

F7514 Exoplanety

Marek Skarka

Astronomický ústav Akademie věd České republiky, Ondřejov
Ústav teoretické fyziky a astrofyziky, Masarykova univerzita, Brno

Základní přehled

F7514 Exoplanety

- Cílem předmětu je podat obecný přehled o exoplanetách, metodách a prostředcích k jejich výzkumu
- Ukončení zk (10 otázek bez přípravy, 30 minut), 2 kredity
- Přednášky živě + online, pátek 14:00-15:30 hodin
- **Co byste měli (bylo by vhodné) znát:**
 - Principy spektroskopie, fotometrie, odhad chyb
 - Stavba a vývoj hvězd, HRD, fázová křivka a světelné elementy, nebeská mechanika
 - F3170, F4200, F3080, F4190, F5540

Základní přehled

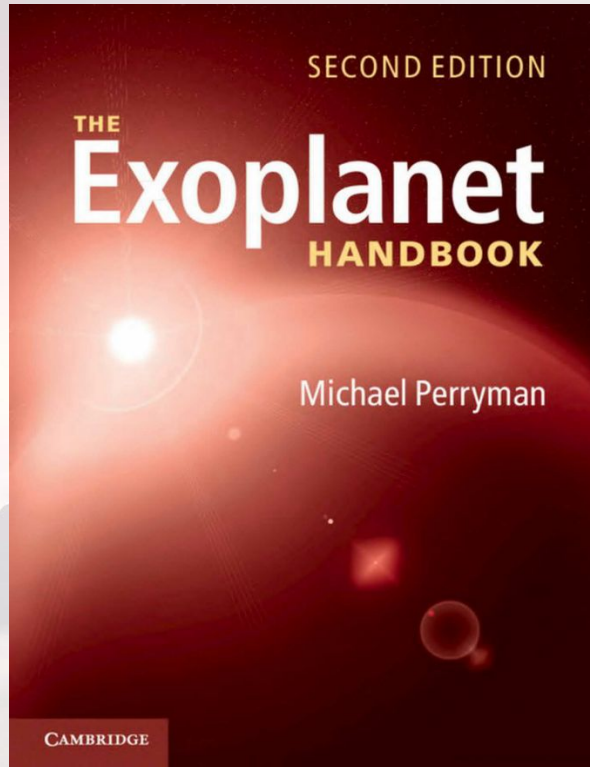
F7514 Exoplanety

Co nás (vás) čeká:

- 1) 16.9. Definice exoplanety, taxonomie, historie výzkumu, obecný přehled
- 2) 23.9. Vznik planetárních soustav, Sluneční soustava
- 3) 30.9. Popis dráhy exoplanety, Dopplerův jev
- 4) 7.10. Spektroskopie a měření radiálních rychlostí
- 5) 14.10. Tranzitní metoda – principy
- 6) 21.10. Tranzitní metoda - pozorování
- 7) 28.10. -
- 8) 4.11. Další metody detekce exoplanet
- 9) 11.11. Vlastnosti exoplanet a jejich atmosfér
- 10) 18.11. -
- 11) 25.11. -
- 12) 2.12. Vlastnosti mateřských hvězd
- 13) 9.12. Astrobiologie a hledání života ve Vesmíru
- 14) 16.12. Předtermín?
- 15) 23.12. Předtermín?

Zdroje – literatura

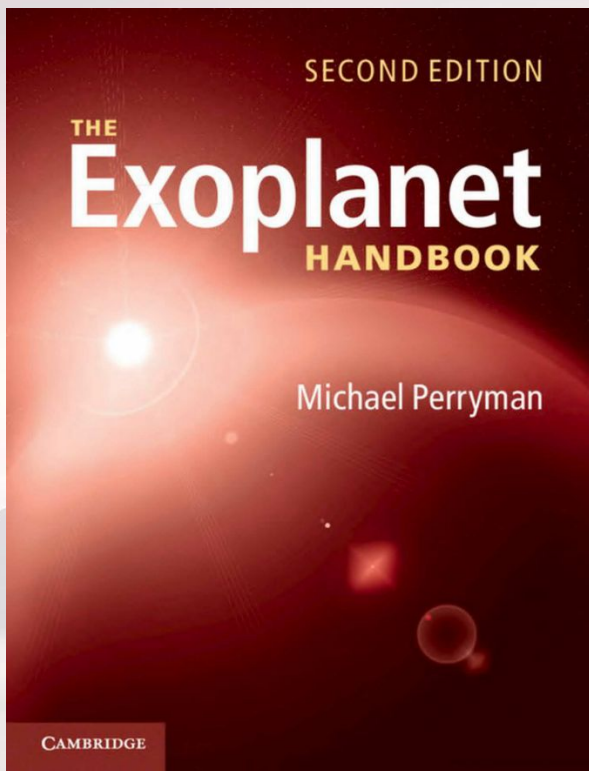
PERRYMAN, M. A. C. The exoplanet handbook. Second edition. Cambridge: Cambridge University Press, 2018
ISBN 9781108419772



- 1) Introduction
- 2) Radial velocities
- 3) Astrometry
- 4) Timing
- 5) Microlensing
- 6) Transits
- 7) Imaging
- 8) Host stars
- 9) Brown dwarfs and free-floating planets
- 10) Formation and evolution
- 11) Interiors and atmospheres
- 12) The Solar system

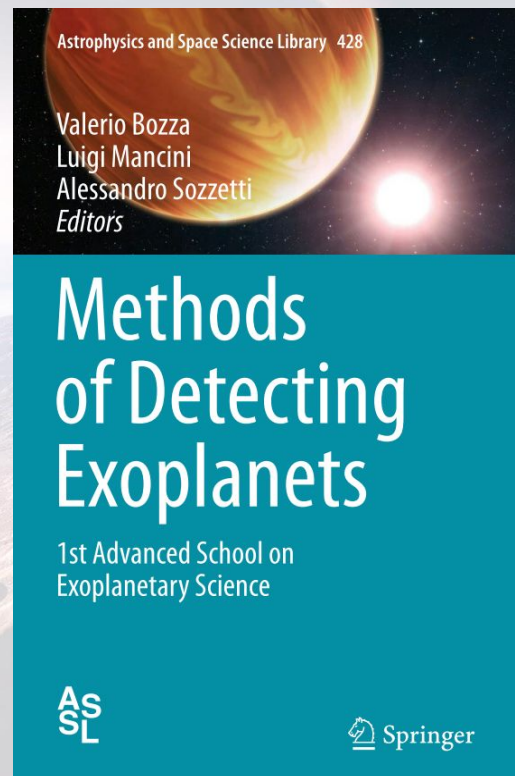
Zdroje – literatura

PERRYMAN, M. A. C. The exoplanet handbook. Second edition. Cambridge: Cambridge University Press, 2018
ISBN 9781108419772



- 1) Introduction
- 2) Radial velocities
- 3) Astrometry
- 4) Timing
- 5) Microlensing
- 6) Transits
- 7) Imaging
- 8) Host stars
- 9) Brown dwarfs and free-floating planets
- 10) Formation and evolution
- 11) Interiors and atmospheres
- 12) The Solar system

BOZZA, Valerio, Luigi MANCINI a Alessandro SOZZETTI. Methods of Detecting Exoplanets. 2016
ISBN 978-3-319-27456-0



- 1) The radial velocity method
- 2) The transit method
- 3) The microlensing method
- 4) The direct imaging method

Zdroje – literatura

Databáze:

<https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>

<https://exoplanets.nasa.gov/>

<http://exoplanets.org/>

<http://exoplanet.eu/>

https://exofop.ipac.caltech.edu/tess/view_toi.php

phl.upr.edu/hec

Důraz na Kepler, TESS, Kelt; velmi široká databáze

Vizuálně dobře zpracovaná, PR

Zastaralá

Velmi široká databáze

Exoplanety z TESS

Exoplanety v obyvatelných zónách

Data:

<https://archive.stsci.edu>

Applety:

<https://astro.unl.edu/nativeapps/>

Novinky:

<http://nccr-planets.ch/>

<https://www.exoplanety.cz/>

Články:

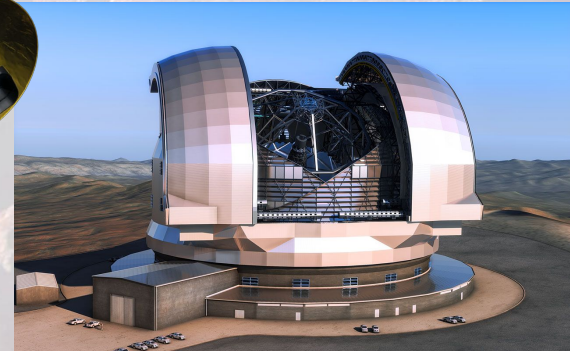
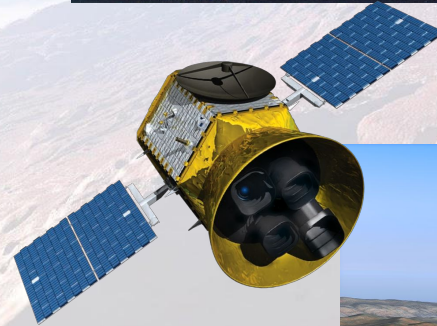
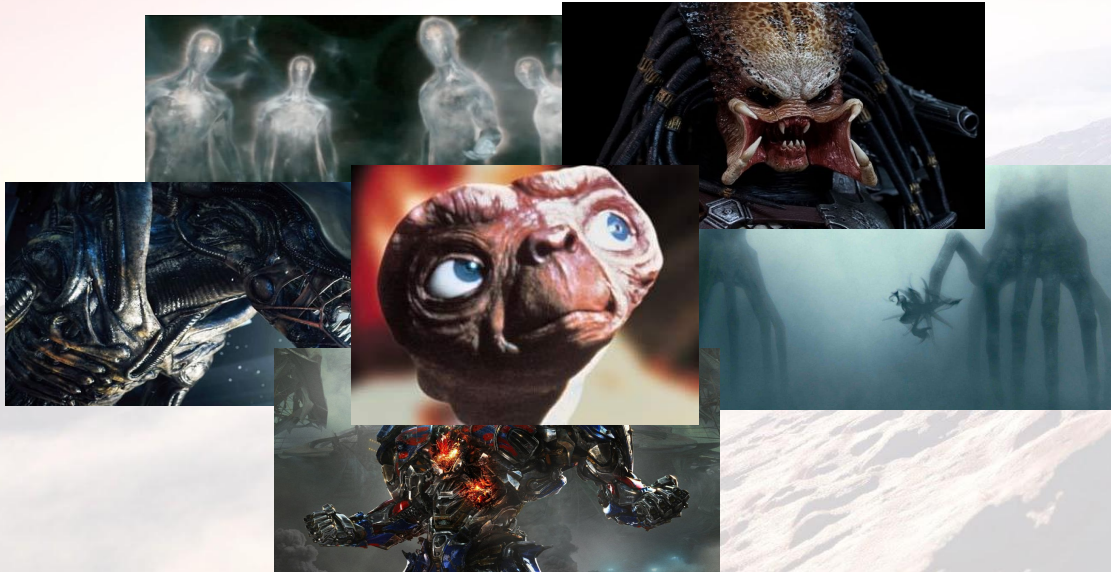
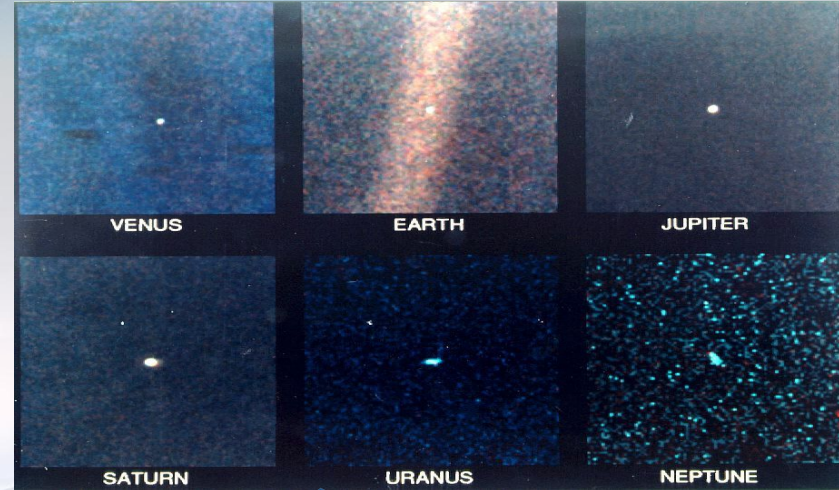
<https://arxiv.org/>

<https://ui.adsabs.harvard.edu/>

Skripta zatím nejsou k
dispozici

Motivace

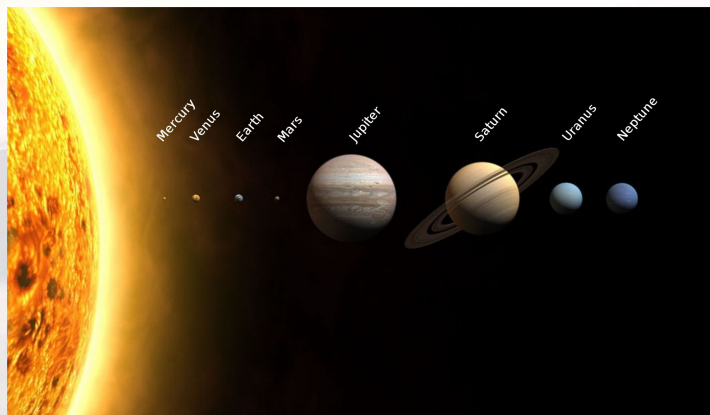
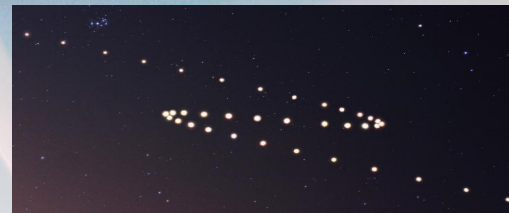
- Jsme ve Vesmíru sami? Jaké je naše místo ve Vesmíru?
- Jak vypadají exoplanety? Kolik jich ve Vesmíru je?
- Jak planetární systémy vznikají a jak se vyvíjejí?
- Je naše Sluneční soustava unikátní?
- Technický pokrok v přístrojích, zpracování a analýze dat
- Spojení mnoha disciplín nejen (stelární) astronomie
- Výzkum na hranicích možností



Definice exoplanety

Planeta Sluneční soustavy

Z řeckého 'planétes' = tulák



Planeta	Vzdálenost od Slunce [au]	Poloměr [R_Z]	Hmotnost [M_Z]	Doba oběhu [rok]	Hustota [kg/m^3]
Merkur	0.4	0.4	0.06	0.24	5.4
Venuše	0.7	0.9	0.82	0.62	5.2
Země	1.0	1.0	1.0	1.0	5.5
Mars	1.5	0.5	0.11	1.88	3.9
Jupiter	5.2	11.2	317.8	11.9	1.3
Saturn	9.5	9.3	95.2	29.5	0.7
Uran	19.2	4.0	14.5	84.0	1.3
Neptun	30.1	3.9	17.2	164.8	1.8

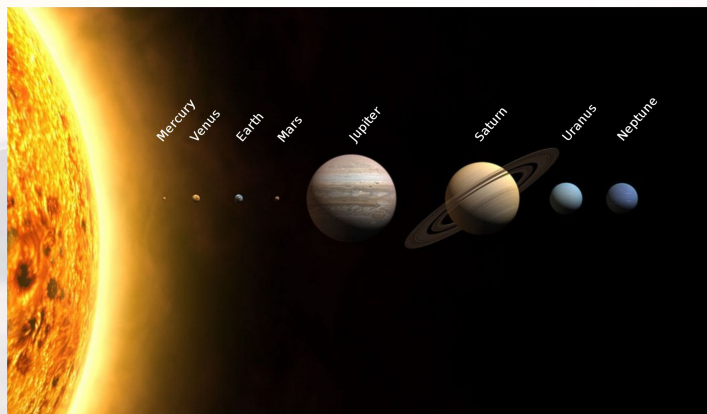
Definice exoplanety

Planeta Sluneční soustavy

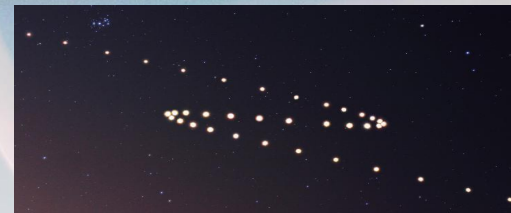
(IAU rezoluce B5, 2006):

Nebeské těleso, které:

- Obíhá okolo Slunce
- Má dostatečnou hmotnost, aby vlivem vlastní gravitace překonalo síly tuhého tělesa a mělo tak ve stavu hydrostatické rovnováhy přibližně kulový tvar
- Vyčistilo okolí své dráhy
- ! neříká nic o horní hmotnosti těles!



Z řeckého 'planétes' = tulák



Planeta	Vzdálenost od Slunce [au]	Poloměr [R_Z]	Hmotnost [M_Z]	Doba oběhu [rok]	Hustota [kg/m^3]
Merkur	0.4	0.4	0.06	0.24	5.4
Venuše	0.7	0.9	0.82	0.62	5.2
Země	1.0	1.0	1.0	1.0	5.5
Mars	1.5	0.5	0.11	1.88	3.9
Jupiter	5.2	11.2	317.8	11.9	1.3
Saturn	9.5	9.3	95.2	29.5	0.7
Uran	19.2	4.0	14.5	84.0	1.3
Neptun	30.1	3.9	17.2	164.8	1.8

Definice exoplanety

Doporučené definice IAU z roku 2003:

Planeta je těleso s hmotností pod hranicí, kdy je schopno fúzovat deuterium (cca $13 M_J \sim 13 \times 0.01 M_S$), které obíhá hvězdu nebo hvězdný zbytek. Minimální hmotnost je stejná jako pro planetu sluneční soustavy

Hnědý trpaslík (brown dwarf, BD) je těleso s hmotností nad $13 M_J$, které ale nemá dostatečnou hmotnost k fúzi vodíku. Nezáleží přitom jak těleso vzniklo.

Hnědý podtrpaslík (sub-brown dwarf) je těleso volně se pohybující prostorem planetárních hmotností (planetární nomád)



Definice exoplanety

Doporučené definice IAU z roku 2003:

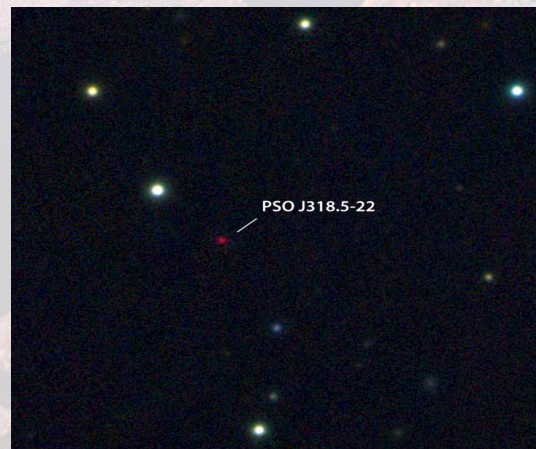
OBECNĚ PŘIJÍMANÁ DEFINICE

Planeta je těleso s hmotností pod hranicí, kdy je schopno fúzovat deuterium (cca $13 M_J \sim 13 \times 0.01 M_S$), které obíhá hvězdu nebo hvězdný zbytek. Minimální hmotnost je stejná jako pro planetu sluneční soustavy

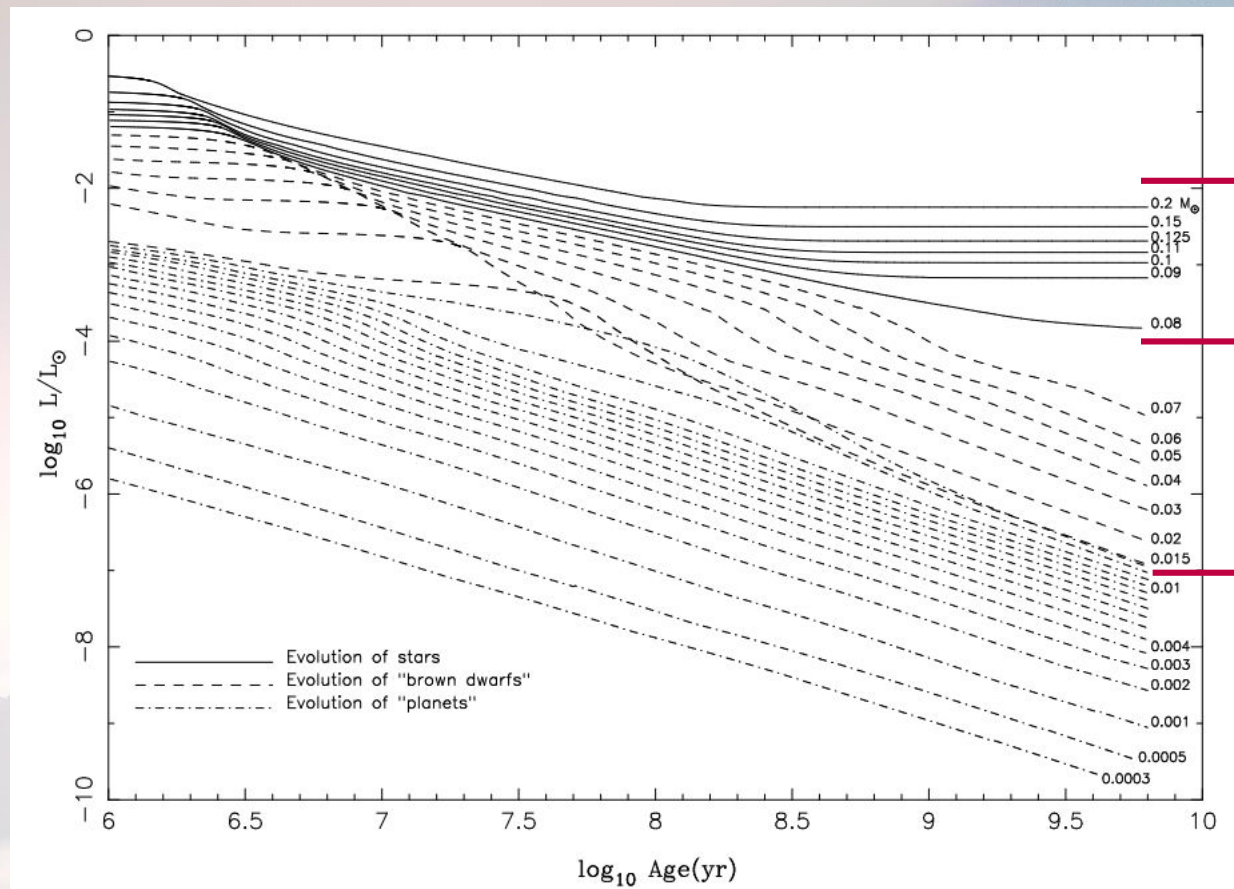
Hnědý trpaslík (brown dwarf, BD) je těleso s hmotností nad $13 M_J$, které ale nemá dostatečnou hmotnost k fúzi vodíku. Nezáleží přitom jak těleso vzniklo.

Hnědý podtrpaslík (sub-brown dwarf) je těleso volně se pohybující prostorem planetárních hmotností (planetární nomád)

STÁLE NENÍ ZCELA JASNĚ DEFINOVANÝ PŘECHOD
MEZI PLANETAMI A HNĚDÝMI TRPASLÍKY



Definice exoplanety



hvězdy

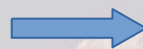
- vznik kolapsem mezihvězdného mračna

hnědí trpaslíci

- vznik kolapsem mezihvězdného mračna
- nad 65 M_J fúzíjí Li

planety

- vznik v protoplanetárním disku

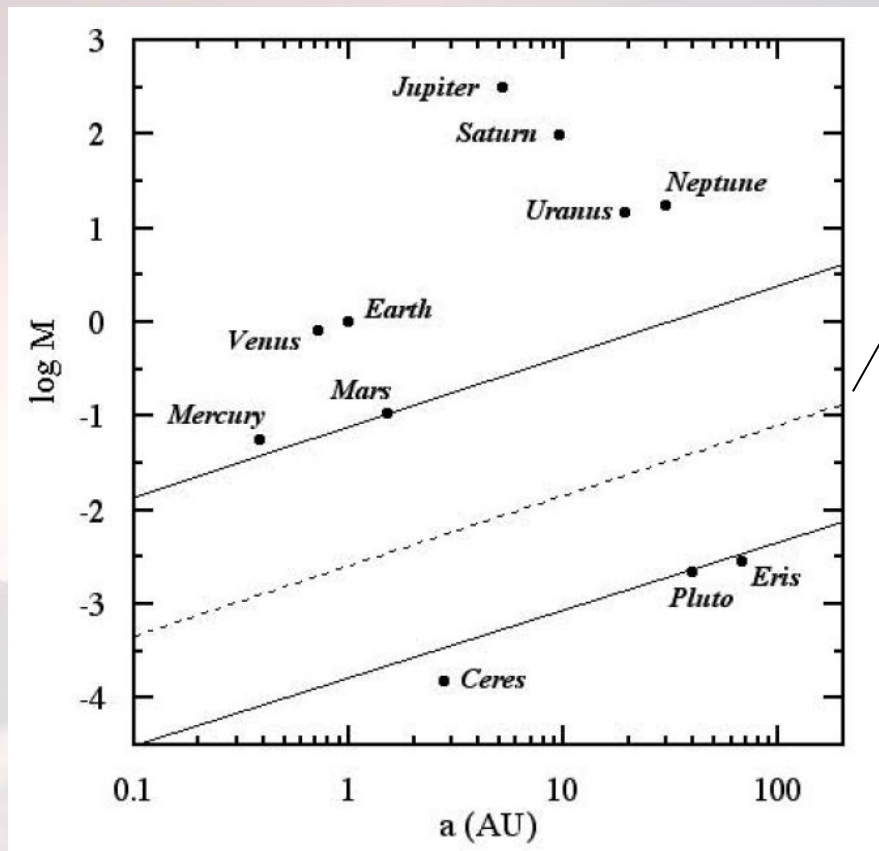


Alternativní definice planet
na základě způsobu jejich
vzniku

Definice exoplanety – alternativy

Soter, S. 2006, AJ, 132, 2513:

Planeta je výsledný produkt akrece v disku okolo hvězdy nebo BD (tělesa s $M < 20\text{-}30 M_J$)



Nad touto linií je těleso schopno vyčistit okolí své dráhy ($\Lambda > 1$).

$$\Lambda = kM^2 / P$$

hmotnost planety
v M_Z

perioda
oběhu v rocích

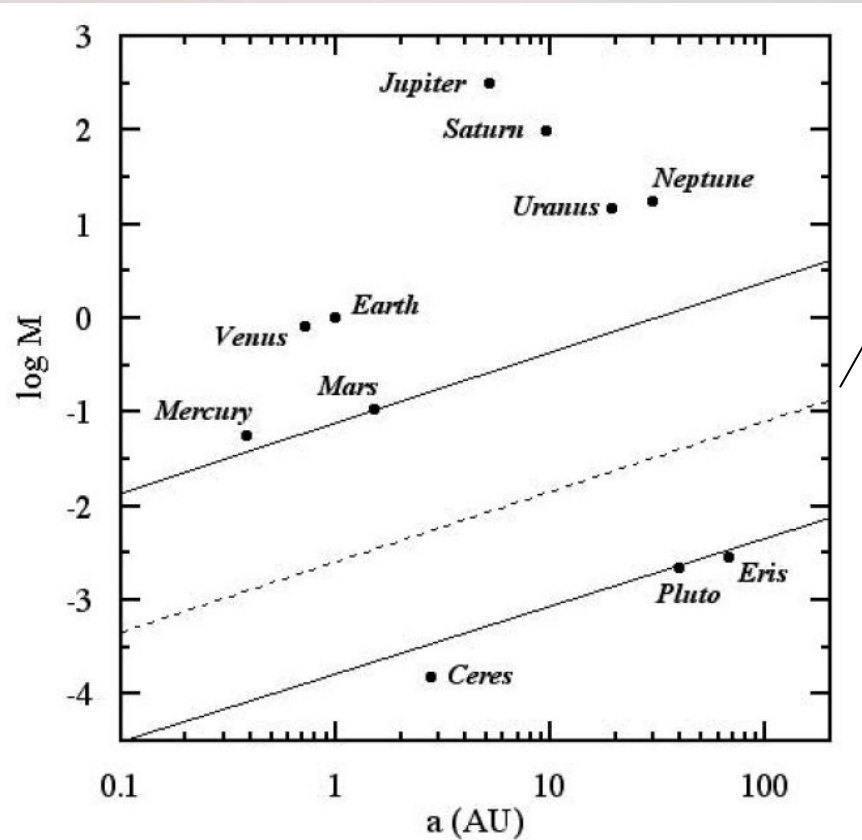
PLANETARY DISCRIMINANTS

Body	Mass (M_E)	Λ	μ
Mercury.....	0.055	1.9×10^3	9.1×10^4
Venus.....	0.815	1.7×10^5	1.35×10^6
Earth.....	1.000	1.5×10^5	1.7×10^6
Mars.....	0.107	9.3×10^2	5.1×10^3
Ceres.....	0.00015	0.0013	0.33
Jupiter.....	317.7	1.3×10^9	6.25×10^5
Saturn.....	95.2	4.7×10^7	1.9×10^5
Uranus.....	14.5	3.8×10^5	2.9×10^4
Neptune.....	17.1	2.7×10^5	2.4×10^4
Pluto.....	0.0022	0.003	0.07
Eris.....	0.0028	0.002	0.10

Definice exoplanety – alternativy

Soter, S. 2006, AJ, 132, 2513:

Planeta je výsledný produkt akrece v disku okolo hvězdy nebo BD (tělesa s $M < 20\text{-}30 M_J$)



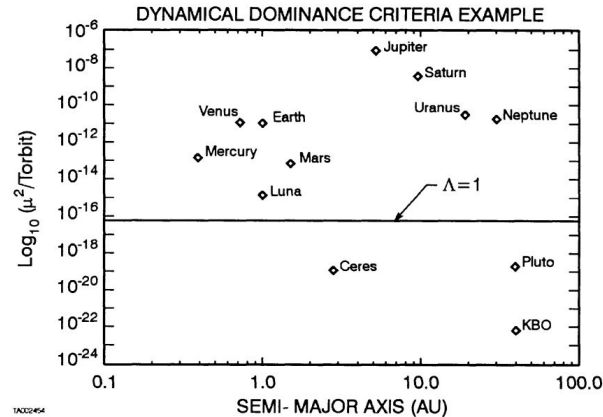
Nad touto linií je těleso schopno vyčistit okolí své dráhy ($\Lambda > 1$).

$$\Lambda = kM^2 / P$$

hmotnost planety v M_Z perioda oběhu v rocích

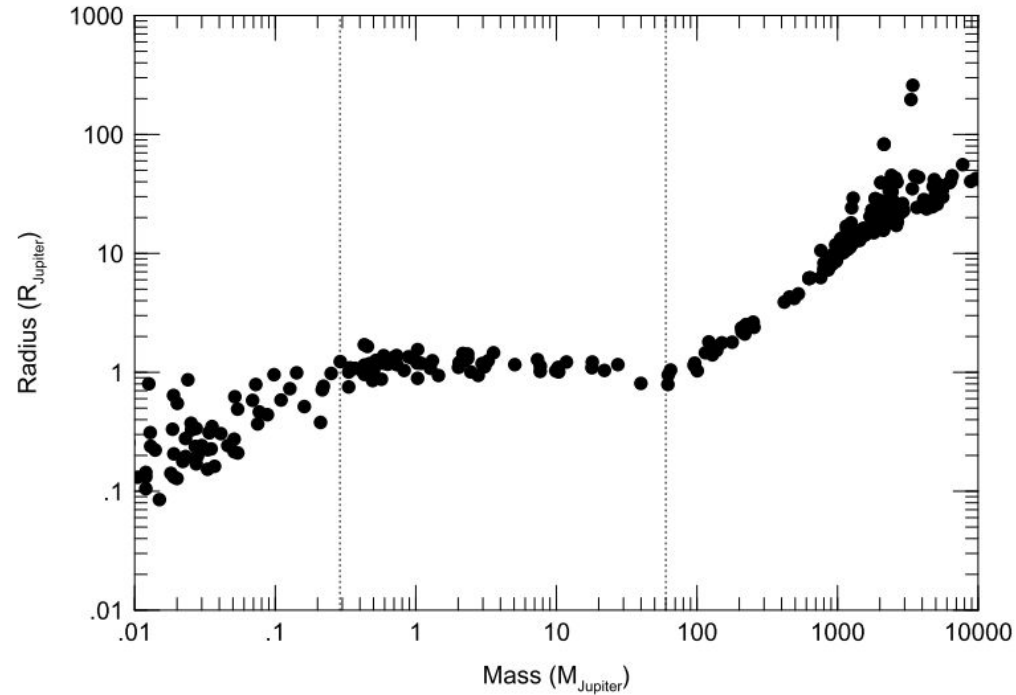
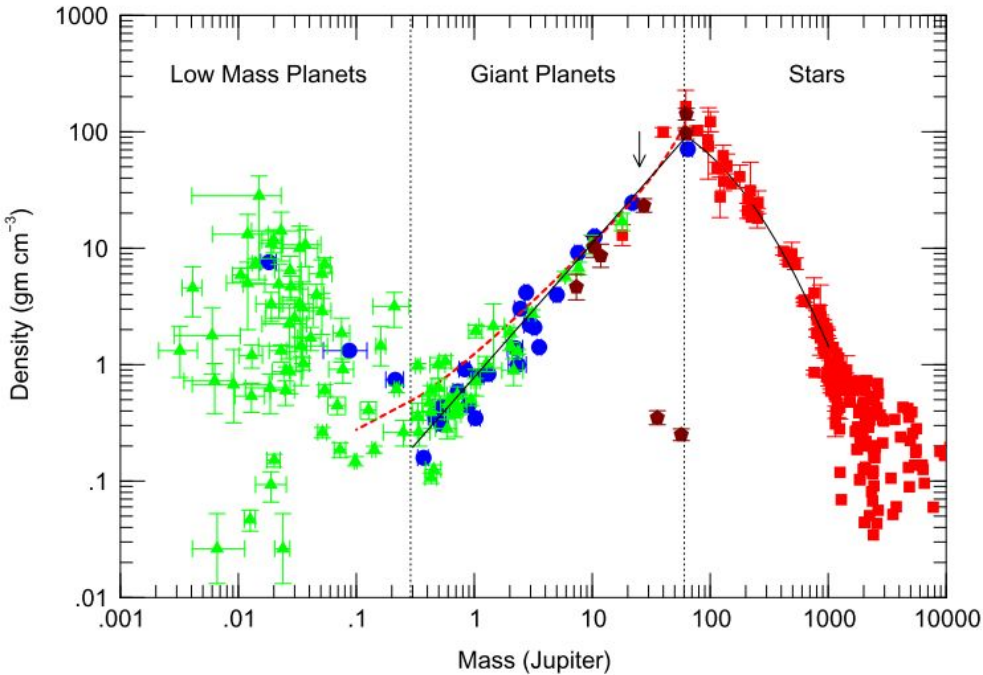
PLANETARY DISCRIMINANTS

Body	Mass (M_E)	Λ	μ
Mercury.....	0.055	1.9×10^3	9.1×10^4
Venus.....	0.815	1.7×10^5	1.35×10^6
Earth.....	1.000	1.5×10^5	1.7×10^6
Mars.....	0.107	9.3×10^2	5.1×10^3
.....	0.00015	0.0013	0.33
.....	317.7	1.3×10^9	6.25×10^5
.....	95.2	4.7×10^7	1.9×10^5
.....	14.5	3.8×10^5	2.9×10^4
.....	17.1	2.7×10^5	2.4×10^4
.....	0.0022	0.003	0.07
.....	0.0028	0.002	0.10



Definice exoplanety – alternativy

Hatzes&Rauer 2015, ApJ, 810, 25



Hranice mezi planetami a BDs $\sim 60 M_J$,
 $M_p < 0.3 M_J$ – málo hmotné planety
 $0.3 < M_p < 60 M_J$ – obří planety

Taxonomie a značení exoplanet

Kategorie:

Terestrické (Země), $R_p < 1.25 R_Z$

Super-Země, $R_p \sim 1.25 - 2.0 R_Z$ ($< 4 R_Z$)

Neptuni, $R_p \sim 2.0 - 6.0 R_Z$

Jupiteři, $R_p \sim 6.0 - 15.0 R_Z$

Sub-Země, $M_p \sim 10^{-8} - 0.1 M_Z$

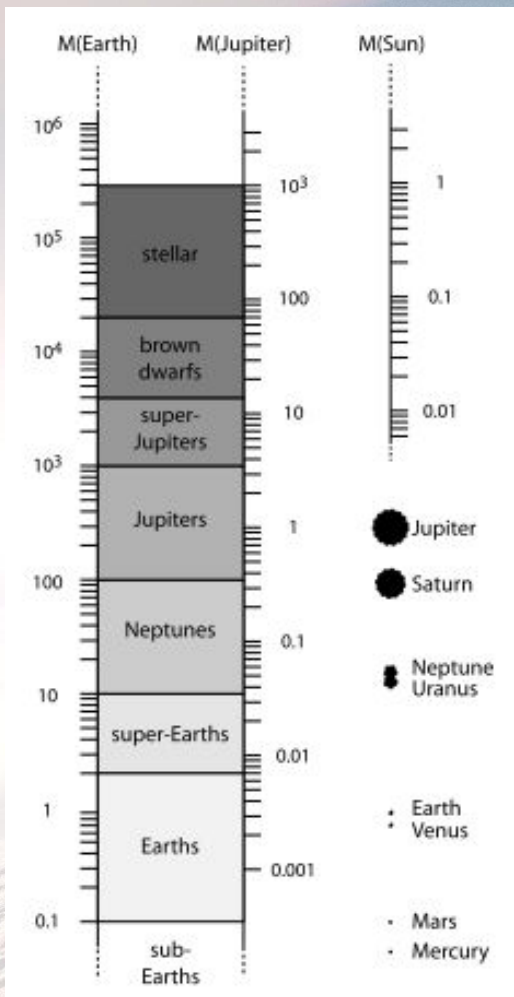
Země, $M_p \sim 0.1 - 2.0 M_Z$

Super-Země, $M_p \sim 2.0 - 10.0 M_Z$

Neptuni, $M_p \sim 10 - 100 M_Z$

Jupiteři, $M_p \sim 100 - 1000 M_Z$

Super-Jupiteři, $M_p \sim 1000 M_Z - 13 M_J$



Taxonomie a značení exoplanet

Kategorie:

Terestrické (Země), $R_p < 1.25 R_Z$

Super-Země, $R_p \sim 1.25-2.0 R_Z$ ($< 4 R_Z$)

Neptuni, $R_p \sim 2.0-6.0 R_Z$

Jupiteři, $R_p \sim 6.0-15.0 R_Z$

Sub-Země, $M_p \sim 10^{-8}-0.1 M_Z$

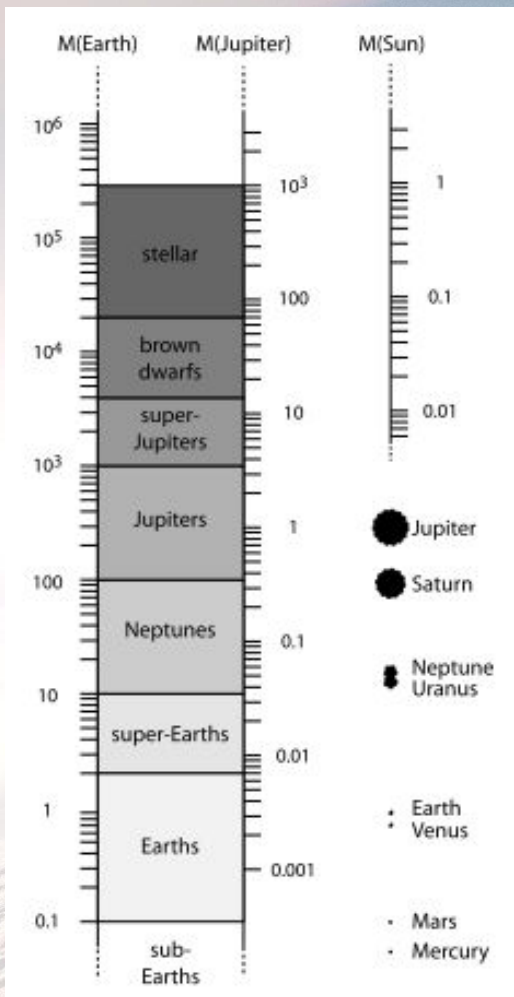
Země, $M_p \sim 0.1-2.0 M_Z$

Super-Země, $M_p \sim 2.0-10.0 M_Z$

Neptuni, $M_p \sim 10-100 M_Z$

Jupiteři, $M_p \sim 100-1000 M_Z$

Super-Jupiteři, $M_p \sim 1000 M_Z-13 M_J$



Obří planety (gas giants) - Jupiteři
- obsah H a He $> 50\%$

Ledoví obří – (Icy giants) - Neptuni
- obsah $\text{H}_2\text{O} > 50\%$

Horcí Jupiteři (Hot Jupiters)
- $P_{\text{orb}} < 9$ dní, velké poloosy
 $a < 0.1$ au

- velmi horcí Jupiteři (very hot Jupiters, $P_{\text{orb}} < 3$ dny)
- ultra horcí Jupiteři

(ultra-short-period hot Jupiters, $P_{\text{orb}} < 1$ den, pouze u hvězd s $M_* < 1.25 M_S$)

Teplí Jupiteři (warm Jupiters)
- $P_{\text{orb}} < 10$ dní

Taxonomie a značení exoplanet

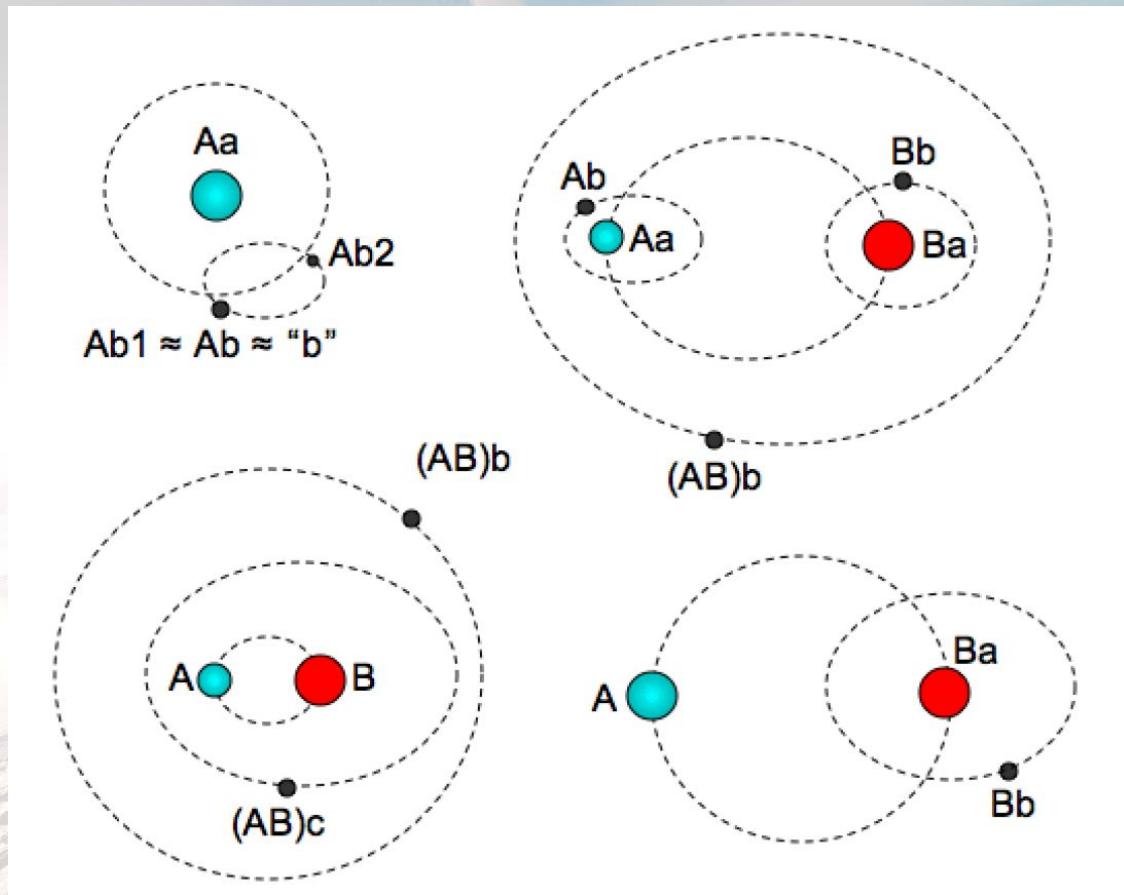
- Název podle katalogů (HD, WASP, HAT, Kepler, K2, TOI...)

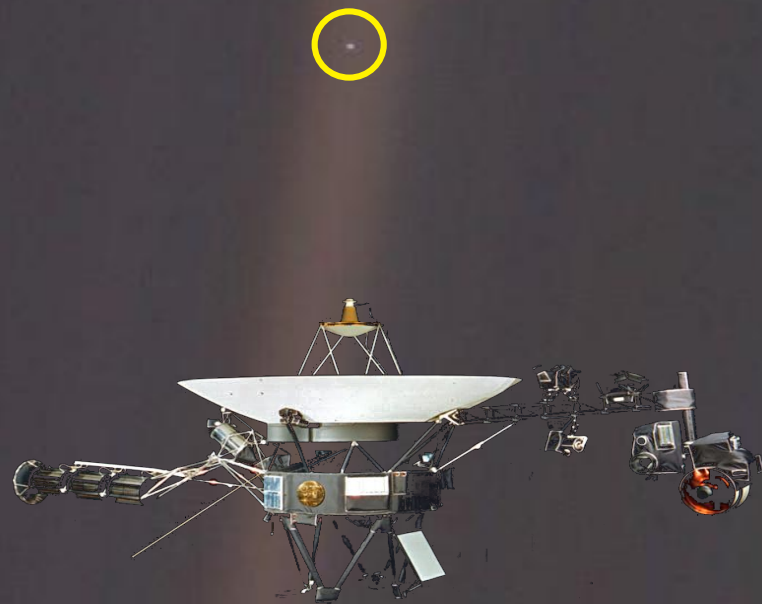
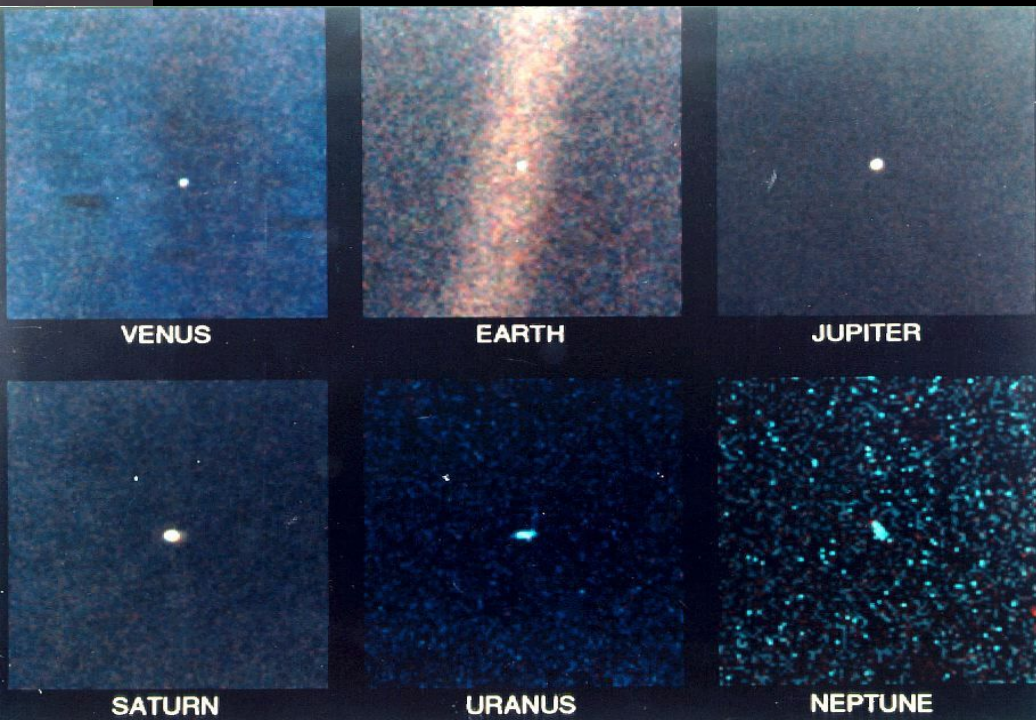
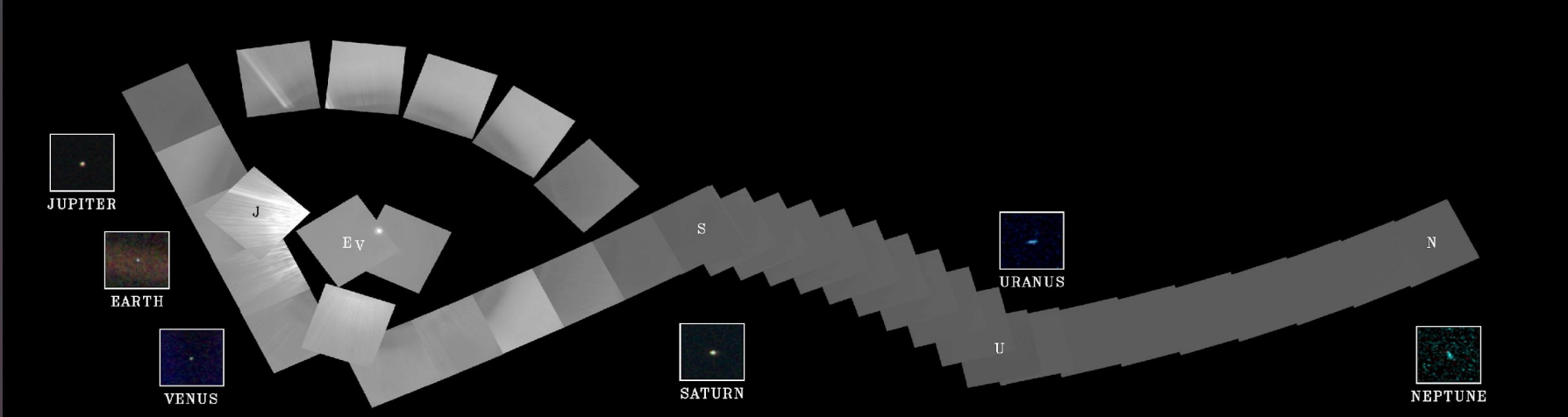
Přípony:

- Mateřská hvězda: 'a' (neuvádí se)
- první objevená exoplaneta: 'b'
- další objevené exoplanety: 'c', 'd', 'e', ...

- Ve dvojhvězdách podle konfigurace
- Exoměsíce římskými číslicemi

Příklady: K2-18 b, 61 Cyg Ab, HD 189733 b



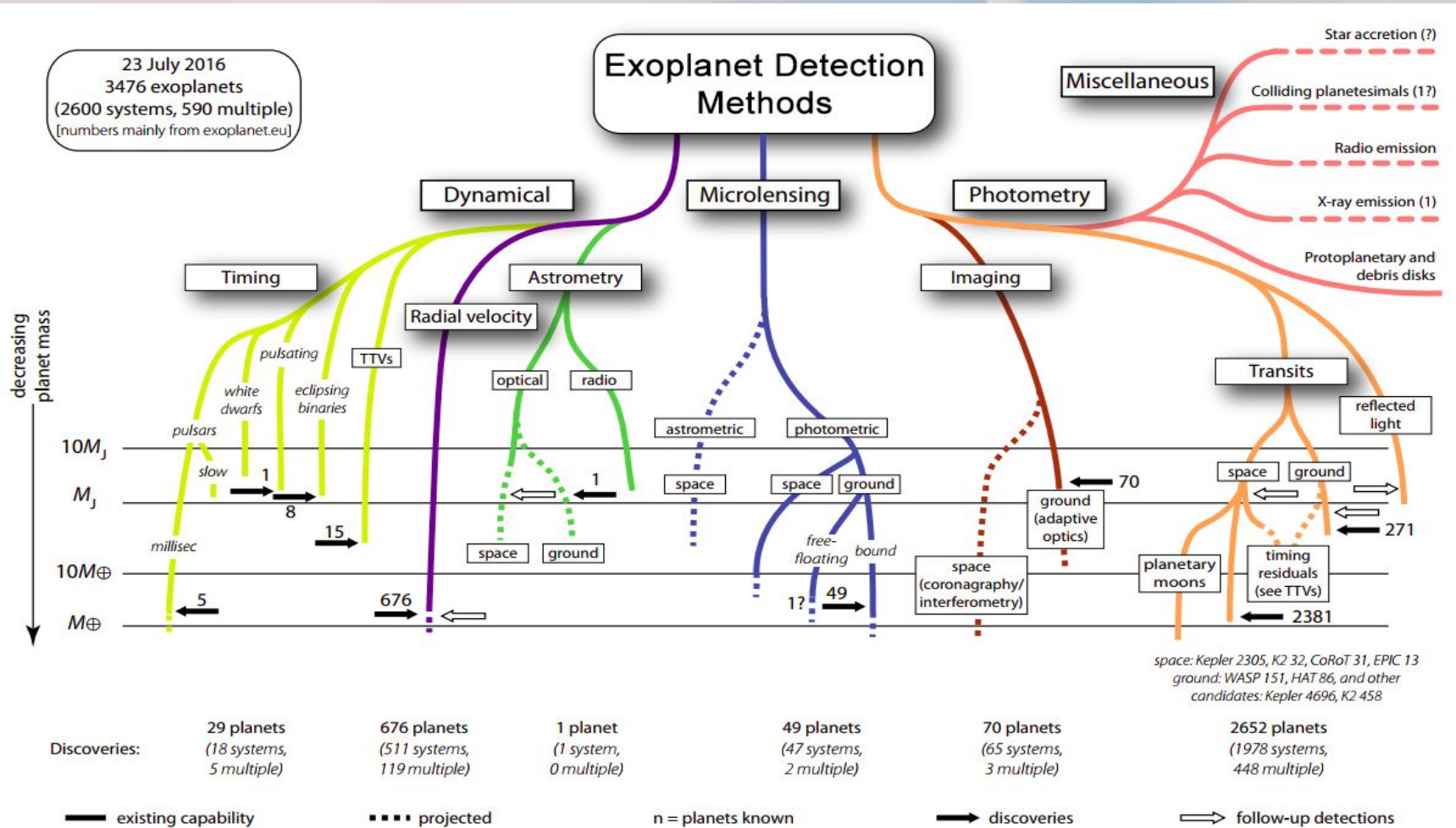


Jak objevit exoplanetu

- Velikost a hmotnost exoplanet většinou výrazně menší než mateřských hvězd
- ($R_p:R_* \sim 1:1-1:10^8$; $M_p:M_* \sim 1:1-1:10^8$)
- Exoplanety téměř nezáří ve srovnání s mateřskou hvězdou ($L_p/L_* \sim 1:10-1:10^{>10}$)
- Exoplanety se jeví úhlově velmi blízko svým mateřským hvězdám ($<mas$)



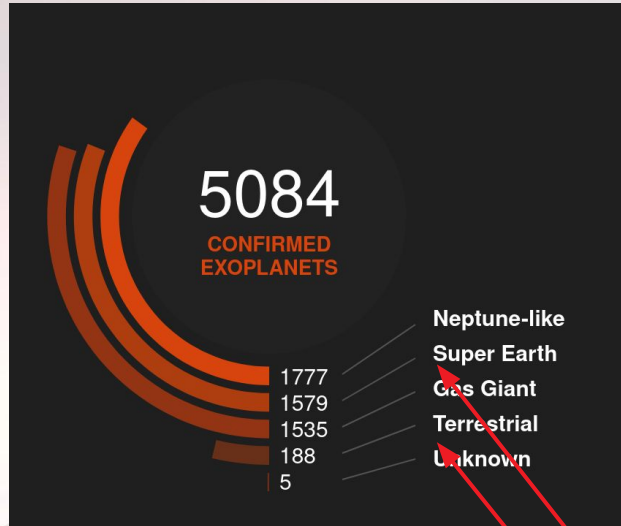
Jak objevit exoplanetu



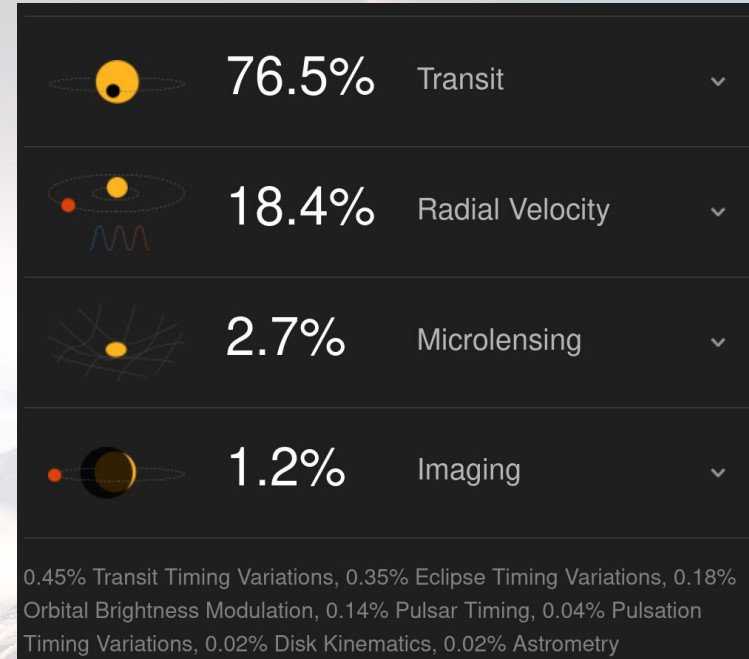
Známé exoplanety

16.9. 2022 (<https://exoplanets.nasa.gov/>)

3811 systémů



+8912 kandidátů



Třetina všech známých exoplanet jsou velikostně mezi Zemí a Neptunem

○ Transit (3232)

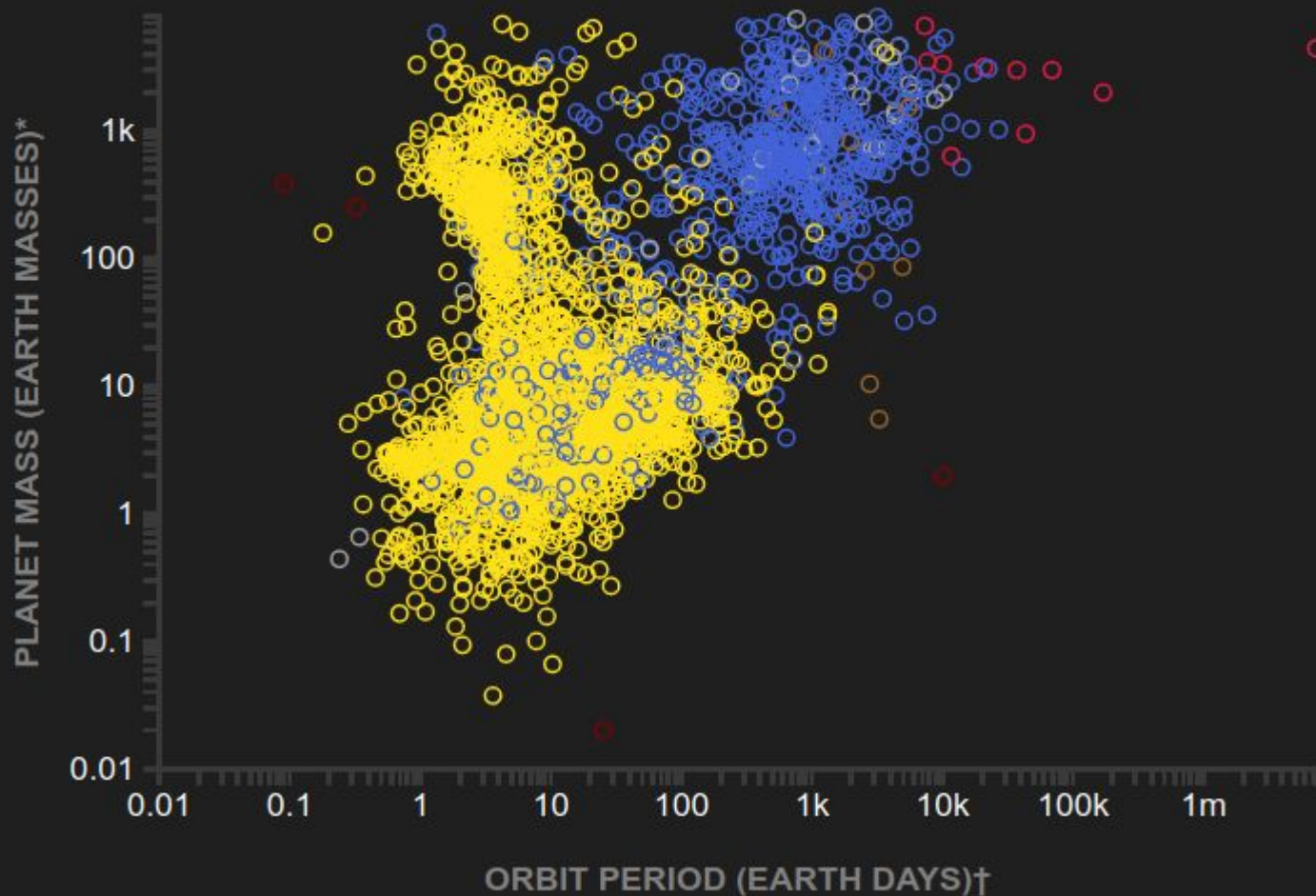
○ Radial Velocity (816)

○ Microlensing (9)

○ Imaging (10)

○ Pulsar Timing (6)

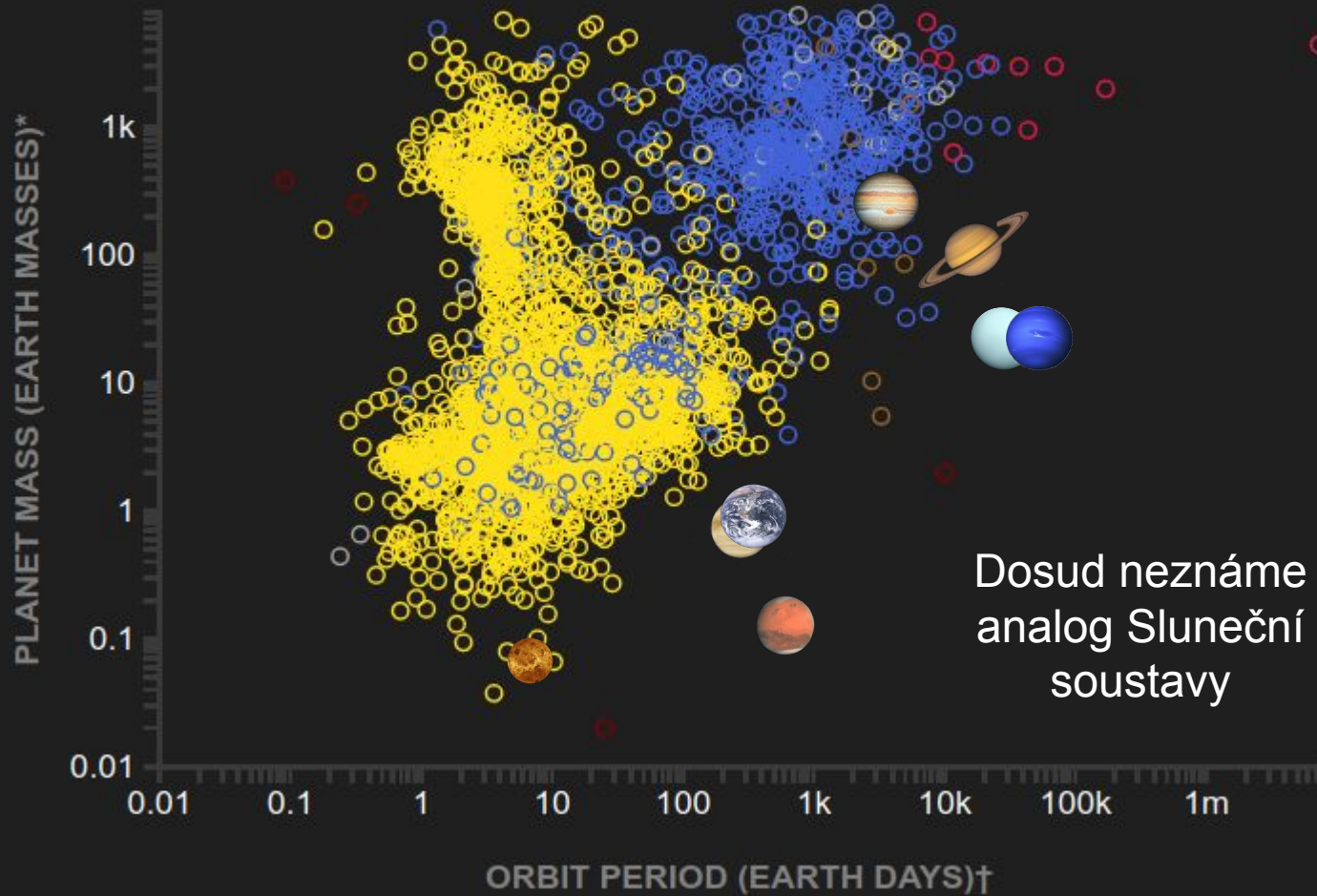
○ Other (41)



● Transit (3232)
● Imaging (10)

● Radial Velocity (816)
● Pulsar Timing (6)

● Microlensing (9)
● Other (41)



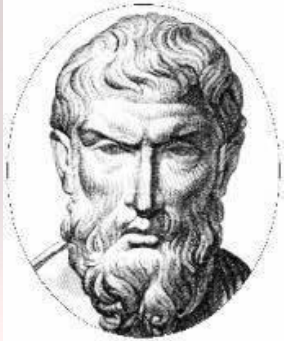
Dosud neznáme
analog Sluneční
soustavy

Rekordmani

Nejbližší hvězda	Proxima Cen b (RV)	1.3 pc
Nejjasnější hvězda	Aldebaran (RV) Pollux (RV)	0.87 mag, 1.1 mag
Nejkratší perioda	PSR J1719-1438 b (PTV) K2-137 b (T)	0.09 dne 0.18 dne
Nejdelší perioda	COCONUTS-2 b (IM) HD 66428 c (RV)	402000000 d 39000 d
Nejmenší poloměr	Kepler-37 b (T)	0.296 R_Z
Nejmenší hmotnost	PSR B1257+12 b (PTV) Kepler-138 b (RV)	0.02 M_Z , 0.06 M_Z
Nejvyšší rovnovážná teplota	Kelt-9 b	4050 K
Největší excentricita	HD 20782 b	0.95
Nejpočetnější systém	Kepler-90	8

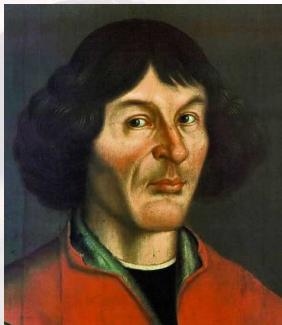
Prehistorie

- Filozofické spekulace, zásadní objevy a předpovědi



Epikuros (3. st. př. n. l.):

“Existuje nekonečně mnoho světů, podobných tomu našemu, i naprosto odlišných.”



Mikuláš koperník (1543):

“Planety obíhají kolem Slunce. Země není středem Sluneční soustavy”



Giordano Bruno (16. st.):

“Slunce není středem vesmíru, ale pouze jednou z mnoha hvězd; vesmír je nekonečný, existuje nekonečně mnoho sluncí s planetami, které mohou být i obydlené.”



Pierre Gassendi (1632),

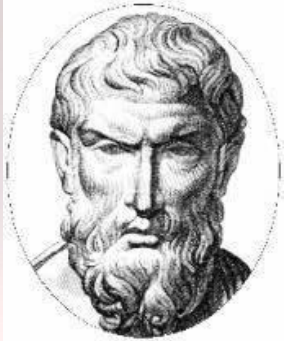
Edmund Halley (1677):

První pozorování tranzitů Merkuru



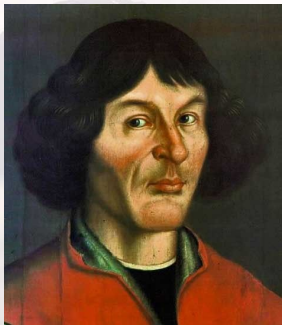
Prehistorie

- Filozofické spekulace, zásadní objevy a předpovědi



Epikuros (3. st. př. n. l.):

“Existuje nekonečně mnoho světů, podobných tomu našemu, i naprosto odlišných.”



Mikuláš koperník (1543):

“Planety obíhají kolem Slunce. Země není středem Sluneční soustavy”



Giordano Bruno (16. st.):

“Slunce není středem vesmíru, ale pouze jednou z mnoha hvězd; vesmír je nekonečný, existuje nekonečně mnoho sluncí s planetami, které mohou být i obydlené.”

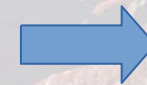


Pierre Gassendi (1632),

Edmund Halley (1677):

První pozorování tranzitů Merkuru

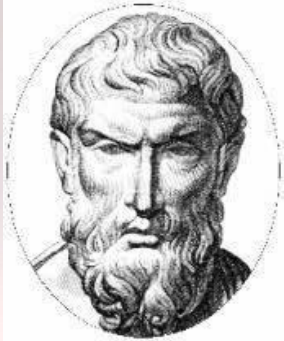
Poloměry planet mohou být velmi malé a nemohou být odhadnuty pouze ze svítivosti planety na obloze



Z tranzitů vnitřních planet možnost odhadu velikosti astronomické jednotky

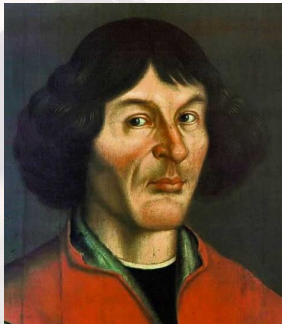
Prehistorie

- Filozofické spekulace, zásadní objevy a předpovědi



Epikuros (3. st. př. n. l.):

“Existuje nekonečně mnoho světů, podobných tomu našemu, i naprosto odlišných.”



Mikuláš koperník (1543):

“Planety obíhají kolem Slunce. Země není středem Sluneční soustavy”



Giordano Bruno (16. st.):

“Slunce není středem vesmíru, ale pouze jednou z mnoha hvězd; vesmír je nekonečný, existuje nekonečně mnoho sluncí s planetami, které mohou být i obydlené.”



Bernard de Fontenelle (1686):

“Každá hvězda je sluncem, které dodává světlo a teplo planetám, které jej obklopují”



Pierre Gassendi (1632),

Edmund Halley (1677):

První pozorování tranzitů Merkuru

Poloměry planet mohou být velmi malé a nemohou být odhadnuty pouze ze svítivosti planety na obloze

Z tranzitů vnitřních planet možnost odhadu velikosti astronomické jednotky

Prehistorie

- Filozofické spekulace, zásadní objevy a předpovědi



Christiaan Huygens (1698):

“Světlo potenciálních planet u jiných hvězd bude příliš slabé než aby mohlo být detekováno. Takové planety splynou se svou hvězdou v jeden světlý bod.”



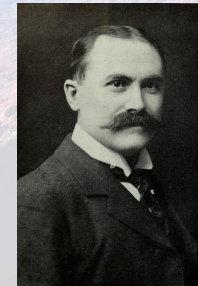
Isaac Newton (1713):

“Pokud jsou hvězdy středem podobných systémů, jako je ten náš, musely být zformovány z vůle Boha a jsou pod jeho dohledem.”



Dionysius Lardner (1853):

“Bylo navrženo, že k periodickým zákrytům nebo úplným zmizením hvězd by mohlo docházet vlivem planet, které kolem hvězd mohou obíhat.”



W. S. Jacob (1855) + T. J. Jackson See (1895):

Objev planety u 70 Oph metodou astrometrie (falešná detekce)

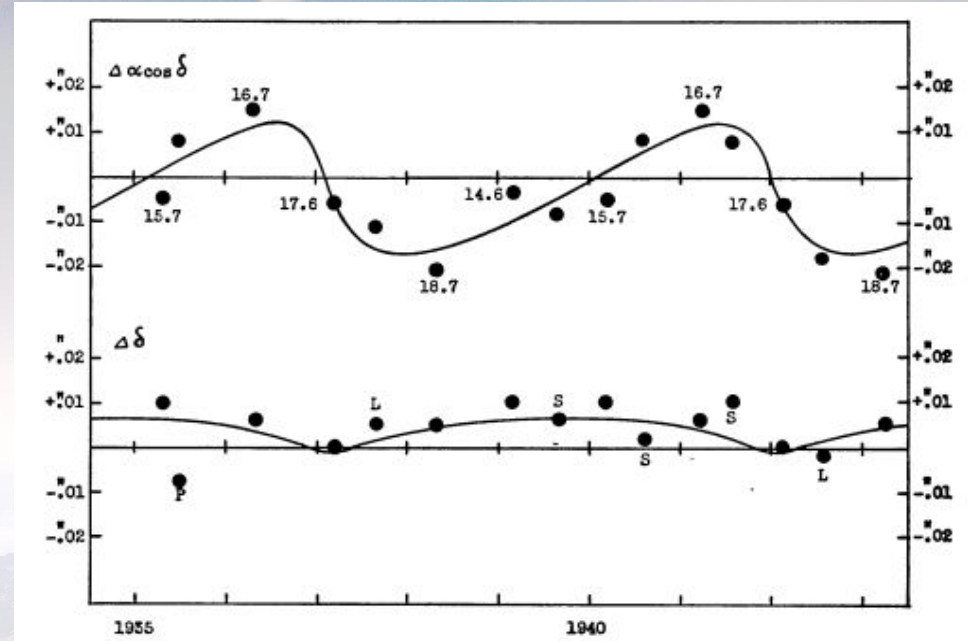
Teoretické studie a první “detekce”



A. van Maanen 1917, PASP, 29, 258:
Objev nejbližšího samostatného bílého trpaslika s podivným chemickým složením – možná akrece okolních těles



K.A. Strand 1943, PASP, 55, 29: Objekt s hmotností $16 M_J$ obíhající v systému 16 Cyg



D. Belorizky 1938, Lastr., 52, 359:
Jedinou možností, jak s tehdejší technikou detekovat největší planetu Sluneční soustavy ze vzdáleného vesmíru je přes tranzity (pokles 0.01 mag), nemožné přes radiální rychlosti nebo přímé pozorování.



O. Struve 1952, Obs, 72, 199:
Spekuloval o planetách ve vzdálenosti $1/50$ au. Amplituda radiálních rychlostí by pak byla ± 0.2 km/s, pokles při tranzitu 0.02 mag, oboje detekovatelné tehdejšími přístroji.

Astrometric Study of Barnard's Star from Plates Taken with the 24-inch Sproul Refractor

PETER VAN DE KAMP

Sproul Observatory, Swarthmore College

(Received 21 June 1963)



Twenty-five consecutive years of photographic observations of Barnard's star show deviations from uniform proper motion and secular acceleration which can be represented by Keplerian motion with a period of 24 yr and semi-axis major of 0.0245 ± 0.002 (p.e.). Assuming a value of $0.15 \odot$ for the mass of Barnard's star, the mass of the companion proves to be $0.0015 \odot$, or 1.6 times the mass of Jupiter.

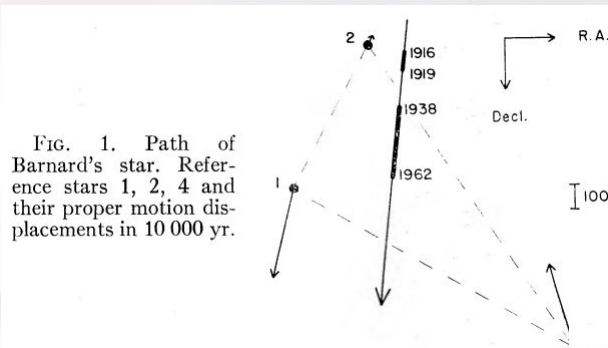
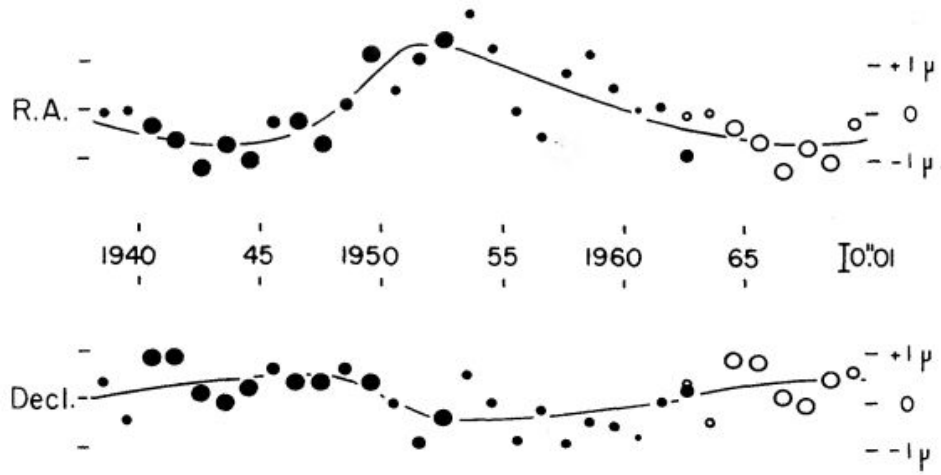


FIG. 1. Path of Barnard's star. Reference stars 1, 2, 4 and their proper motion displacements in 10 000 yr.

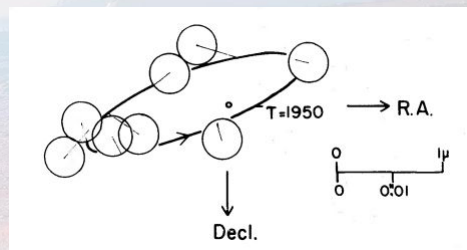


TABLE IV. Corrections to Lippincott system.

Measurer	unit $\frac{mm}{.0001}$	
	x	y
Sarah Lee Lippincott	0	0
Mary Jackson	+ 7.5	+10.0
Dorothy Allen	+10.0	+ 2.5
Marion Wolff	+ 7.5	+10.0
Judith Damkoehler	- 5.0	- 5.0
Laurence W. Frederick	-15.0	- 5.0
Marion Heaney	+10.0	- 2.5
Charlotte Garceau	+ 2.5	0
Martha Binnendijk	+ 5.0	+ 2.5
Betty Ann Mateer	+ 5.0	+ 5.0
Richard Woltman	+ 2.5	- 2.5
Leendert Binnendijk	0	0

$$-2''.05 V_{\mu p} \times 10^{-6}$$

2413 fotografických desek během 609 nocí mezi 1916-1962

- analýza za pomoci několika pozorovatelů,
- započítány vlastní pohyby hvězd, rozdílná velikost kotoučků na deskách, chyby pozorovatelů

An unsuccessful search for a planetary companion of Barnard's star* (BD + 4°3561)

George Gatewood

Allegheny Observatory, University of Pittsburgh, Pittsburgh, Pennsylvania

Heinrich Eichhorn

Department of Astronomy, University of South Florida, Tampa, Florida

(Received 8 February 1973; revised 30 April 1973)

The parallax, proper motion, and acceleration in position of Barnard's Star have been determined from 241 Allegheny and Van Vleck Observatory photographic plates. The measurements were reduced by means of a variant of a rigorous overlap type method previously proposed by one of us. (Eichhorn 1960). Despite relatively small rms errors, several test failed to confirm van de Kamp's published orbit. The weighting system was carefully studied from the adjustment residuals. In essence, the weight of a Thaw or Van Vleck plate is proportional to the number of exposures.

NORMAL POINTS

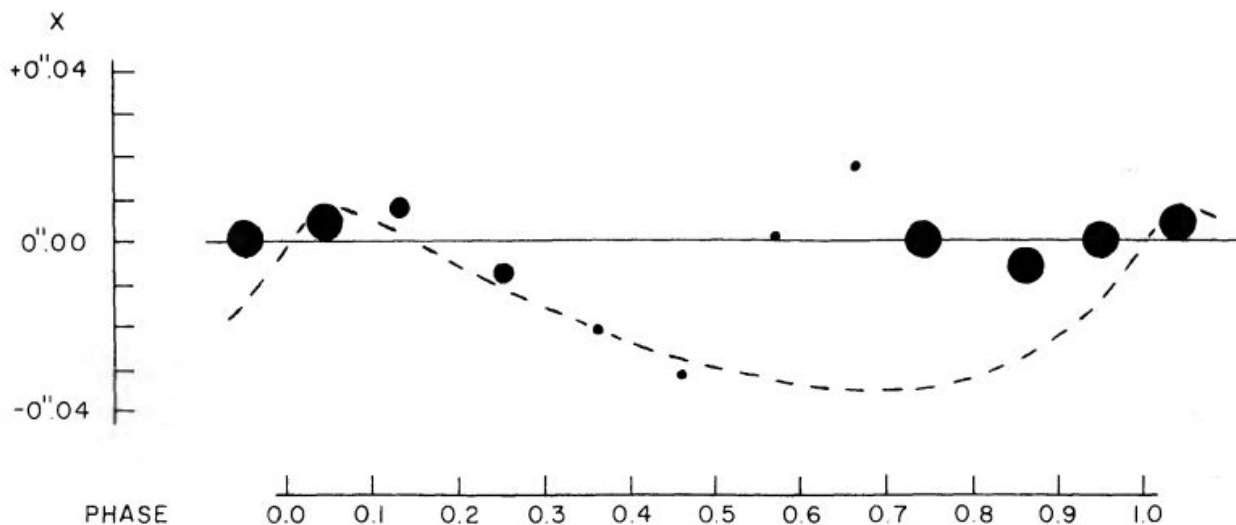
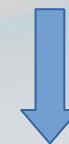


FIG. 1. Normal points.

Měření pohyblivých objektů je velmi obtížné a žádná optická soustava nezůstává stabilní po desetiletí



Zřejmě vada optické soustavy

Gatewood, G. 1995, ApSS, 223, 91
- Z astrometrických měření vyplývá, že okolo Barnardovy hvězdy neobíhá žádné těleso hmotnější než $0.5 M_J$ na dráze mezi 1/20 a 2 au.

PRECISE DOPPLER MONITORING OF BARNARD'S STAR

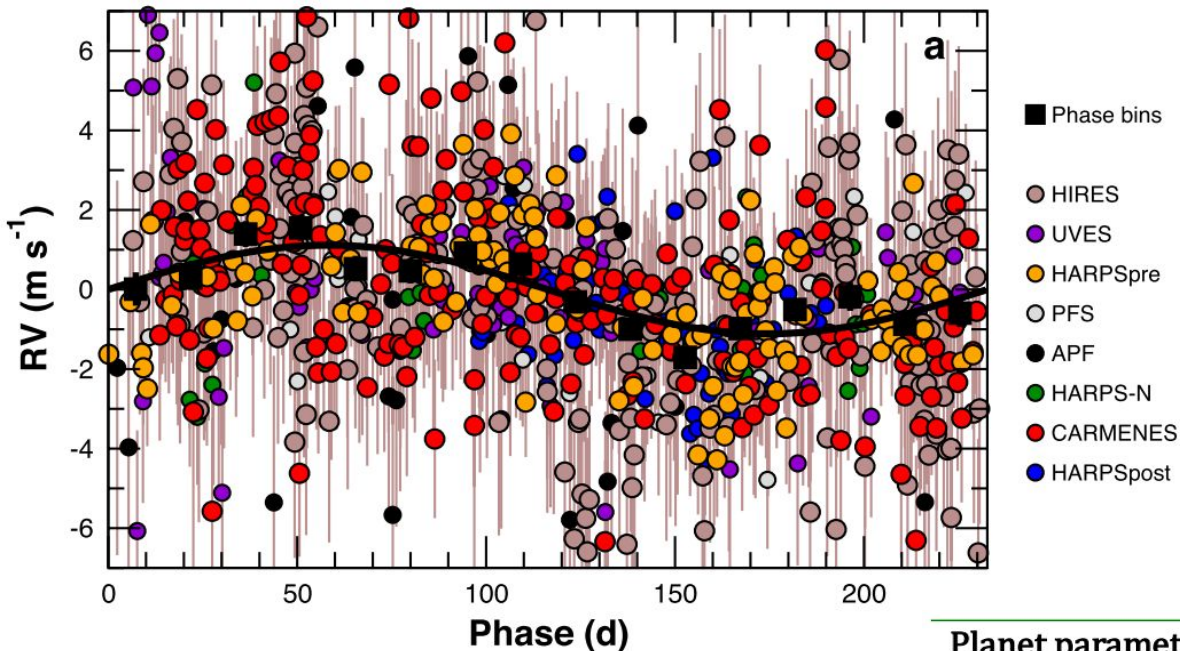
JIEUN CHOI¹, CHRIS MCCARTHY², GEOFFREY W. MARCY^{1,2}, ANDREW W. HOWARD¹, DEBRA A. FISCHER³, JOHN A. JOHNSON⁴, HOWARD ISAACSON¹, JASON T. WRIGHT^{5,6}

Draft version October 29, 2018

ABSTRACT

Choi et al. 2013, ApJ, 764, 131

We present 248 precise Doppler measurements of Barnard's Star (Gl 699), the second nearest star system to Earth, obtained from Lick and Keck Observatories during 25 years between 1987 and 2012. The early precision was 20 m s^{-1} but was 2 m s^{-1} during the last 8 years, constituting the most extensive and sensitive search for Doppler signatures of planets around this stellar neighbor. We carefully analyze the 136 Keck radial velocities spanning 8 years by first applying a periodogram analysis to search for nearly circular orbits. We find no significant periodic Doppler signals with amplitudes above $\sim 2 \text{ m s}^{-1}$, setting firm upper limits on the minimum mass ($M \sin i$) of any planets with orbital periods from 0.1 to 1000 days. Using a Monte Carlo analysis for circular orbits, we determine that planetary companions to Barnard's Star with masses above $2 M_{\oplus}$ and periods below 10 days would have been detected. Planets with periods up to 2 years and masses above $10 M_{\oplus}$ ($0.03 M_{\text{Jup}}$) are also ruled out. A similar analysis allowing for eccentric orbits yields comparable mass limits. The habitable zone of Barnard's Star appears to be devoid of roughly Earth-mass planets or larger, save for face-on orbits. Previous claims of planets around the star by van de Kamp are strongly refuted. The radial velocity of Barnard's Star increases with time at $4.515 \pm 0.002 \text{ m s}^{-1} \text{ yr}^{-1}$, consistent with the predicted geometrical effect, secular acceleration, that exchanges transverse for radial components of velocity.



Ribas et al. 2018, Nature, 563, 365

771 nocí na nejpřesnějších přístrojích
mezi 2007 a 2017

Vzdálenost od mateřské hvězdy 220 mas =>
možnost pozorovat přímo

Planet parameter

Value

Barnard's star b

Orbital period (d)	$232.80^{+0.38}_{-0.41}$
Radial velocity semi-amplitude (m s^{-1})	1.20 ± 0.12
Eccentricity	$0.32^{+0.10}_{-0.15}$
Argument of periastron (deg)	107^{+19}_{-22}
Mean longitude at BJD2455000.0 (deg)	203 ± 7
Minimum mass ($M \sin i; M_{\oplus}$)	3.23 ± 0.44
Orbital semi-major axis (au)	0.404 ± 0.018

80. léta 20. století

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.

80. léta 20. století

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

Doyle et al. 1984, ApJ, 287, 307

- Hledejme planety u hvězd, u kterých známe orientaci

$$i = \arcsin \frac{V \sin i}{2 \pi r/P}$$

80. léta 20. století

Bradford et al. 1984, Science,
226, 1421

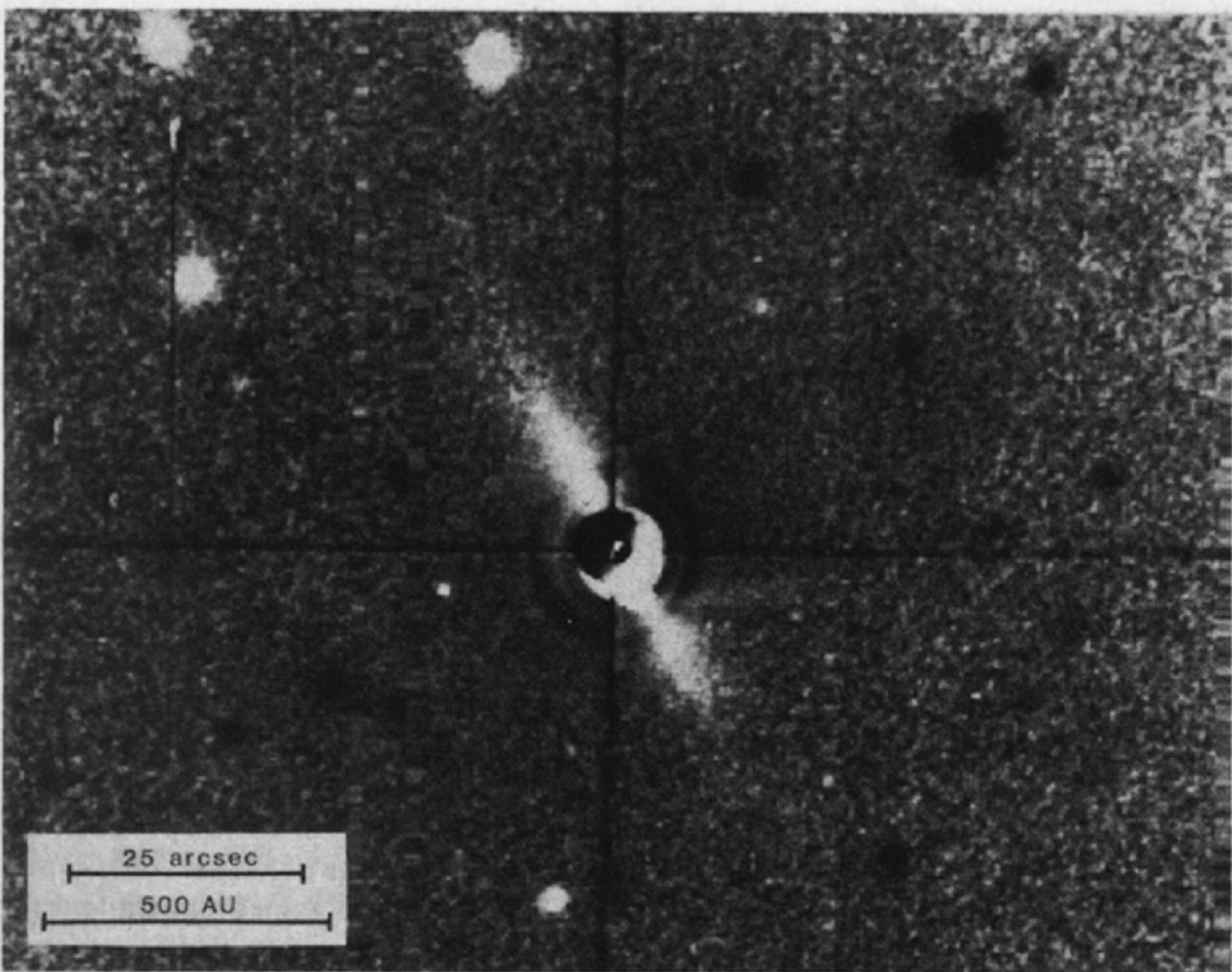
- Okolohvězdný disk u β Pic z
družice IRAS

=> Okolohvězdný materiál i

okolo jiných hvězd

=> možnost planet mimo

Sluneční soustavu



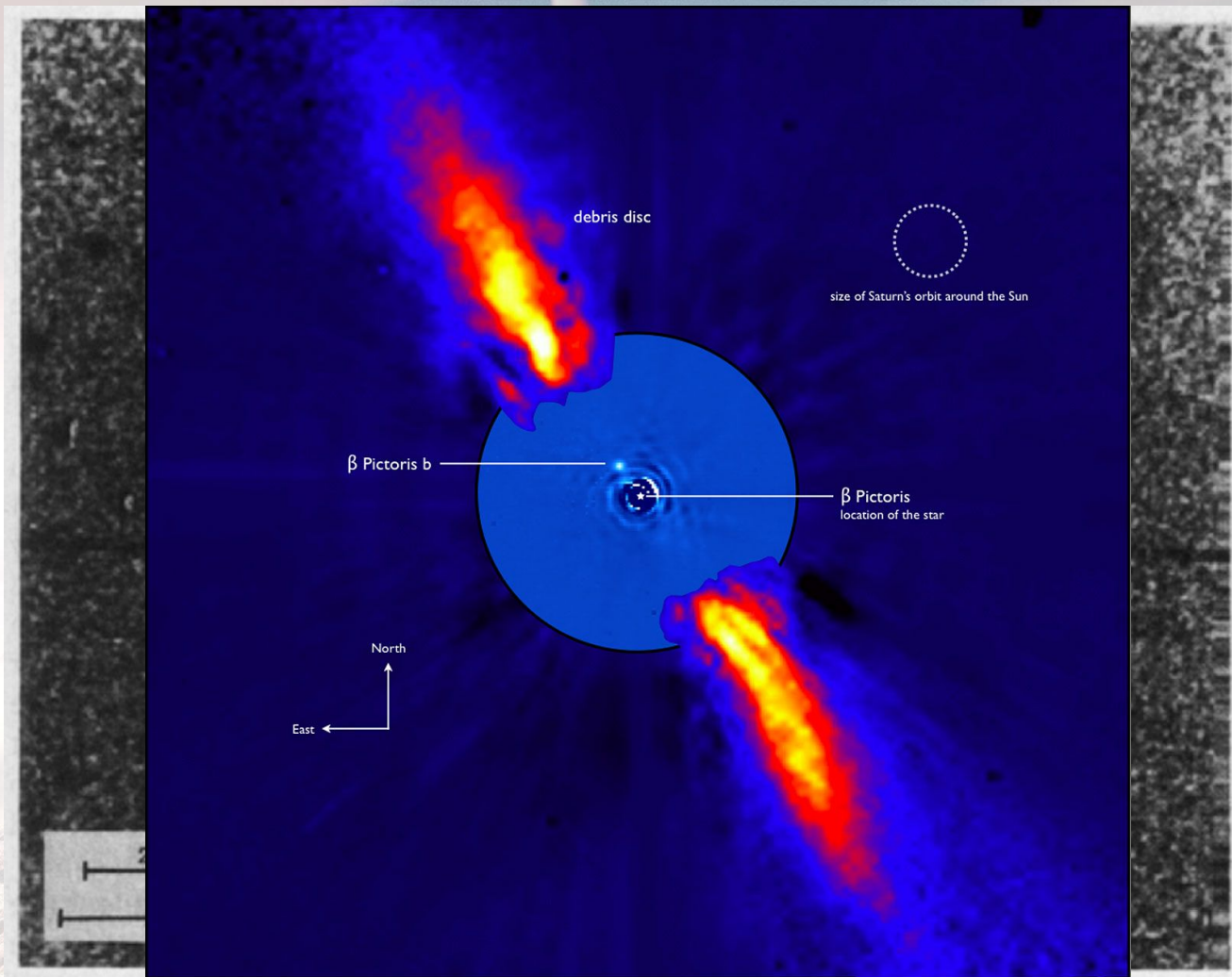
80. léta 20. století

Bradford et al. 1984, Science,
226, 1421

- Okolohvězdný disk u β Pic z
družice IRAS

=> Okolohvězdný materiál i
okolo jiných hvězd

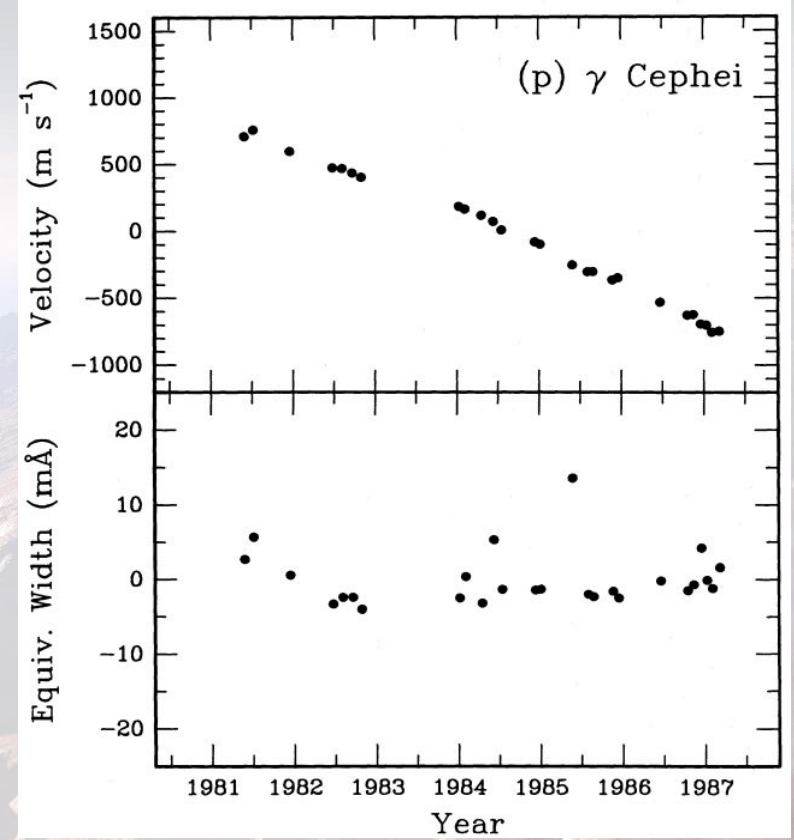
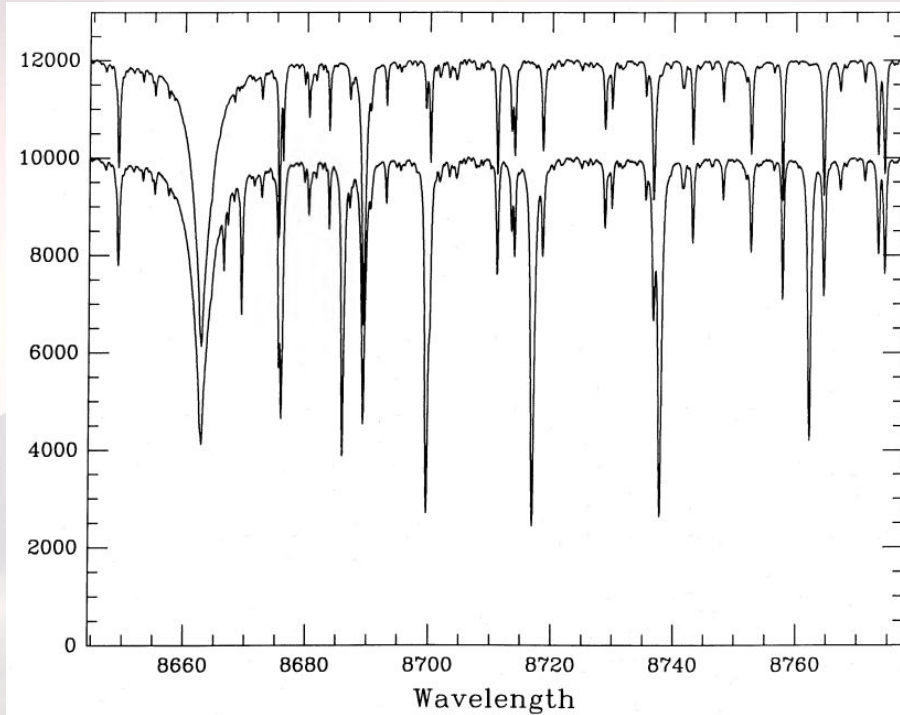
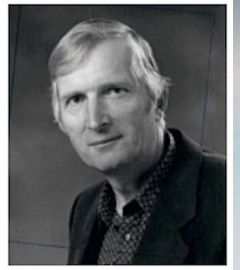
=> možnost planet mimo
Sluneční soustavu



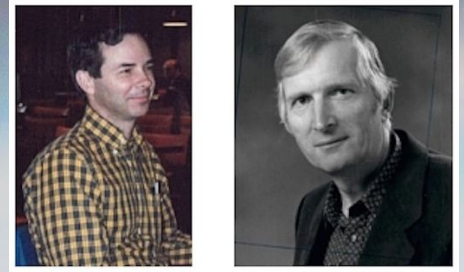
80. léta 20. století

Campbell, Walker & Yang 1988, ApJ, 331, 902

A search for substellar companions to solar-type stars
12 hvězd během 6 let, X^1 Ori A a γ Cep A dlouhodobé
trendy, 3.6m CFHT, HF buňka, $\sigma \sim 13$ m/s

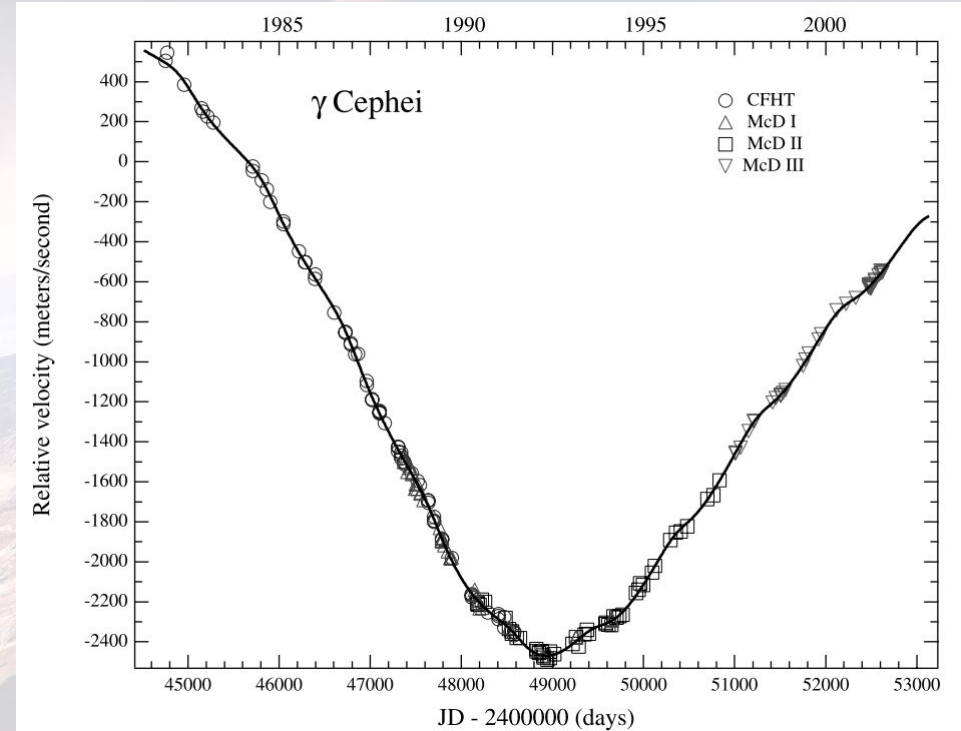
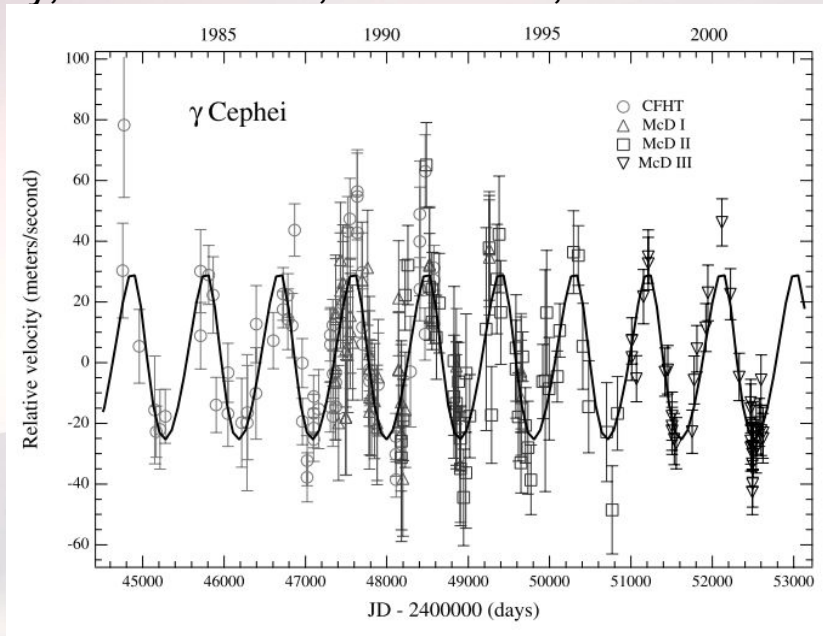


80. léta 20. století



Campbell, Walker & Yang 1988, ApJ, 331, 902

A search for substellar companions to solar-type stars
12 hvězd během 6 let, X^1 Ori A a γ Cep A dlouhodobé
trendy, 3.6m CFHT, HF buňka, $\sigma \sim 13$ m/s



Hatzes et al. 2003, ApJ, 599, 1383

- Planeta s $1.7 M_J$ s orbitální periodou 2.48 roku

80. léta 20. století

Marcy & Butler 1989, ApJ, 344, 441

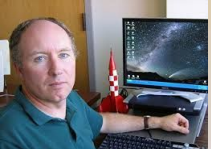
- hledání objektů substelárních hmotností u málo hmotných hvězd (70 stars, $\sigma \sim 200$ m/s)



Cochran & Hatzes 1993, ApSS, 212, 281

- monitoring 33 hvězd sp. typů F-K s použitím jodové cely ($\sigma \sim < 10$ m/s)





90. léta 20. století



Wolszczan & Frail 1992, Nature, 355, 145

2 planety okolo pulsaru PSR1257+12: 2.8 a 3.4 M_Z + 0.02 M_Z , periody 98 a 66 dní

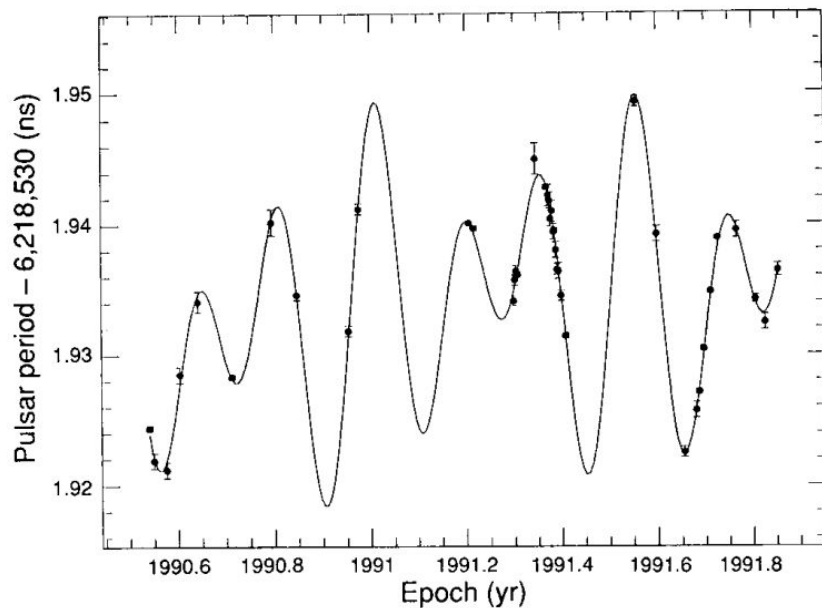
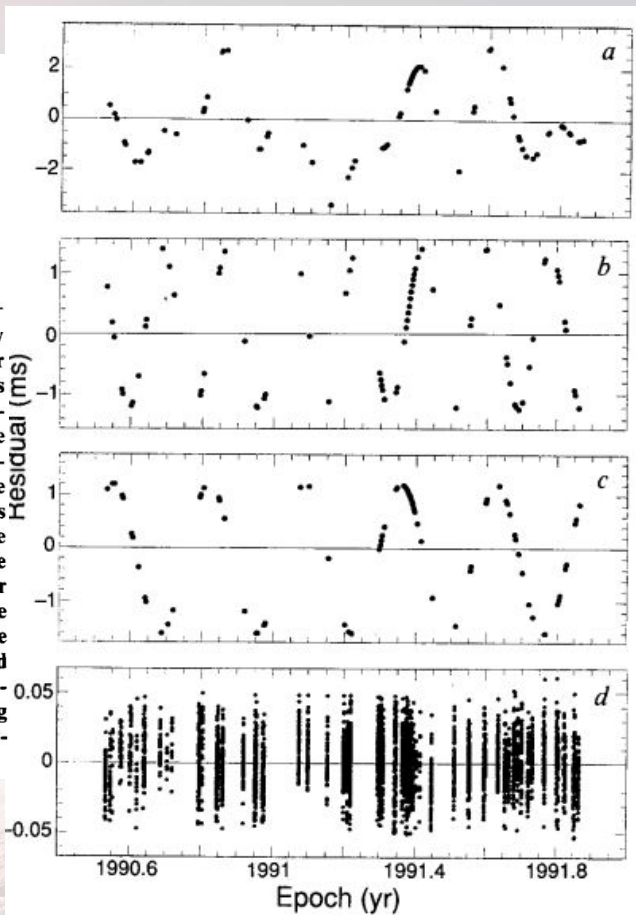
A planetary system around the millisecond pulsar PSR1257+12

A. Wolszczan* & D. A. Frail†

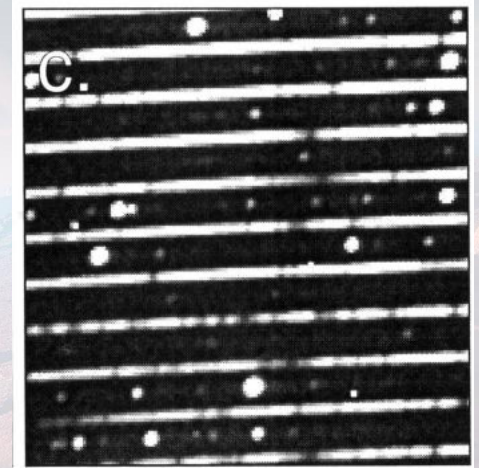
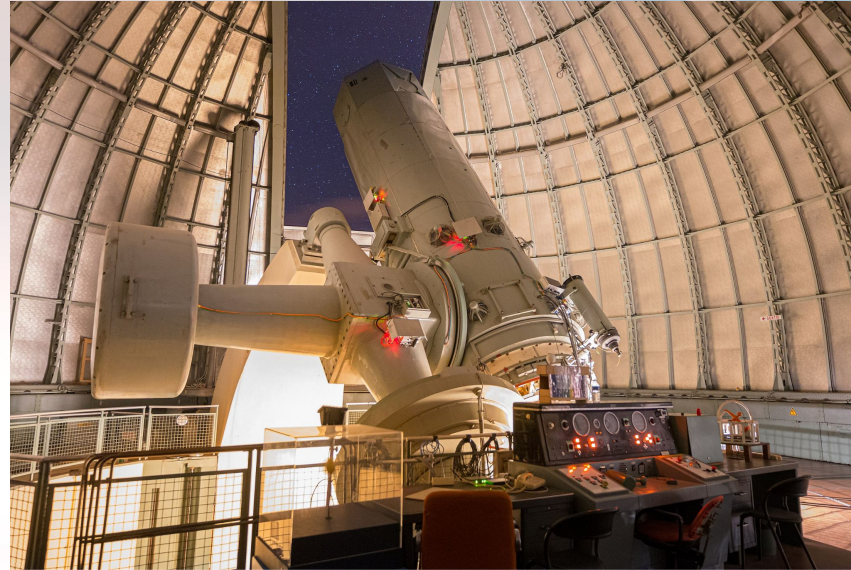
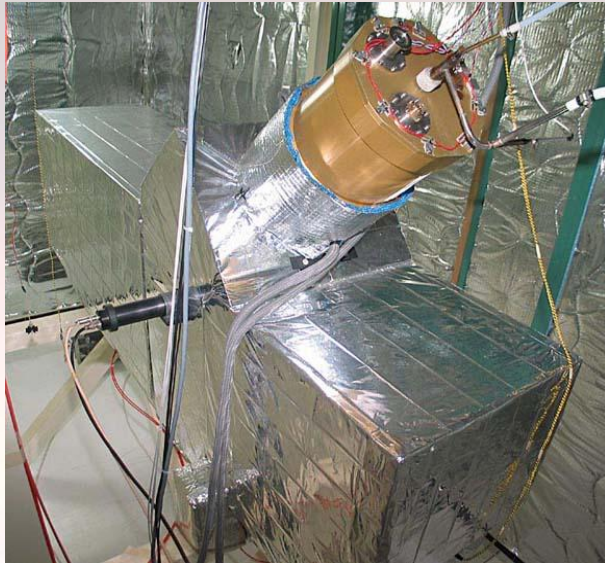
* National Astronomy and Ionosphere Center, Arecibo Observatory, Arecibo, Puerto Rico 00613, USA

† National Radio Astronomy Observatory, Socorro, New Mexico 87801, USA

MILLISECOND radio pulsars, which are old ($\sim 10^9$ yr), rapidly rotating neutron stars believed to be spun up by accretion of matter from their stellar companions, are usually found in binary systems with other degenerate stars¹. Using the 305-m Arecibo radiotelescope to make precise timing measurements of pulses from the recently discovered 6.2-ms pulsar PSR1257+12 (ref. 2), we demonstrate that, rather than being associated with a stellar object, the pulsar is orbited by two or more planet-sized bodies. The planets detected so far have masses of at least 2.8 M_\oplus and 3.4 M_\oplus , where M_\oplus is the mass of the Earth. Their respective distances from the pulsar are 0.47 AU and 0.36 AU, and they move in almost circular orbits with periods of 98.2 and 66.6 days. Observations indicate that at least one more planet may be present in this system. The detection of a planetary system around a nearby (~ 500 pc), old neutron star, together with the recent report on a planetary companion to the pulsar PSR1829-10 (ref. 3) raises the tantalizing possibility that a non-negligible fraction of neutron stars observable as radio pulsars may be orbited by planet-like bodies.



Spektrograf Elodie



Baranne et al. 1996, A&AS, 119, 373,
spektrograf Elodie na 1.9m dalekohledu
observatoře Haute Provence, $<15 \text{ m/s}$, 9 mag,
 $<30 \text{ min}$ expozice

Instrumental parameter	measured value
Typical resolution power	42'000
Pixel sampling per FWHM	1.9–2.45
Usable wavelength domain (blaze response $> 50\%$)	3906–6811 Å
Number of orders	67
Typical vertical width of the orders (90% of the energy)	3 pixels
CCD read-out noise	8.5 e^-
Overall transmission at 5600Å (maximum of the blaze)	1.3%
Internal precision of the wavelength calibration	3 m s^{-1} (20 m s^{-1} per order)
Observed instrumental velocity error	13 m s^{-1} (long term)

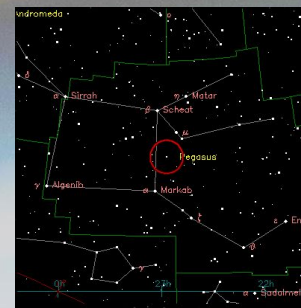
A Jupiter-mass companion to a solar-type star

Michel Mayor & Didier Queloz

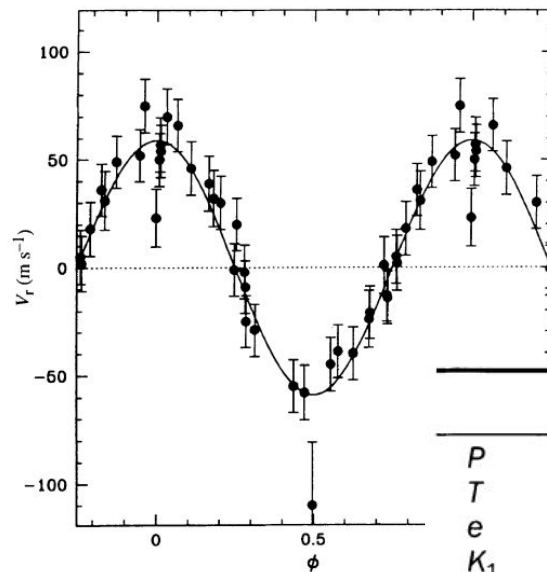
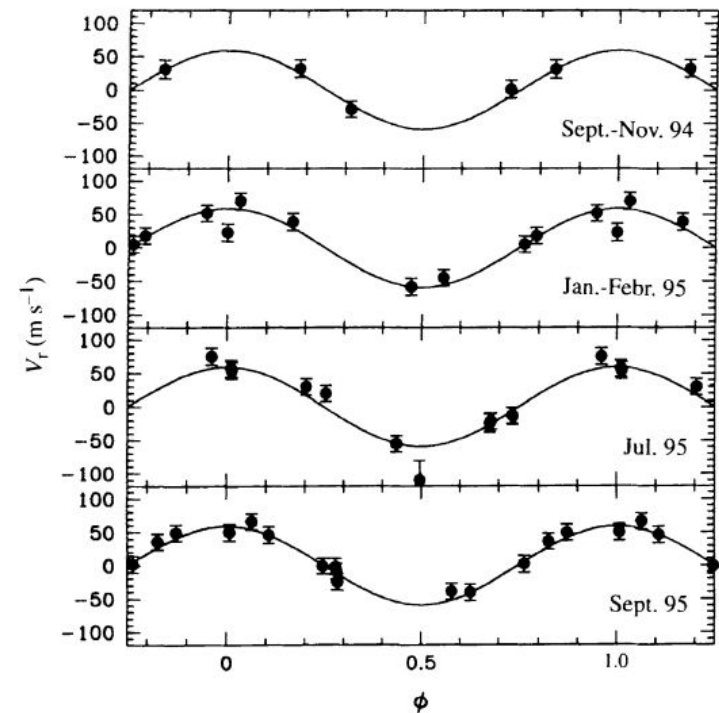
Mayor&Queloz 1995, Nature, 378, 355

Geneva Observatory, 51 Chemin des Maillettes, CH-1290 Sauverny, Switzerland

The presence of a Jupiter-mass companion to the star 51 Pegasi is inferred from observations of periodic variations in the star's radial velocity. The companion lies only about eight million kilometres from the star, which would be well inside the orbit of Mercury in our Solar System. This object might be a gas-giant planet that has migrated to this location through orbital evolution, or from the radiative stripping of a brown dwarf.



Výsledek monitoringu 142 hvězd sp. typů G a K

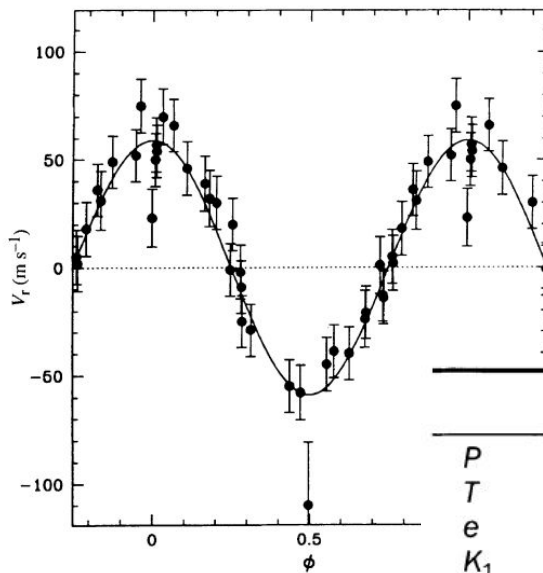
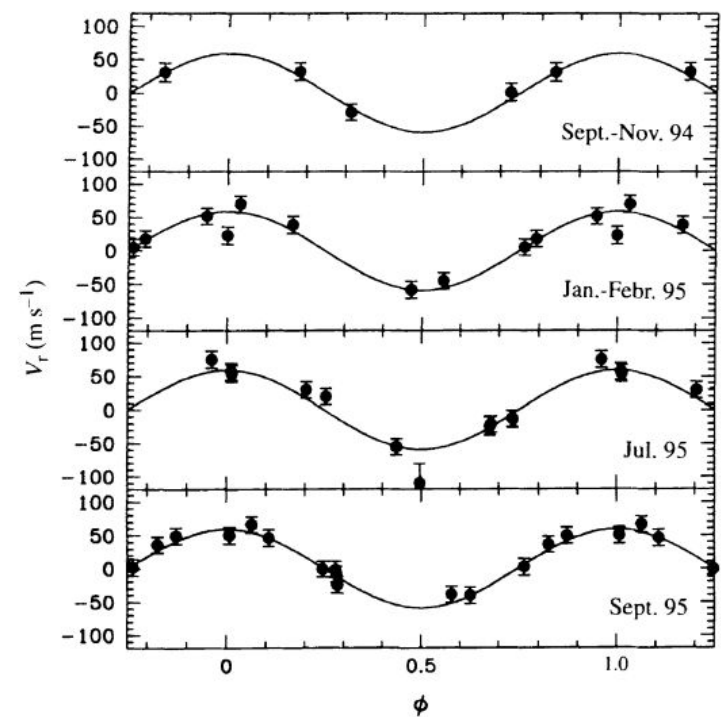


Nobelova cena za fyziku 2019

TABLE 1 Orbital parameters of 51 Peg

P		4.2293 ± 0.0011 d
T		$2,449,797.773 \pm 0.036$
e		0 (fixed)
K_1		0.059 ± 0.003 km s ⁻¹
$a_1 \sin i$		$(34 \pm 2) 10^5$ m
$f_1(m)$	$M_2 \sin i = 0.47 \pm 0.02 M_J$	$(0.91 \pm 0.15) 10^{-10} M_\odot$
N		35 measurements
$(O-C)$		13 m s ⁻¹

Planety mohou být úplně jiné, než jsme si představovali



Nobelova cena za fyziku 2019

TABLE 1 Orbital parameters of 51 Peg

P		4.2293 ± 0.0011 d
T		$2,449,797.773 \pm 0.036$
e		0 (fixed)
K_1		0.059 ± 0.003 km s ⁻¹
$a_1 \sin i$		$(34 \pm 2) 10^5$ m
$f_1(m)$	$M_2 \sin i = 0.47 \pm 0.02 M_J$	$(0.91 \pm 0.15) 10^{-10} M_\odot$
N		35 measurements
$(O-C)$		13 m s ⁻¹

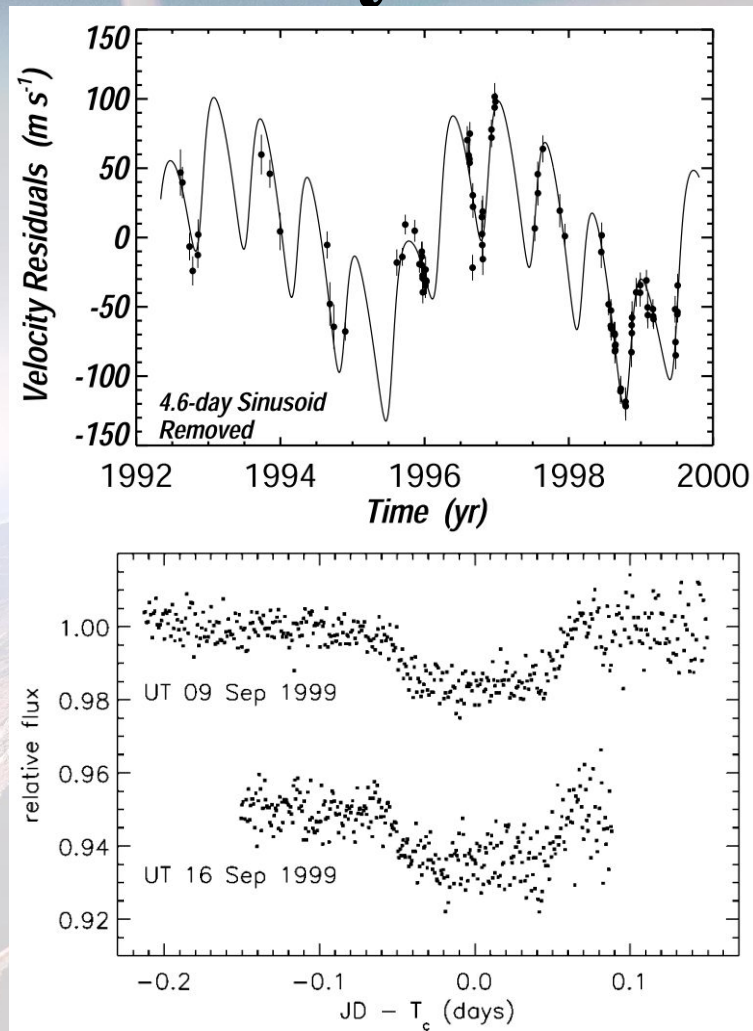
Další historické milníky

Buttler et al. 1999, ApJ, 526, 916

- **Objev prvního multiplanetárního systému**
- 3 planety u ν And s periodami 4.6, 241 a 1267 dní a hmotnostmi 0.7, 2 a 4 M_J

Charbonneau et al. 1999, ApJ, 529, 45

- **První pozorovaný tranzit exoplanety** (HD 209458 – Známa z měření RVs)
- 10cm dalekohled!



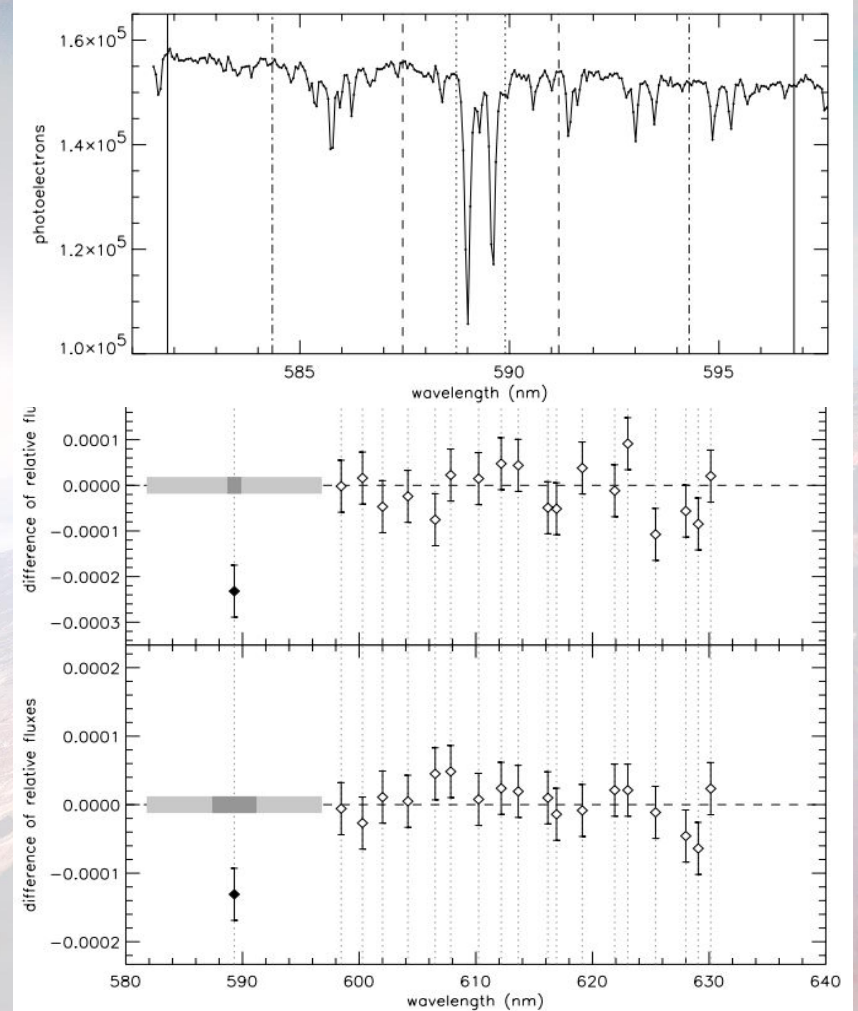
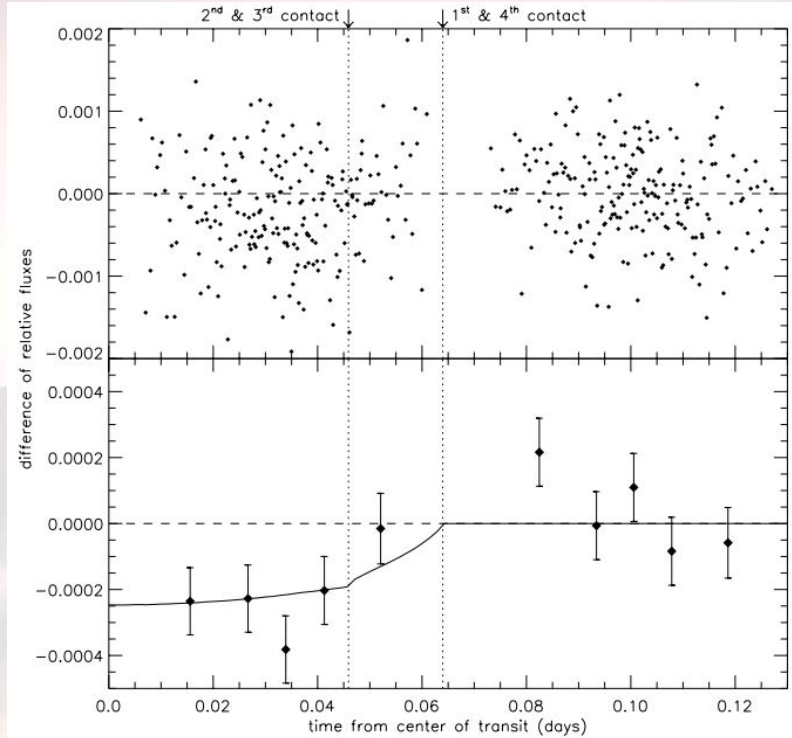
Další historické milníky

Charbonneau et al. 2002, ApJ, 568, 377

- První detekce atmosféry exoplanety

(sodík u HD 209458)

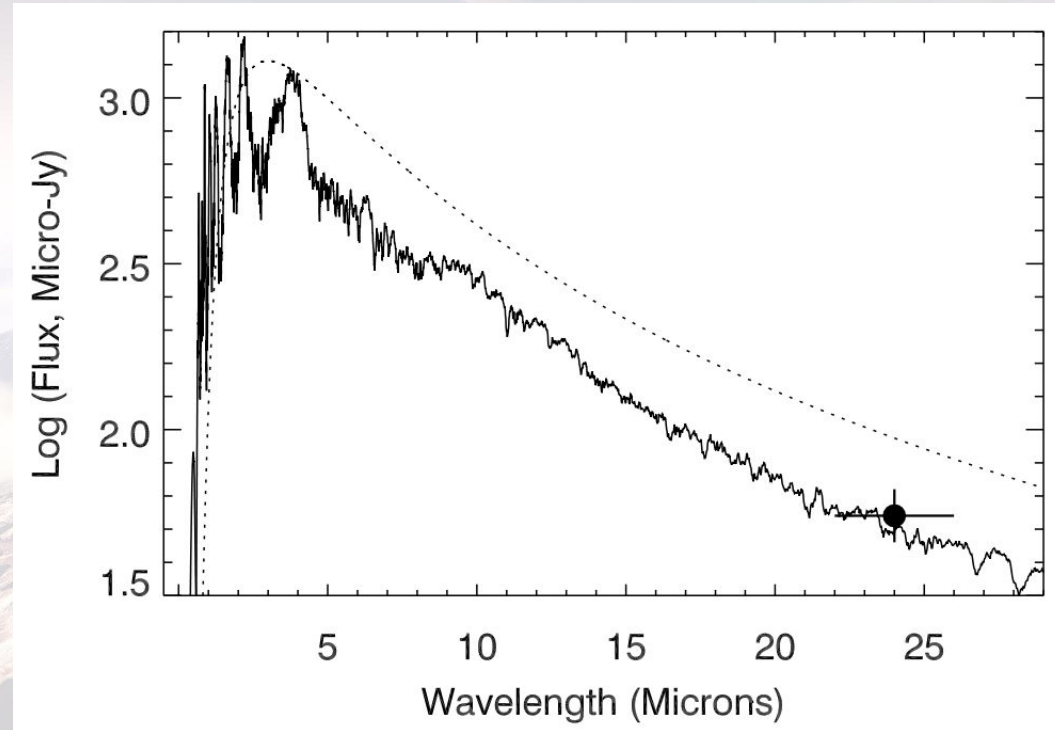
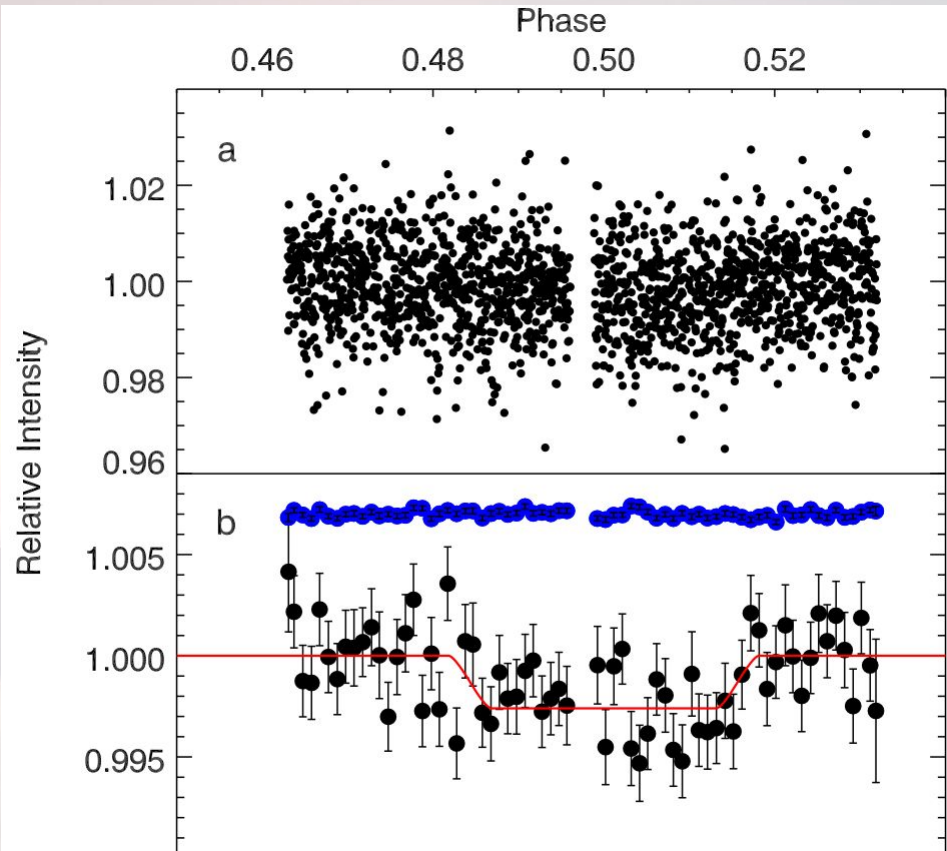
- v datech z HST STIS spektrografu (teoretické předpovědi řádově menší)



Další historické milníky

Deming et al. 2005, Nature, 434, 740

- Detekce infračerveného záření exoplanety HD 209458 b
- Dalekohled Spitzer na 24 μm

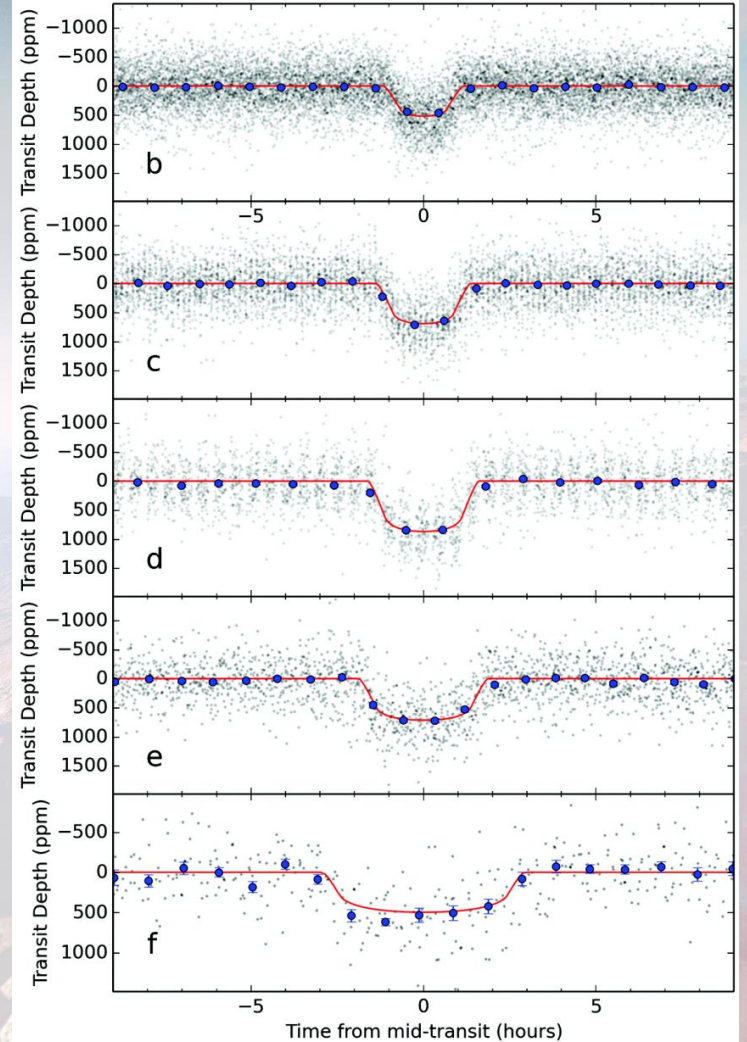
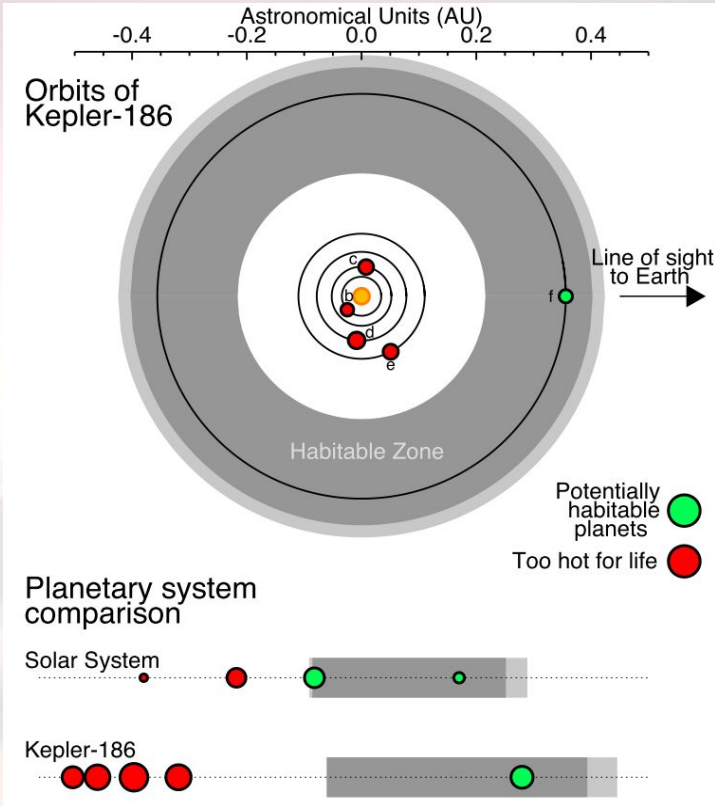


Další historické milníky

Quintana et al. 2014, Sci, 344, 277

- První exoplaneta velikosti Země v obyvatelné zóně

(Kepler-186 f; $R_p = 1.1 R_Z$)

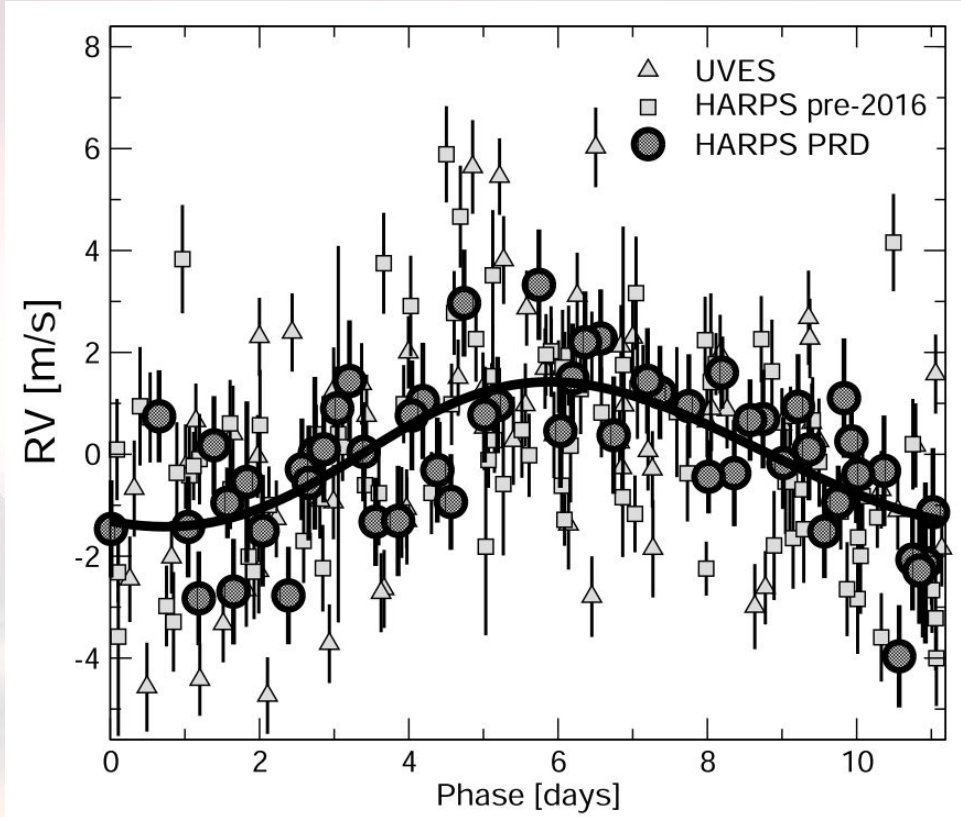


Další historické milníky

Anglada-Escudé et al. 2016, Nature, 536, 437

- Planeta u α Centauri C

- Planeta o hmotnosti $M_p = 1.3 M_Z$ s orbitální periodou 11.2 dne



A series of seven vertically stacked panels (a-g) showing various spectroscopic and activity indicators for α Centauri C. The x-axis for all panels is Julian Date in days, ranging from 2457400 to 2457480. Panel (a) shows HARPS PRD RV in $m s^{-1}$ with a sinusoidal fit. Panel (b) shows normalized flux for the $ASH2 SII$ indicator. Panel (c) shows normalized flux for the $ASH2 H-\alpha$ indicator. Panel (d) shows normalized flux for the LCOGT V indicator. Panel (e) shows normalized flux for the LCOGT B indicator. Panel (f) shows the HARPS PRD m_2 activity indicator in $km^2 s^{-1}$. Panel (g) shows the HARPS PRD m_3 activity indicator in $km^2 s^{-1}$. Arrows in panels b-e point to specific features in the activity indicators.

Další historické milníky

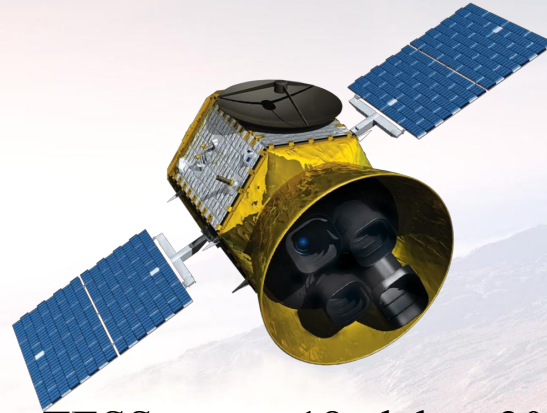
Hubble Space Telescope
start 23. duben 1990



Spitzer – start 24. srpna 2003



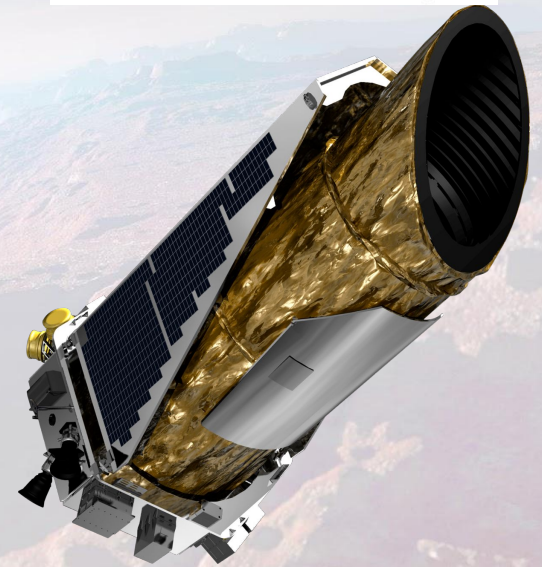
CoRoT – start 26. prosince 2006



TESS – start 18. dubna 2018

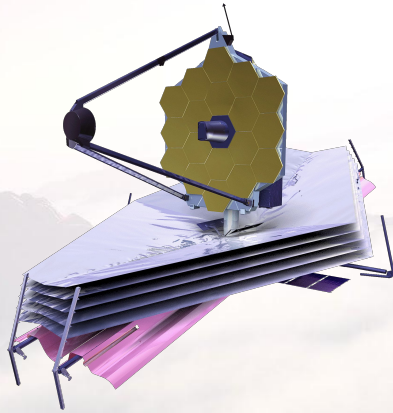


Cheops, start 18. prosince 2019



Kepler
start 6. března 2009

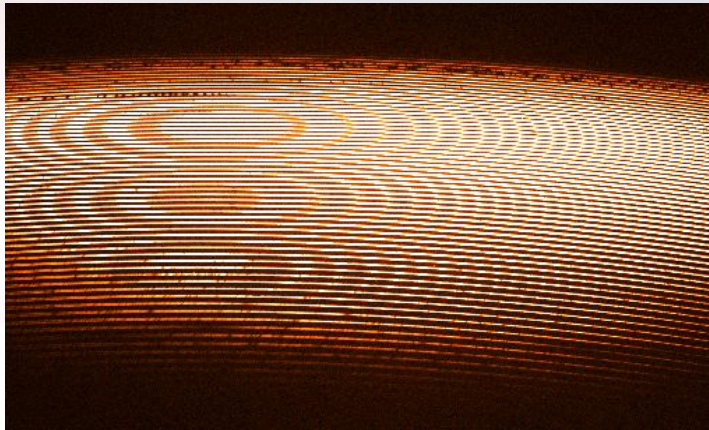
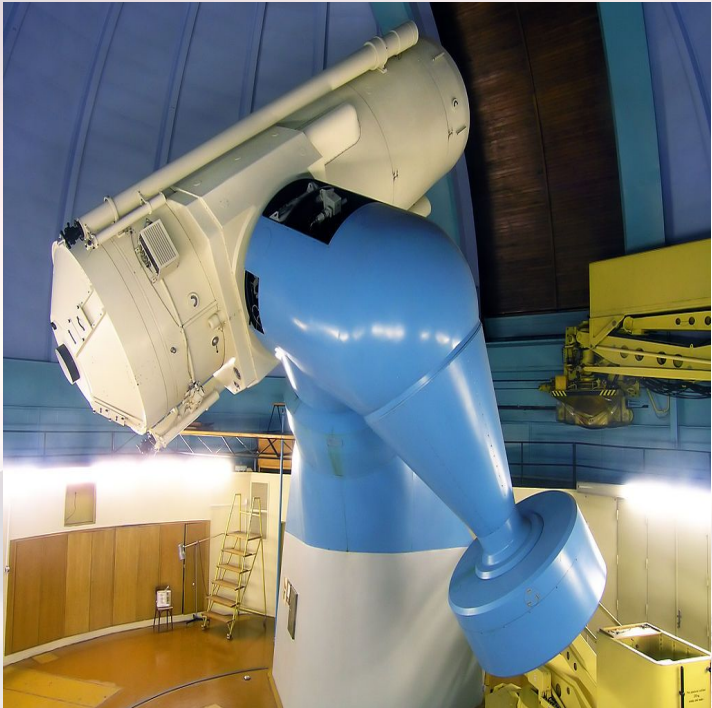
James Webb Space Telescope
start 25. prosinec 2021



Výzkum exoplanet v ČR

Skupina exoplanet AV ČR v Ondřejově (2m Perkův dalekohled, OES)

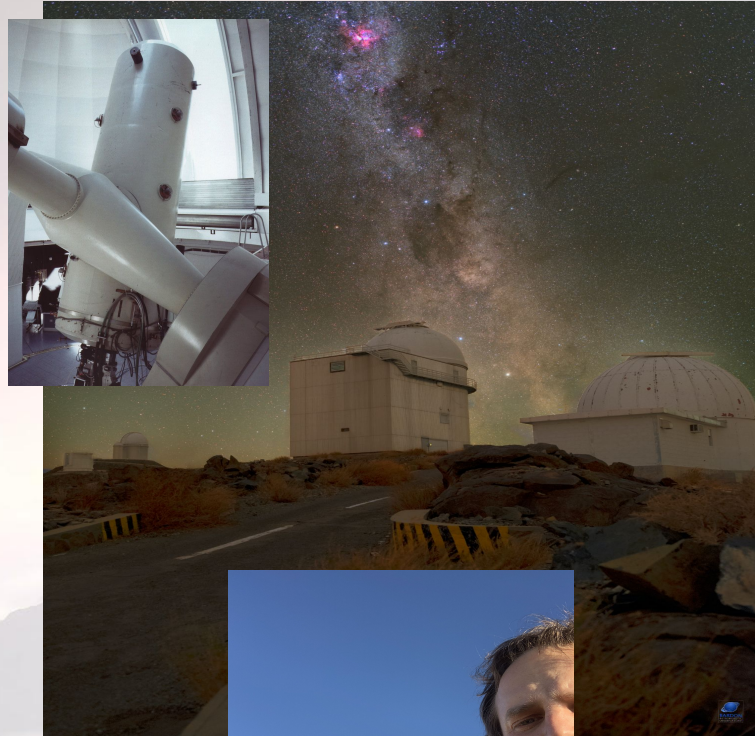
- PI Petr Kabáth
- od 2015 monitoring exoplanet a exoplanetárních kandidátů
- spolupráce v rámci KESPRINT, Tautenburg, IAC



- 2kx2k detektor chlazený kapalným dusíkem
- Vlnový rozsah – 380-9100 nm
- R=50000, limit ~12 mag
- Teplotně 'stabilní' ± 1 K
- 2019 upgrade na vláknový spektrograf

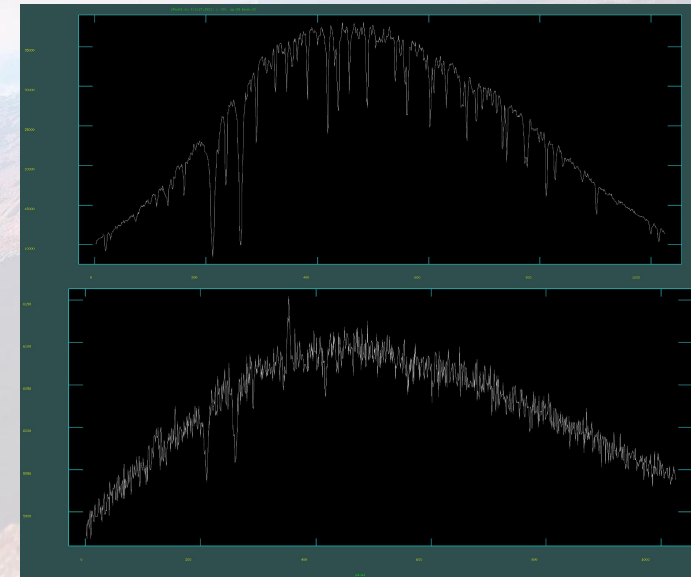
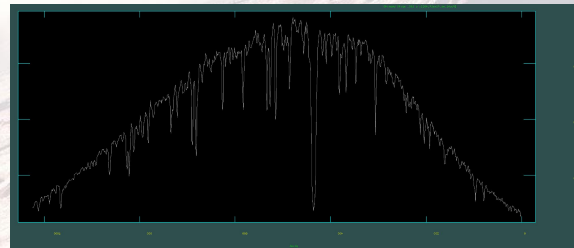
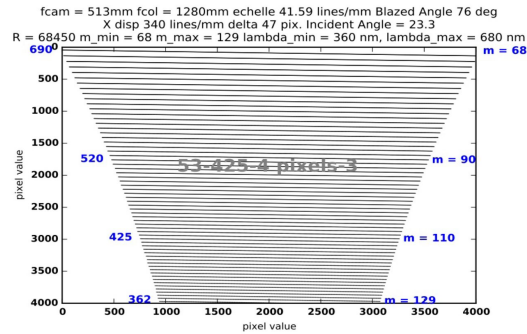
Výzkum exoplanet v ČR

PLATOSpec - vysokodisperzní echelleový spektrograf na 1.52m dalekohledu na La Silla, Chile
(2023)



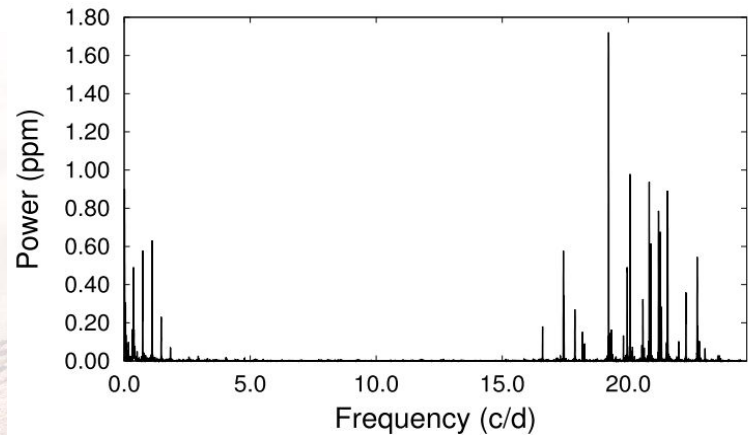
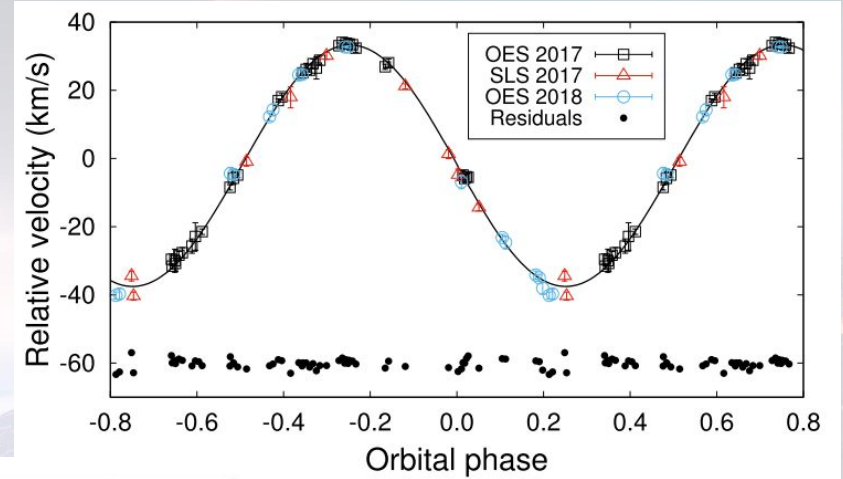
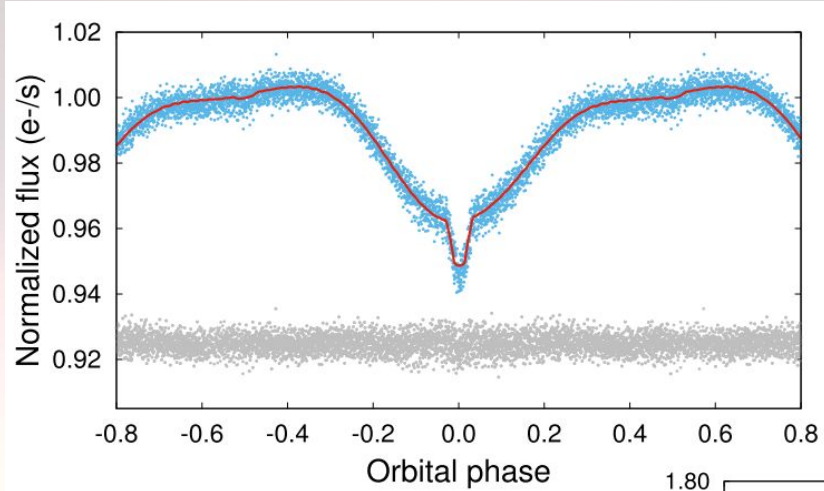
Vlnový rozsah
Rozlišovací schopnost
Teplotní stabilita
Přesnost měření
Kalibrace

360-680 nm
70000
0.1 K
3 m/s
ThAr + jodová baňka



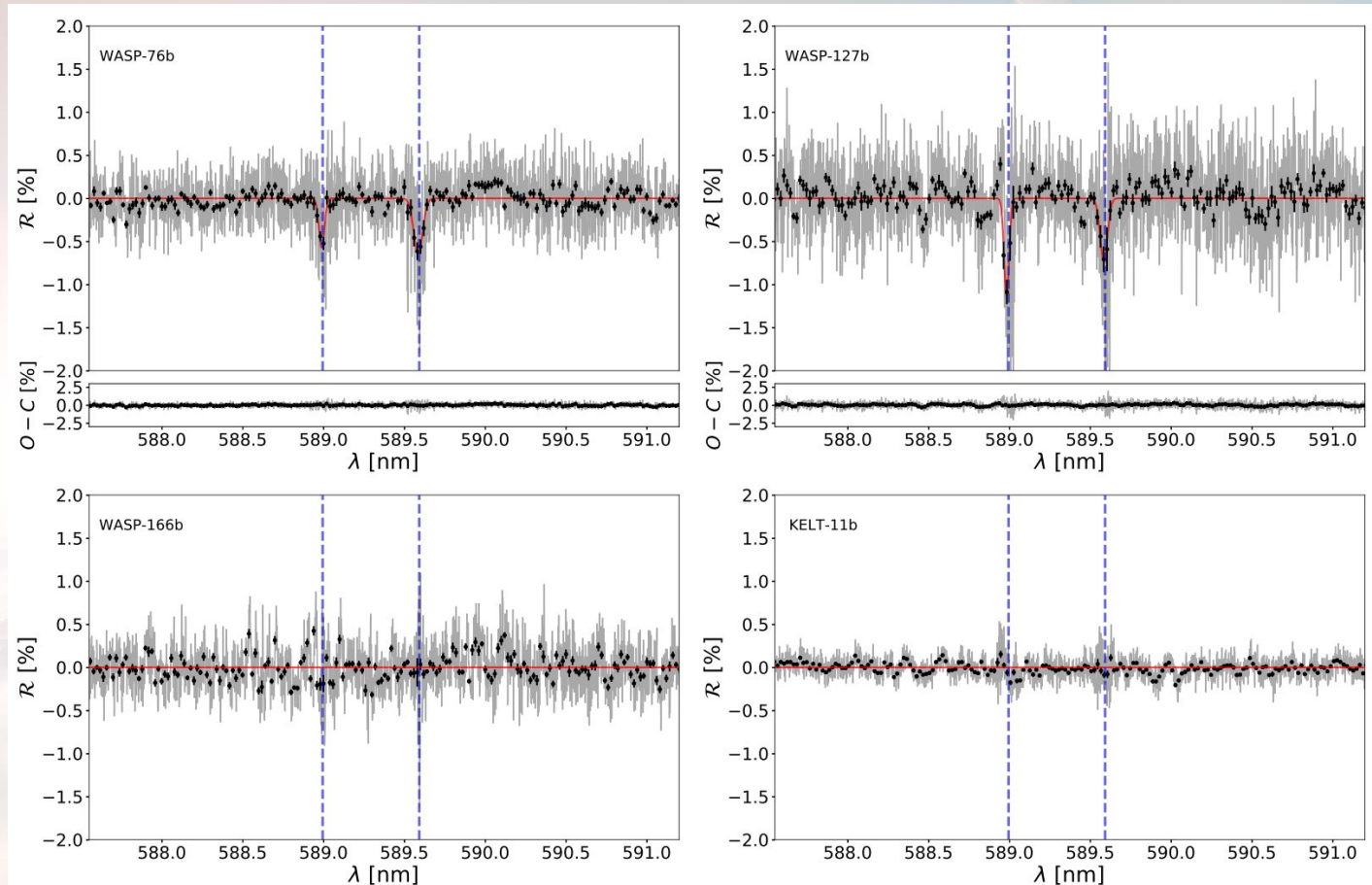
Výzkum exoplanet v ČR

Skarka et al. 2019, MNRAS, 487, 4230 – první mCP hvězda v zákrytové dvojhvěždě



Výzkum exoplanet v ČR

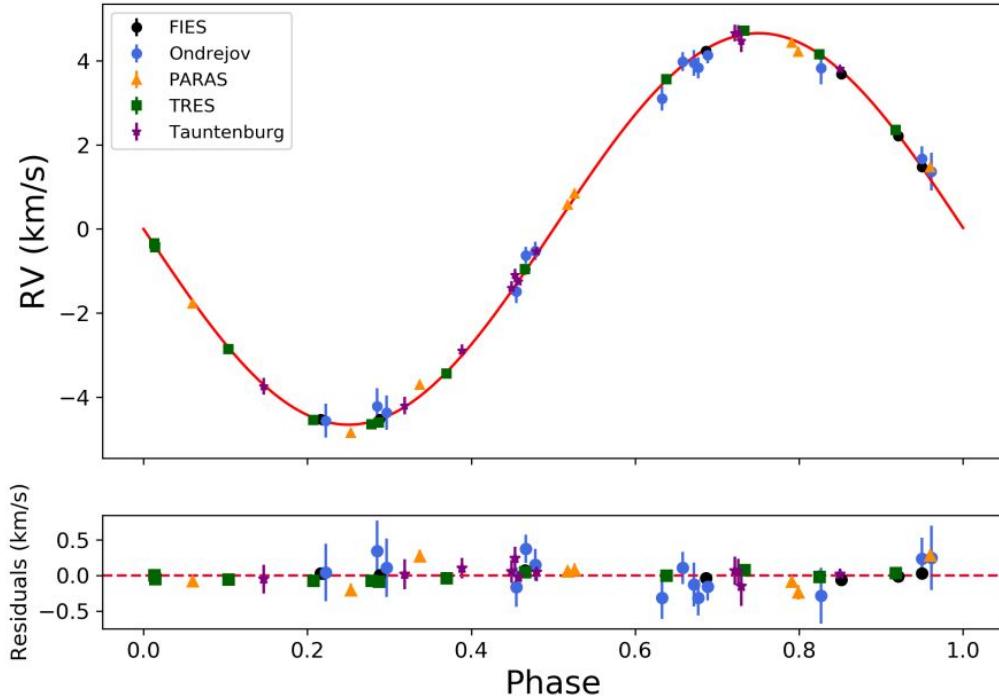
Žák et al. 2019, AJ, 158, 120 – detekce sodíku u dvou exoplanet v datech z HARPS



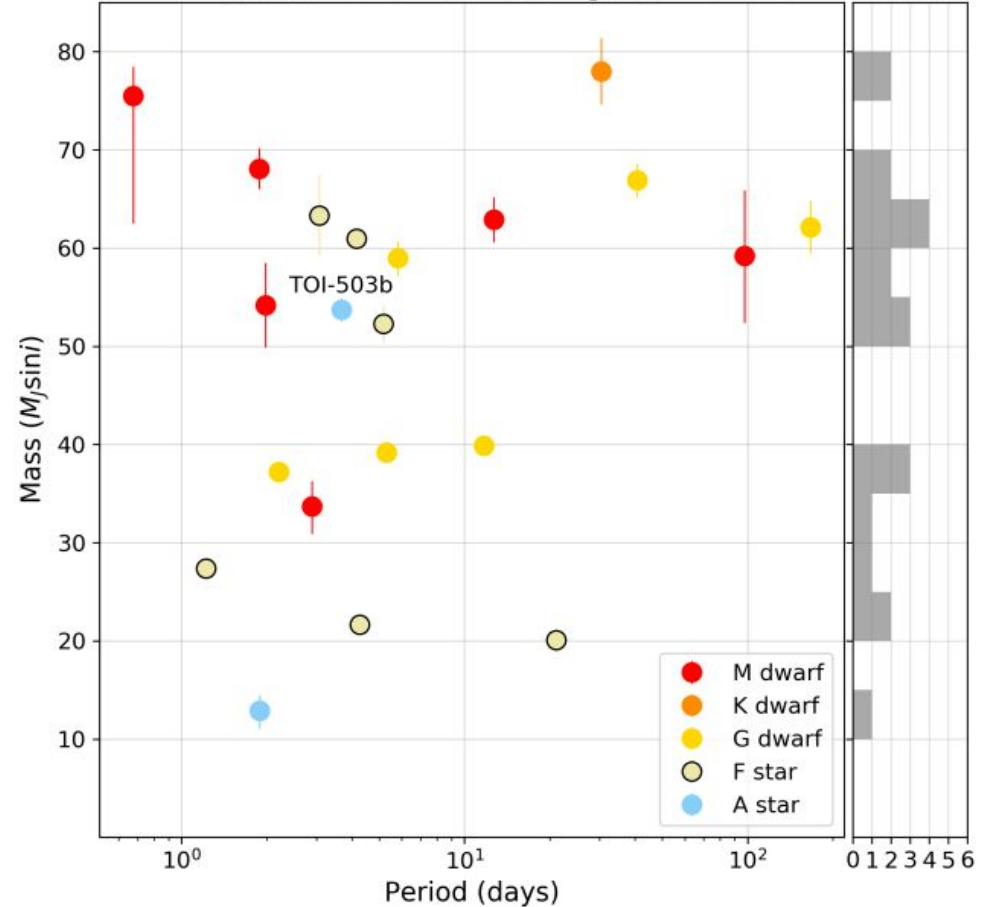
Výzkum exoplanet v ČR

Šubjak et al. 2020, AJ, 159, 151 – první BD z TESS u Am hvězdy

TOI-503 orbital solution

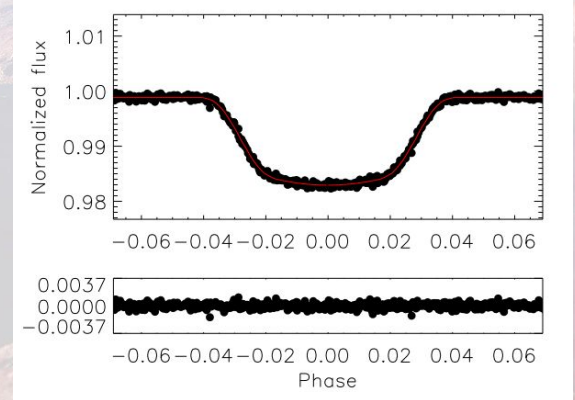
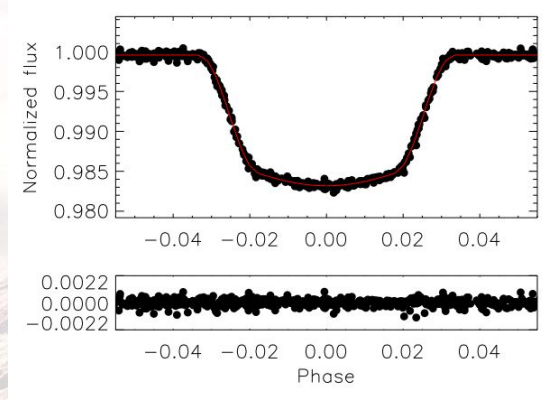
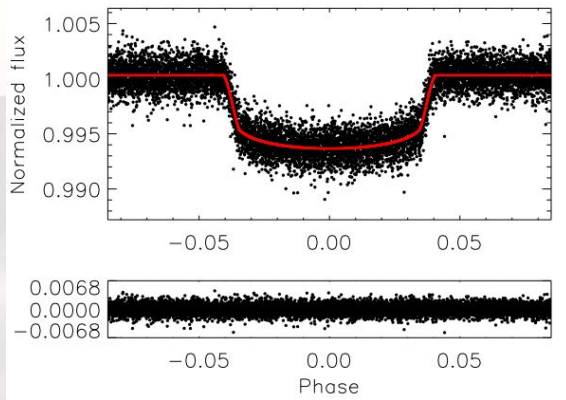
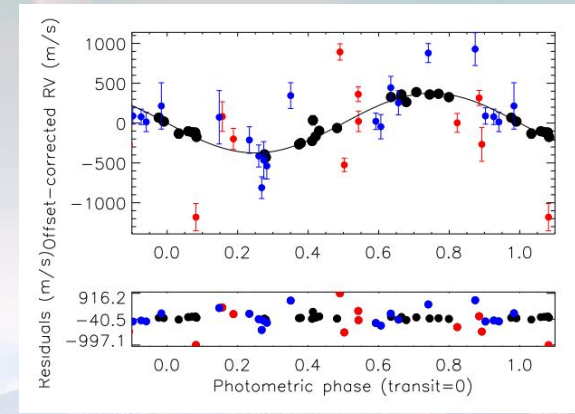
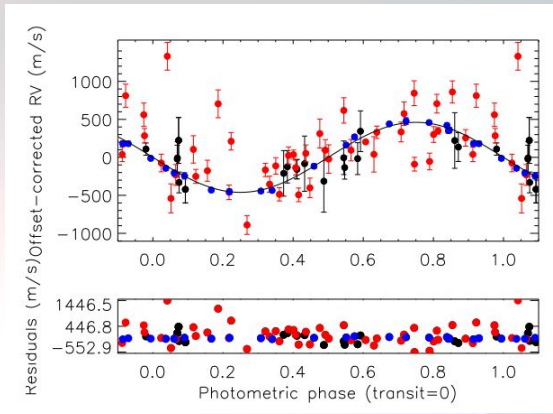
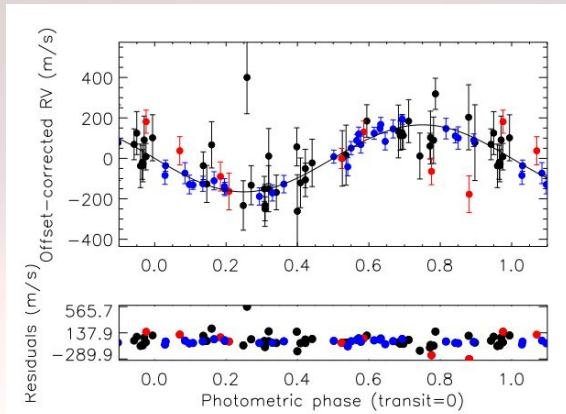


Mass distribution for transiting brown dwarfs



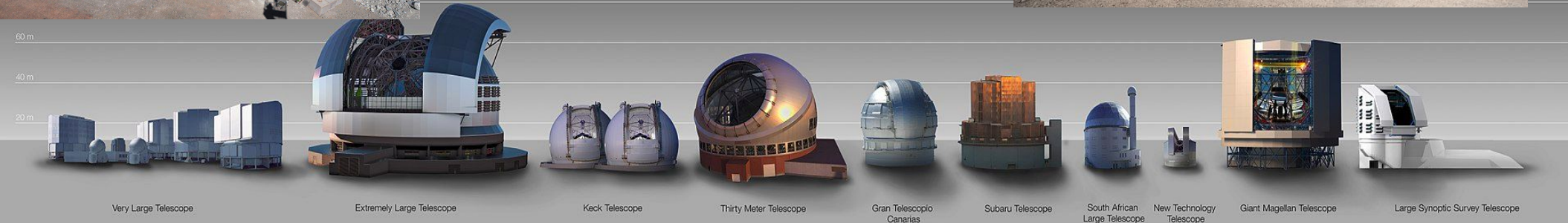
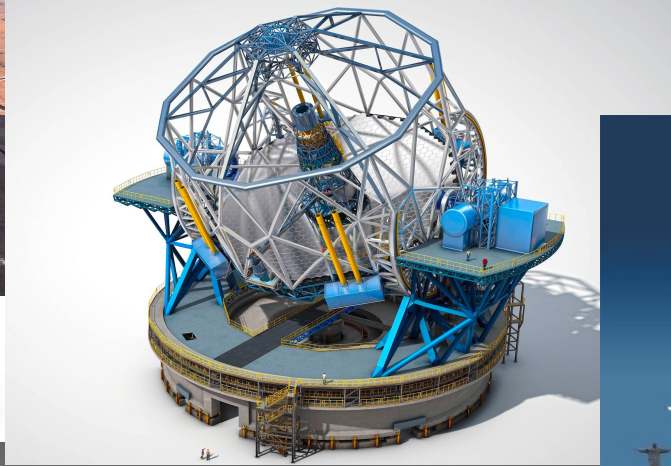
Výzkum exoplanet v ČR

Kabáth et al. 2022, MNRAS, 513, 5955, “TOI-2046b, TOI-1181b, and TOI-1516b, three new hot Jupiters from TESS: planets orbiting a young star, a subgiant, and a normal star” - první exoplanety potvrzené s příspěvím ČR



Budoucnost

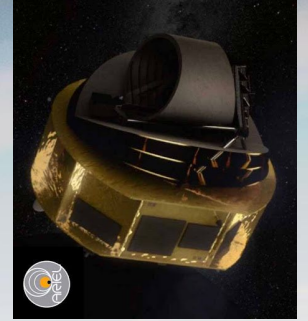
E-ELT, Cerro Armazones, průměr 39 m (798 1.4m zrcadel), 2025



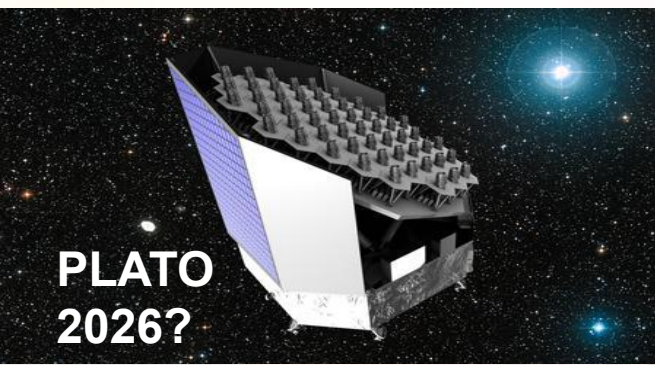
Budoucnost



ARIEL 2031?



Česká spolupráce – fyzikální ústav AV ČR



Česká spolupráce – výroba kontejnerů na přepravu kamer, testování CCD, software

