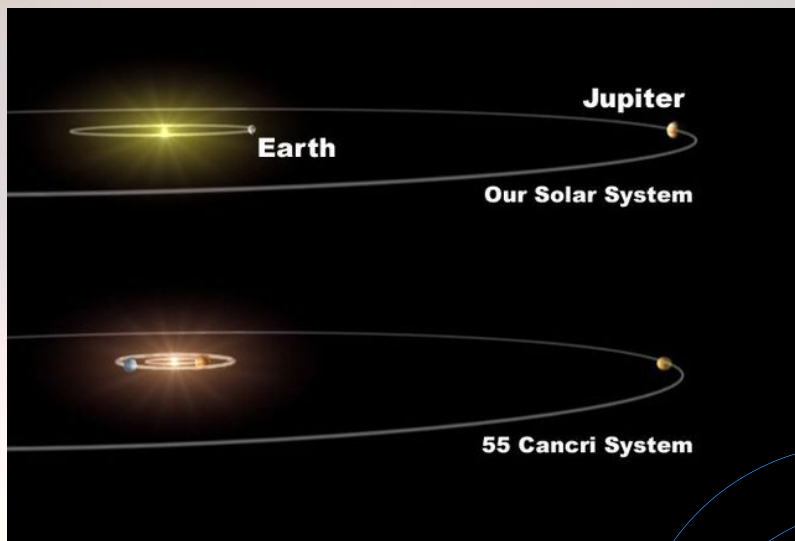


4 tranzity březem-duben 2020, okultace
WASP-189 b na skloněné dráze

Lendl et al. 2020, A&A, 643, 94

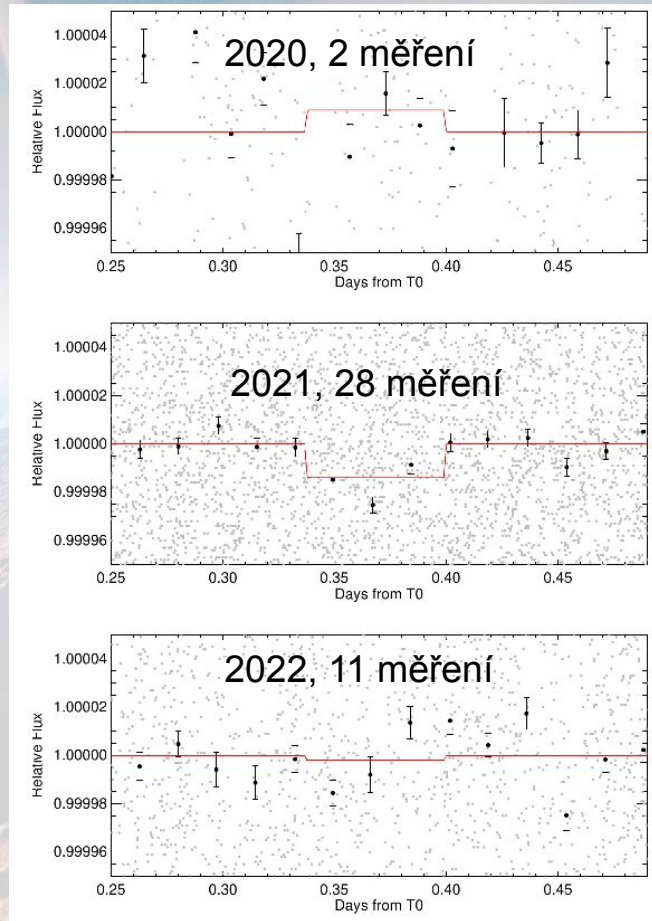
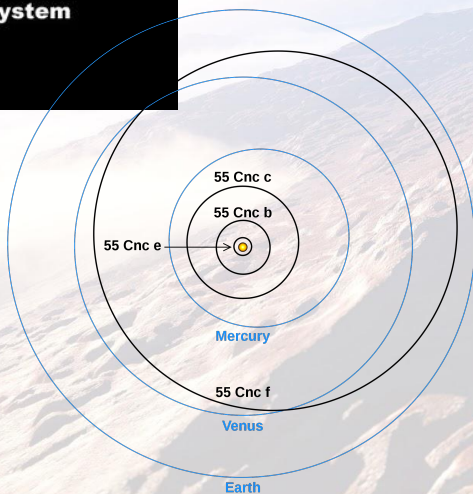


CHEOPS (CHaracterising ExOPlanet Satellite)



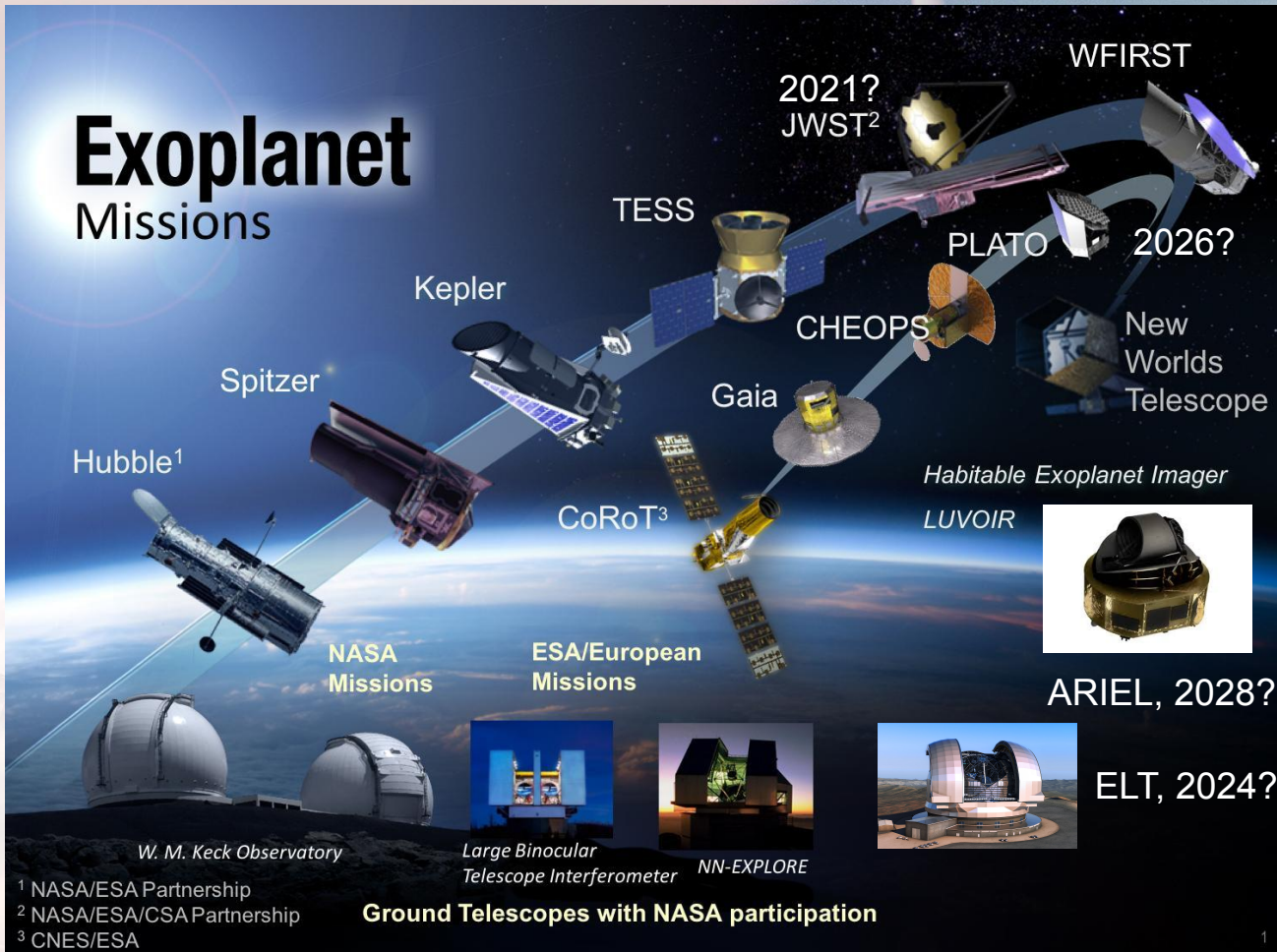
Okultace 55 Cnc e (41 okultací, 12 ± 3 ppm)

Demory et al. 2022, arXiv:2211.03582



Budoucnost

Exoplanet Missions



¹ NASA/ESA Partnership

² NASA/ESA/CSA Partnership

³ CNES/ESA

Ground Telescopes with NASA participation

Pozemní vs vesmírné

	Pozemní	Vesmírné
Výtěžnost	Nízká (stovky planet)	Vysoká (tisíce planet)
přesnost	~mmag	~100 μ mag
Jasnost	<~13 mag	<~16 mag
Typ planet	Horcí Jupiteri - Neptuni	všechny
Periody	< 5 d	Doba pozorování / 2
Cena	<~miliony USD	>~ miliardy USD
Náročnost technická	nízká	extrémní
Náročnost zpracování	střední	extrémní
Doba přípravy	měsíce-roky	roky-desetiletí
Údržba	snadná	Většinou nemožná

Exoplanet Transit Database



<http://var2.astro.cz/>

ETD

Databáze 518 exoplanet, efemeridy,
plánování měření

TRESCA

fitování tranzitů, O-C, změny
poloměru, geometrie (impact
parametr)

