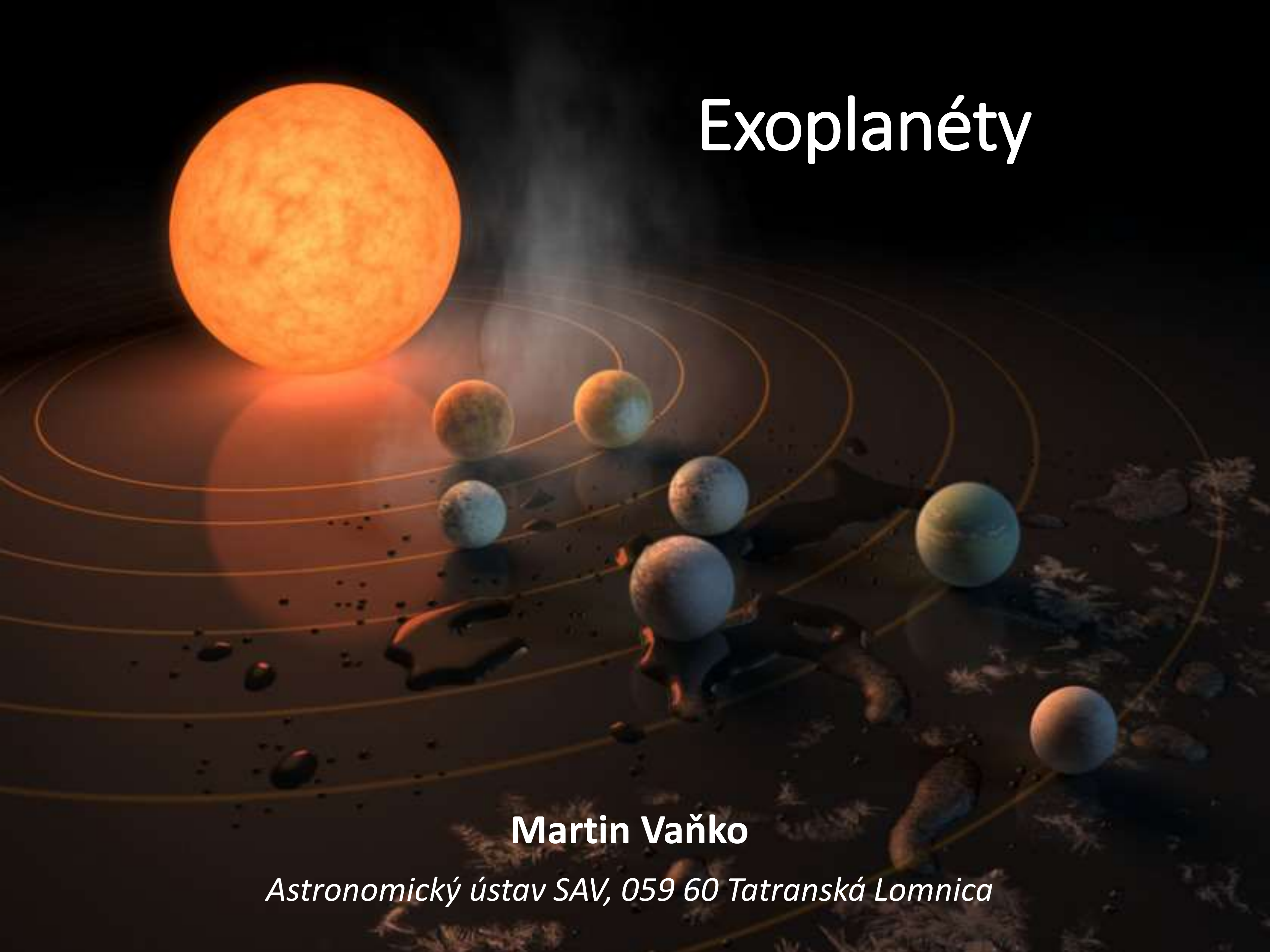


Exoplanéty

Martin Vaňko

Astronomický ústav SAV, 059 60 Tatranská Lomnica

Úvaha

Slnečná sústava:

- 8 planét

Ostatné hviezdy:

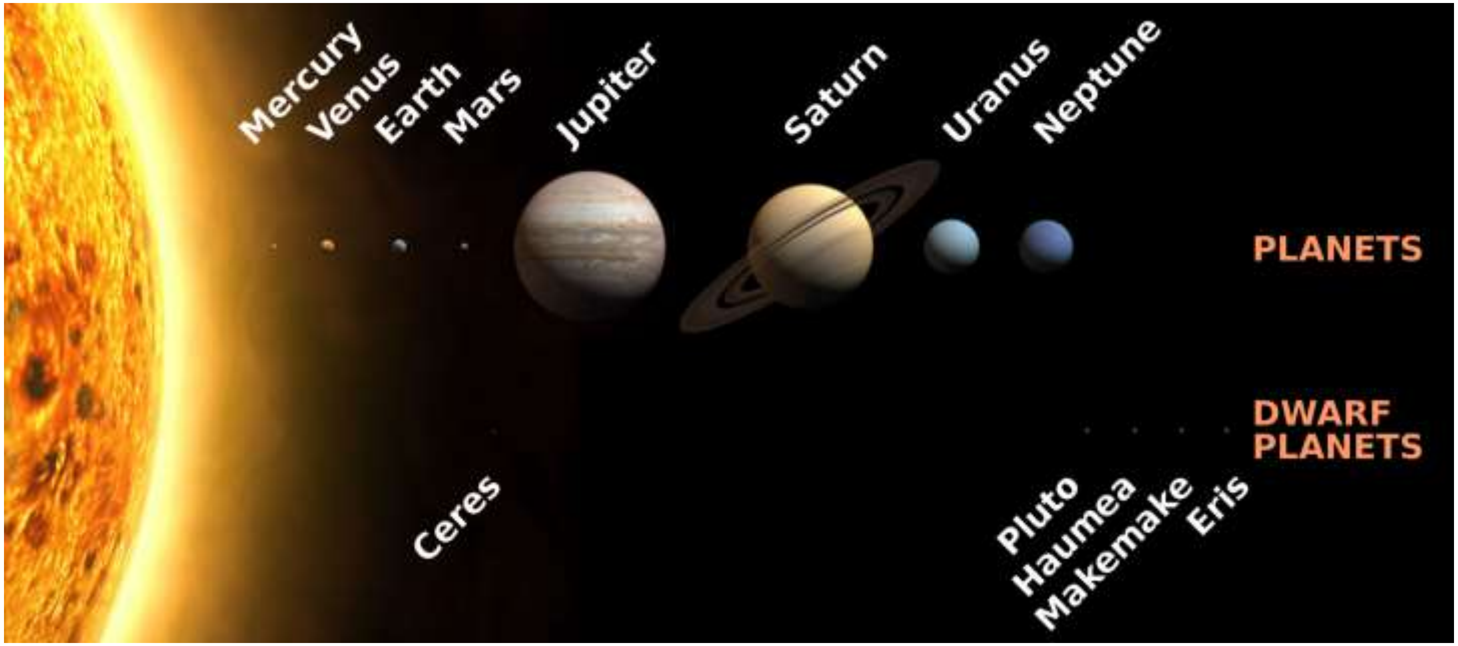
- tisíce kandidátov

Extrasolárna planéta – planéta „mimo Slnka"
Exoplanéta – trochu lepší názov
Planéta – všeobecný názov
Planéta Slnečnej sústavy – špecifický názov

Definícia

Planéta podľa IAU:

- Obieha okolo Slnka
- Má dostatočnú hmotnosť na udržanie približne guľového tvaru (hydrostatická rovnováha)
- „Vyčistila" svoje okolie



Definícia

Exoplanéta:

- *Nepoužíva sa definícia planéty podľa IAU*

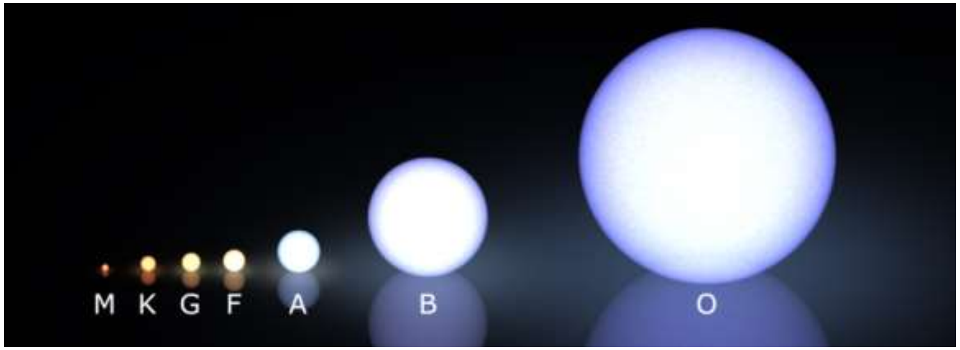
- Planéta obiehajúcu hviezdu inú ako Slnko, ktorej hmotnosť je nižšia ako 13 M Jupitera.
- Objekty v intervale hmotností: 13 - 80 M_{Jup}, spaľovanie deutéria $\Longrightarrow$ hnedý trpaslík
- Objekty s M nad 80 M_{Jup} $\Longrightarrow$ termonukleárna premena vodíka na hélium

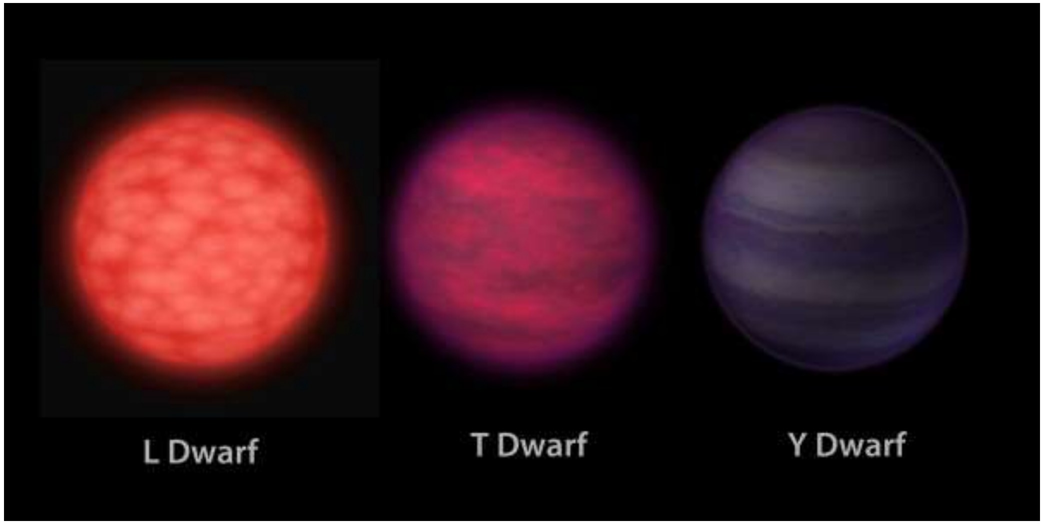
Definícia

Hnedí trpaslíci alebo veľké planéty?

	T [K]	Popisná farba
O	>33 000	Modrá
B	10 000-33 000	Modro-biela
A	7 500-10 000	Biela
F	6 000-7 500	Žlto-biela
G	5 200-6 000	Žltá
K	3 700-5 200	Oranžová
M	2 000-3 700	Červená
L	1 300-2 000	Červeno-hnedá
T	700-1 300	Hnedá
Y	<700	Tmavohnedá

0°C = 273 K



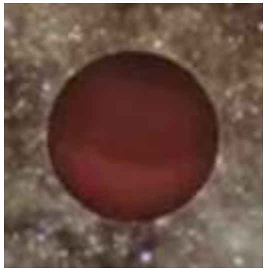


Definícia

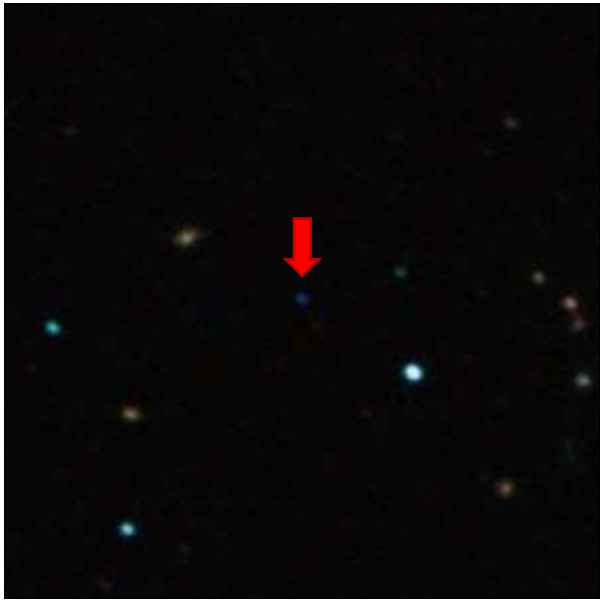
Osamelá planéta:

- Voľné objekty s vhodnou hmotnosťou, ktoré neobiehajú okolo hviezd („planemo“, „rogue planets“, „ free-floating planets”)
- Unikli zo sústavy po zrážke, alebo sú to hnedí trpaslíci
- Vyžarujú zvyškové teplo

	M [M_J]
CFBDSIR 2149-0403	14-17


Viditeľné svetlo

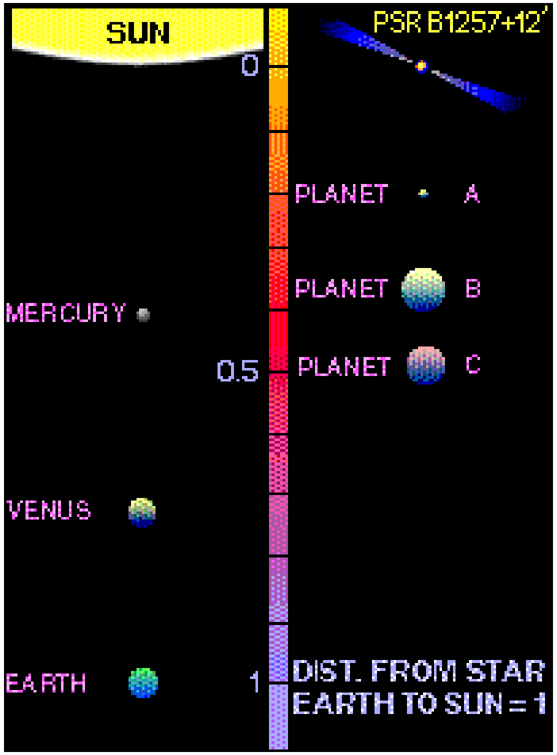

Infračervené svetlo



História

- 21.4.1992:
  Wolszczan & Frail – prvé 3 planéty (pulzar PSR 1257+12)

	M [$M_{\oplus}$]	d [AU]	P [d]
b	0,02	0,19	25,262
c	4,3	0,36	66,542
d	3,9	0,46	98,211



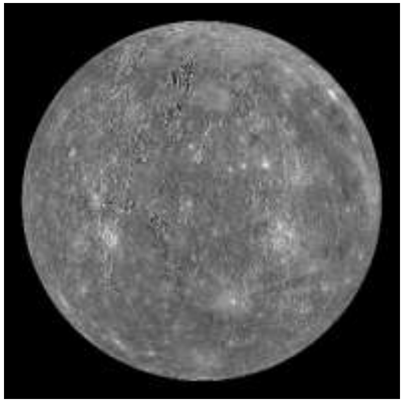
História

- 6.10.1995: Mayor & Queloz – prvá exoplanéta pri „normálnej“ hviezde (51 Peg)

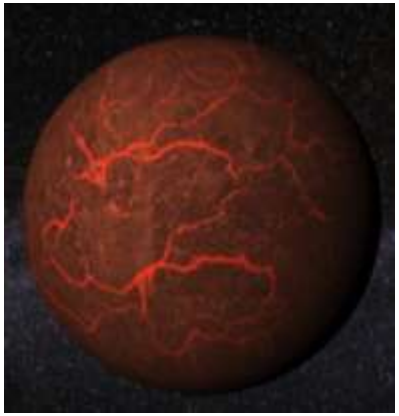
	M [M_J]	d [AU]	P [d]
b	0,472+	0,053	4,23

História

- 16.10.2012: viacerí autori – exoplanéta veľkosti Zeme (α Cen)

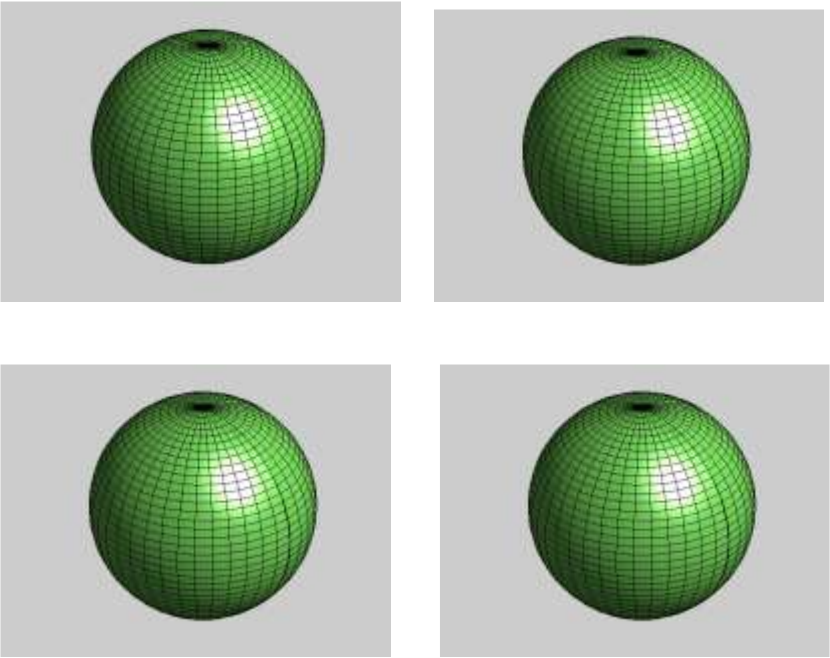


	Merkúr	α Cen Bb
P [d]	87,969	3,24
M [$M_{\oplus}$]	0,055	>1,13
R [$R_{\oplus}$]	0,383	1
d [AU]	0,387	0,04
T [°C]	67	877
ESI	0,39	0,27



História

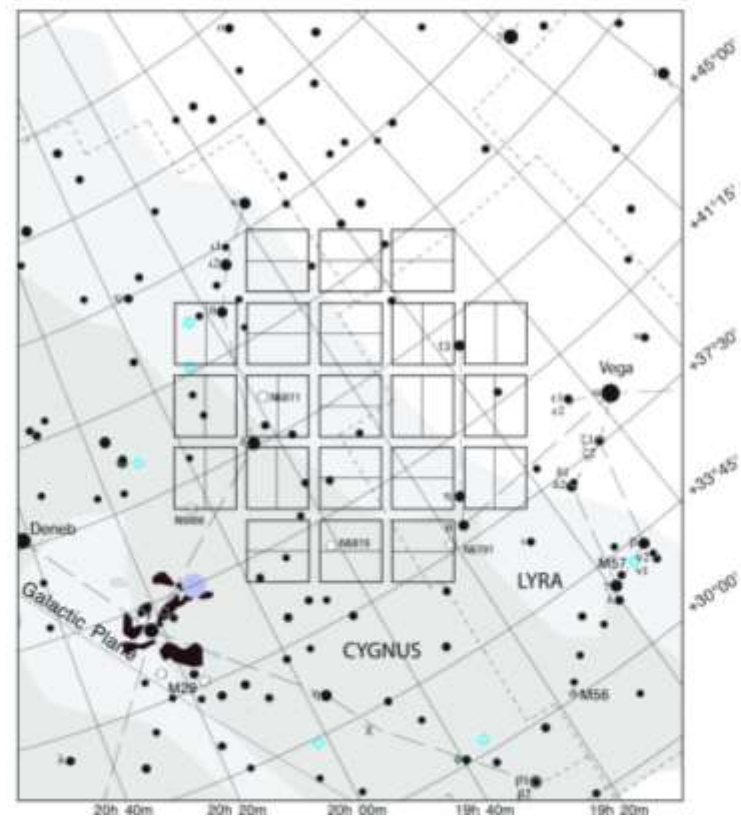
- 27.12.2006: štart teleskopu ***CoRoT*** *(***Co**nvection **Ro**tation and planetary **T**ransits*)*
- 2013: koniec misie



- priemer zrkadla: 27 cm
- polárna orbita (900 km)
- 4 CCD kamery (16 Mpix)
- zorné pole 3.5 deg^2
- 32 exoplanét

História

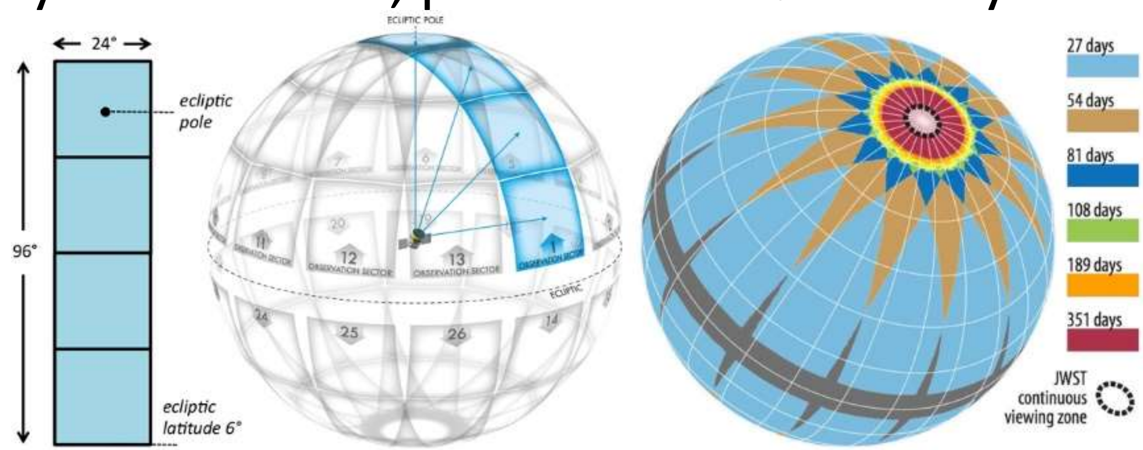
- 7.3.2009: štart teleskopu ***KEPLER***



  - priemer zrkadla: 0,95 m
  - heliocentrická dráha (P=372,5 d)
  - 42 CCD čipov (95 Mpix!)
  - zorné pole 116 deg^2
  - pozorovacie okno: 430 – 890 nm
  - limit hviezd: 9 – 16 mag
  - Október 2017: 5011 kandidátov
  - Potvrdených 2512 exoplanét

Práve teraz...

- 18.4.2018: The **T**ransiting **E**xoplanet **S**urvey **S**atellite (**TESS**)
- Hľadanie tranzitujúcich exoplanét na ploche ~ 400x väčšej ako to bolo v prípade Kepler projektu
- Jasné hviezdy v okolí Slnka, prehliadka 85% oblohy.



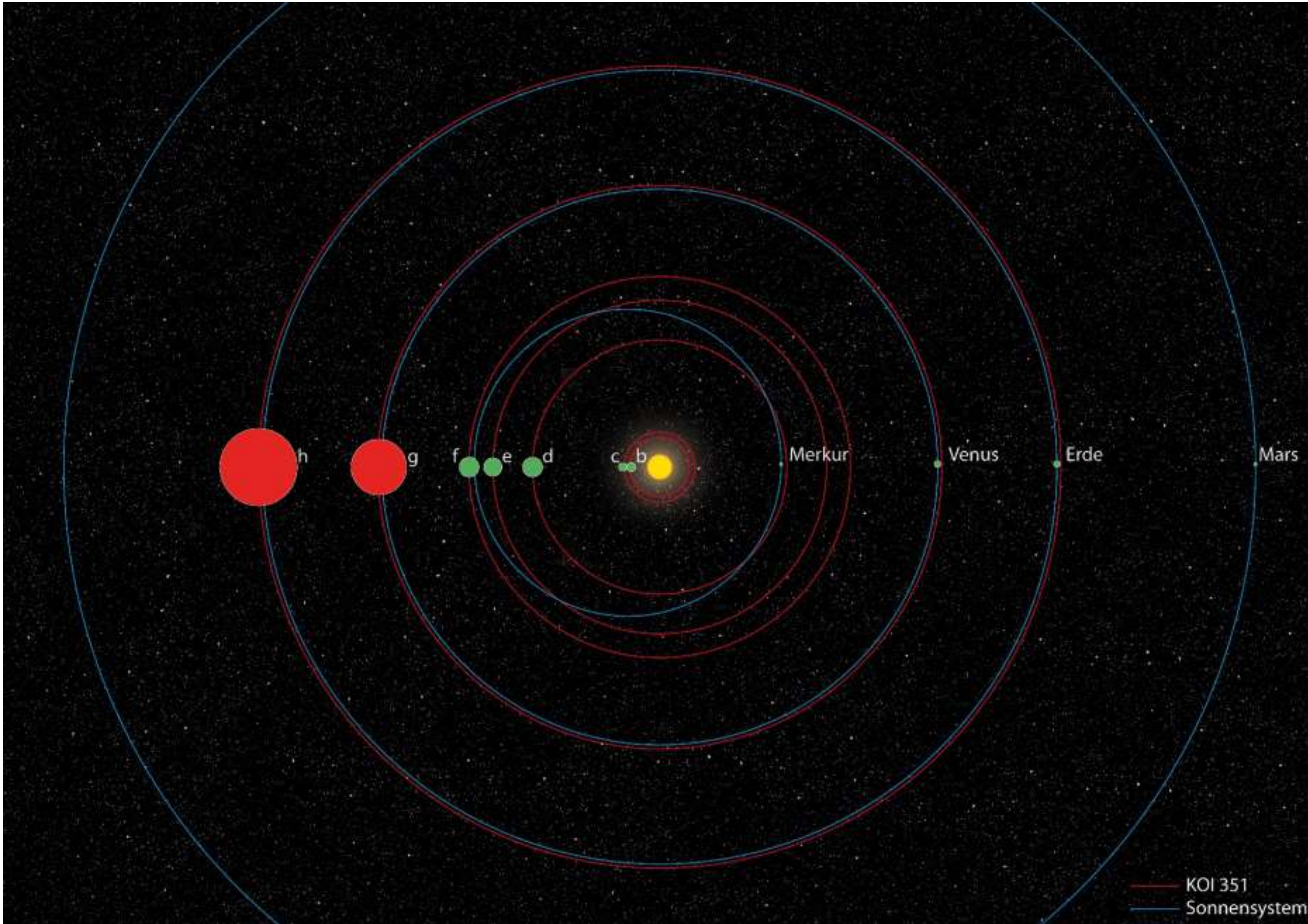
Štatistka

(podľa http://exoplanet.org)

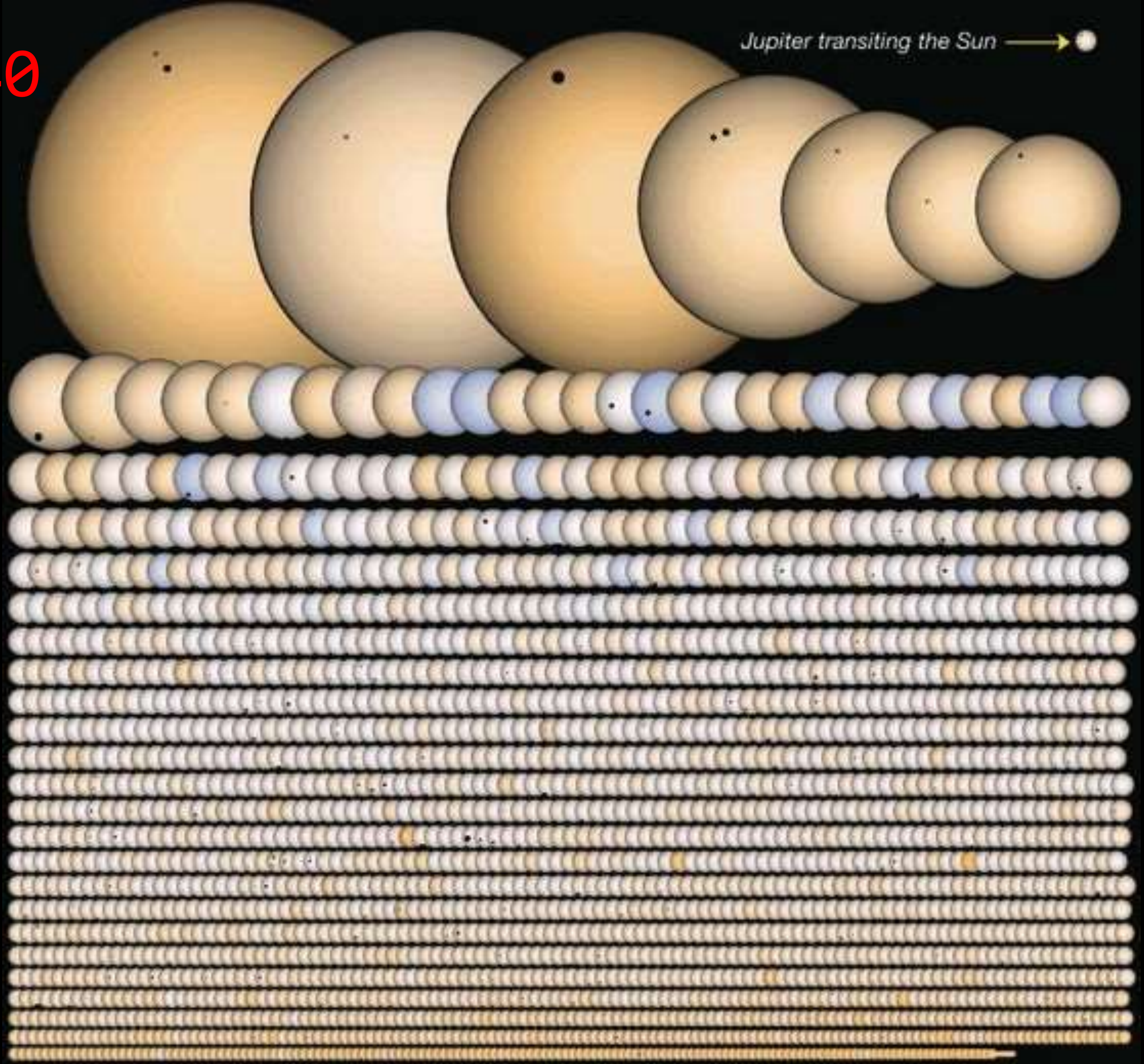
K 15.11.2018:

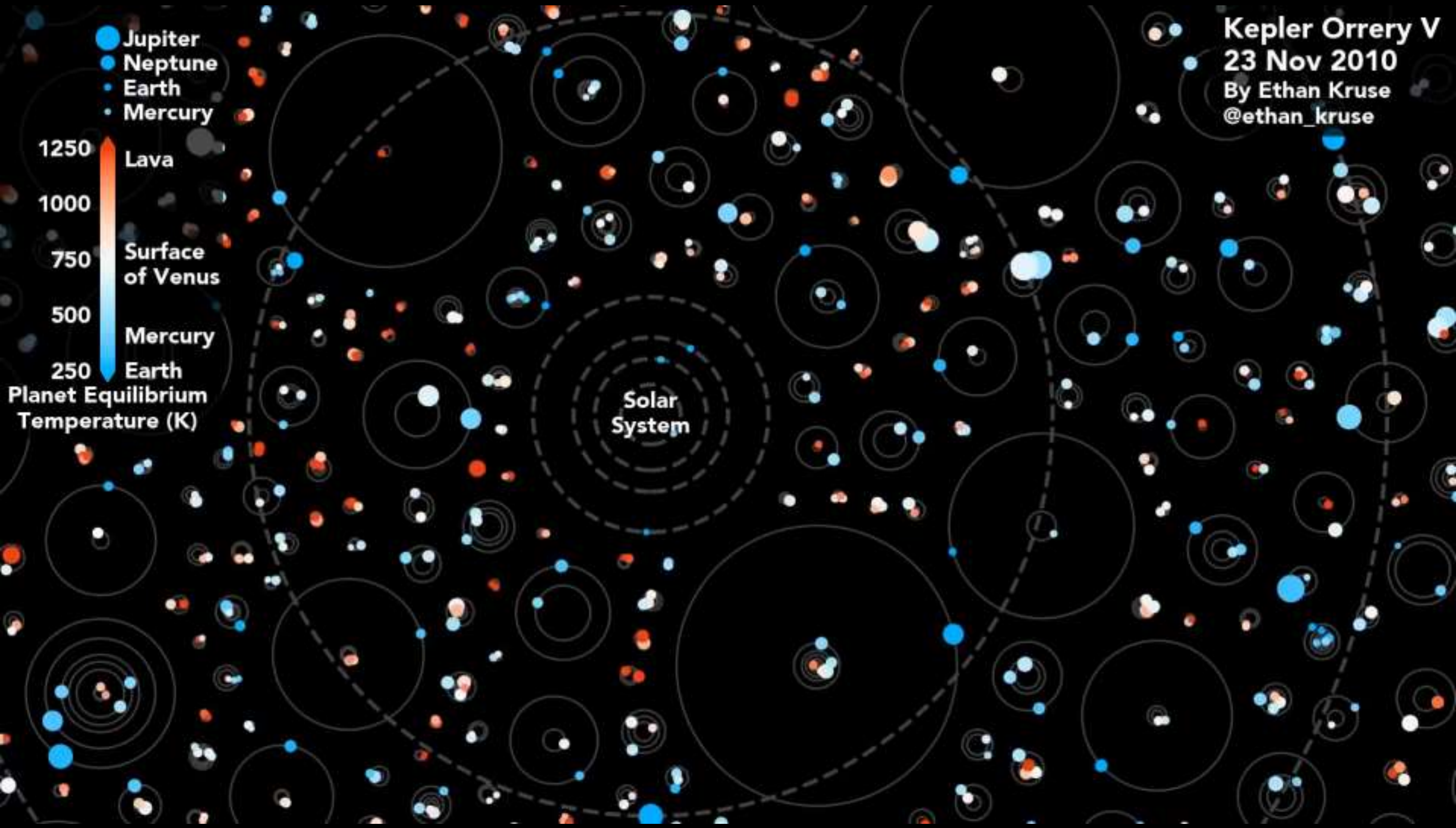
- > 5000 nepotvrdených kandidátov
- 3 838 potvrdených planét
- 2 896 exoplanetárnych sústav
- v 645 viacnásobné sústavy
- najpočetnejšia: HD10180 - 7 planét

Kepler-90 - 7 planét


h
g
f
e
d
c
b
Merkur
Venus
Erde
Mars
KOI 351
Sonnensystem

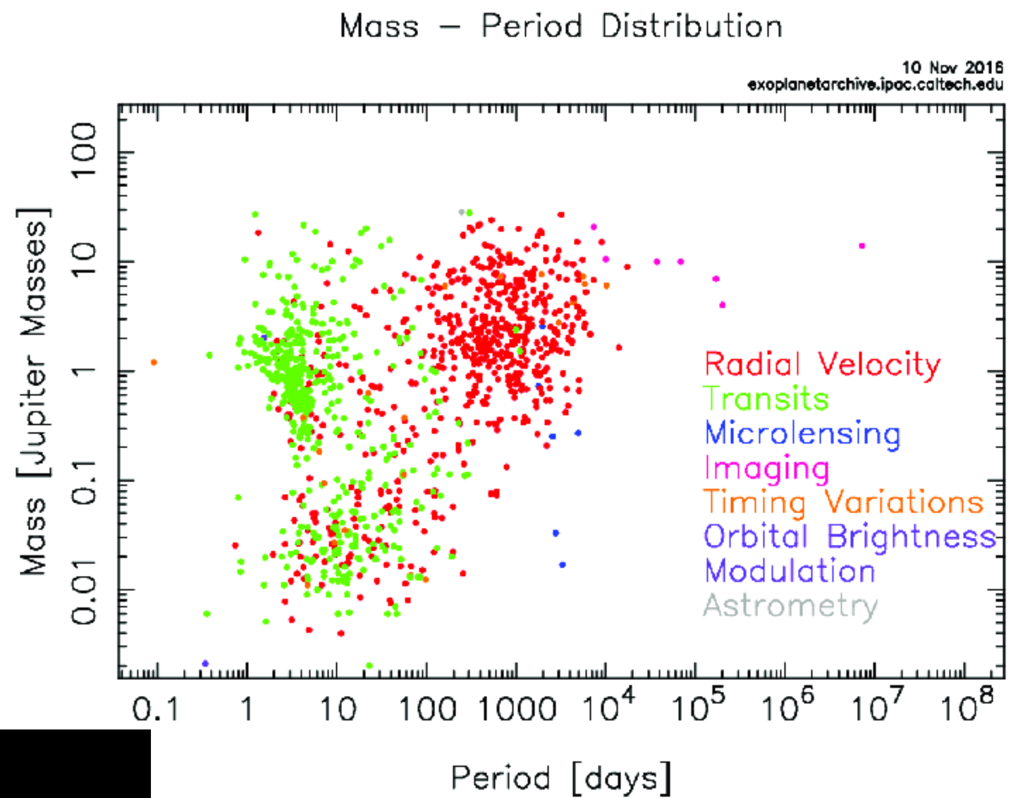
2740

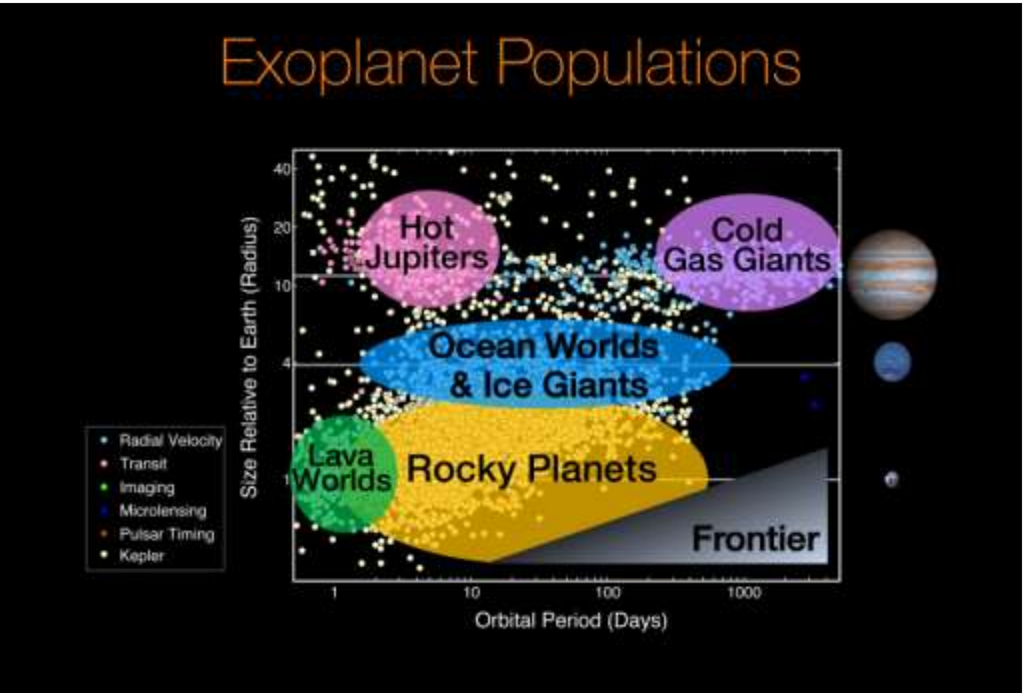




Jupiter
Neptune
Earth
Mercury
1250
Lava
1000
750
Surface of Venus
500
Mercury
250
Earth
Planet Equilibrium Temperature (K)
Kepler Orrery V
23 Nov 2010
By Ethan Kruse
@ethan_kruse
Solar System

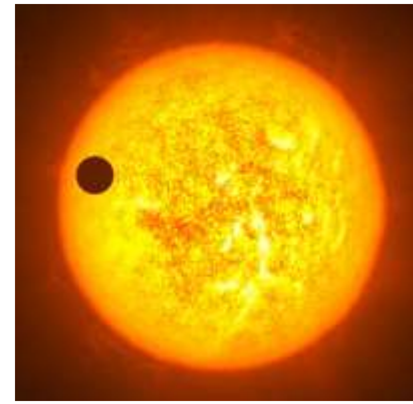
Ako ich hľadáme?

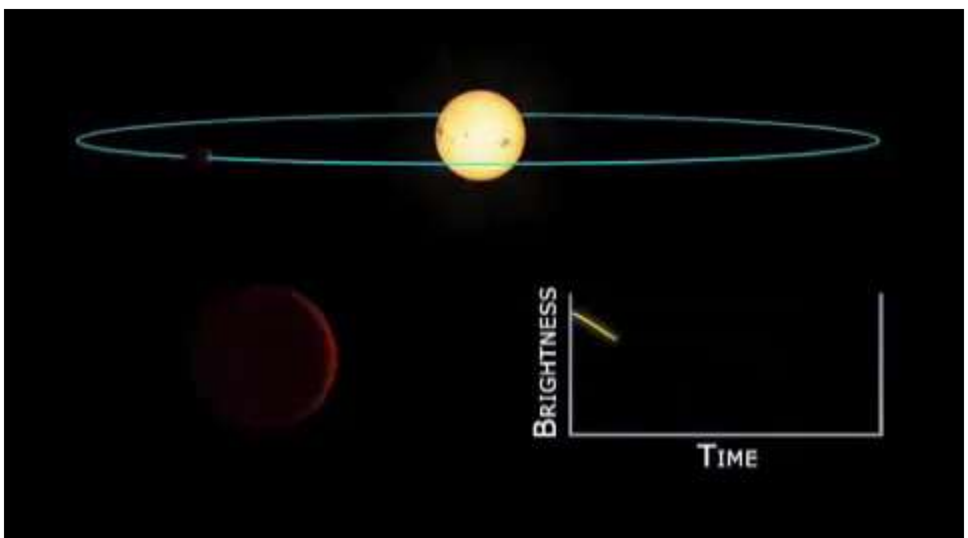


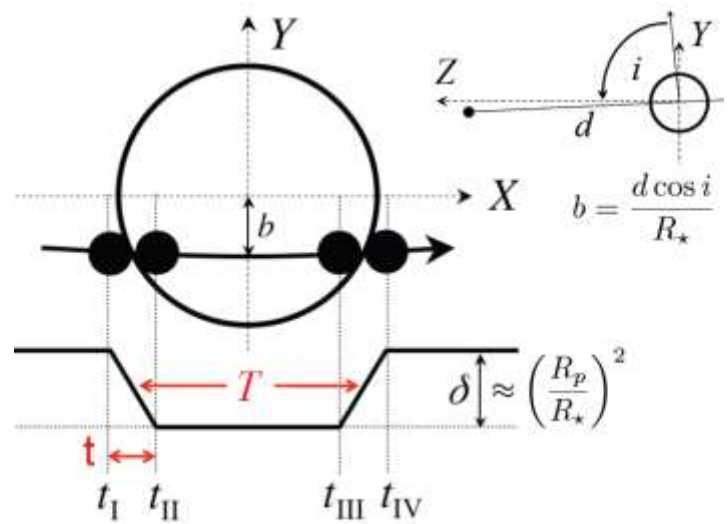


Tranzity

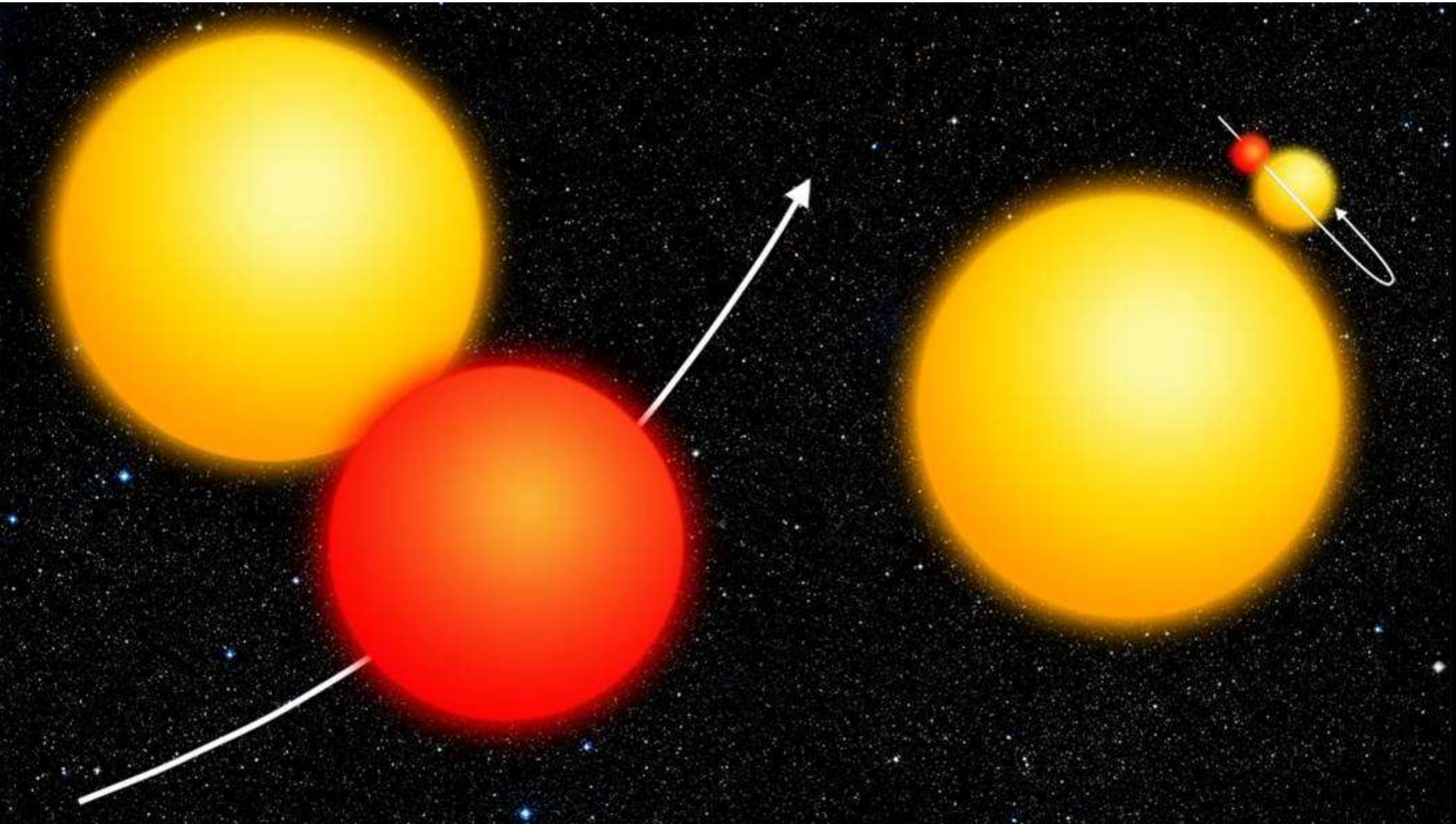
	Venuša	WASP-12b
$R_\star$ [$R_\odot$]	1,00	1,57
M [M▯]	0,815	441,742
R [R▯]	0,95	20,06
d [AU]	0,723	0,023
T [°C]	735	2525



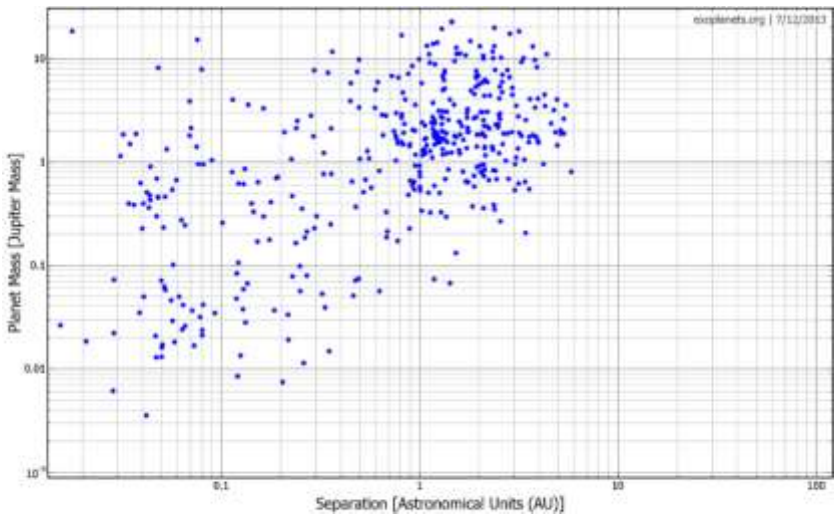


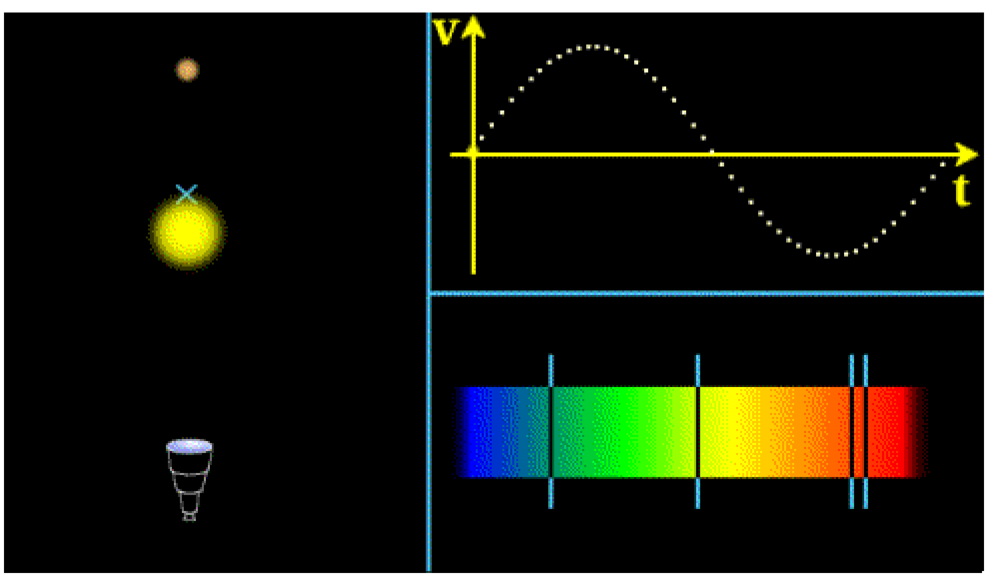


Falošné exoplanéty

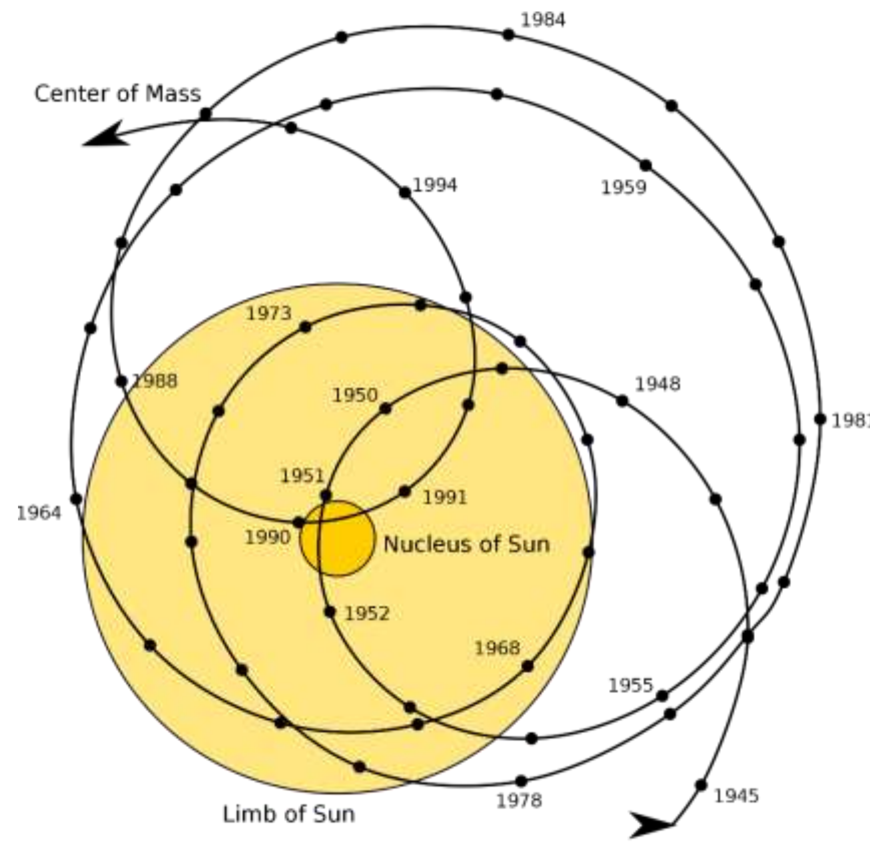


Radiálne rýchlosti





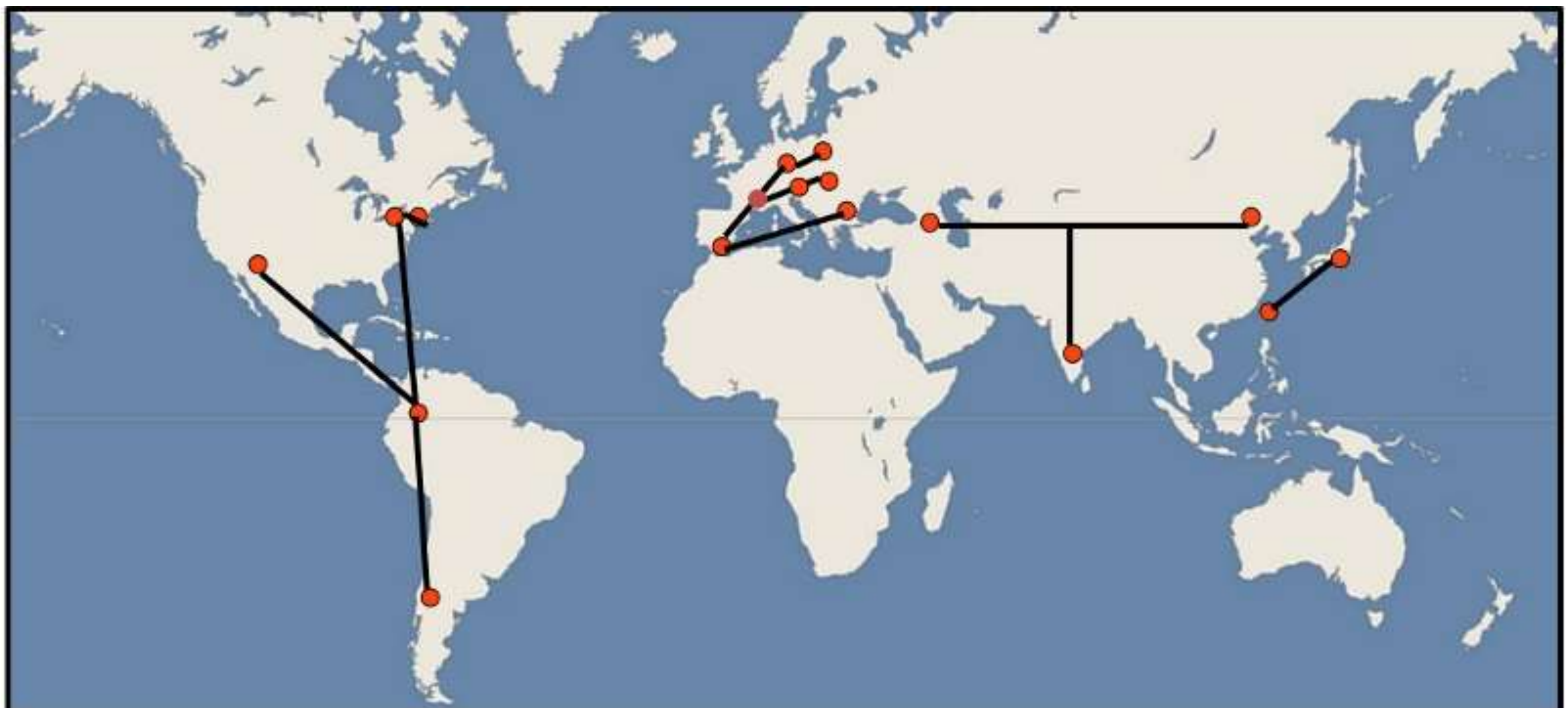
Pohyb ťažiska Slnečnej sústavy



Exoplanéty na Slovensku

Projekt YETI =

Young Exoplanet Transit Initiative

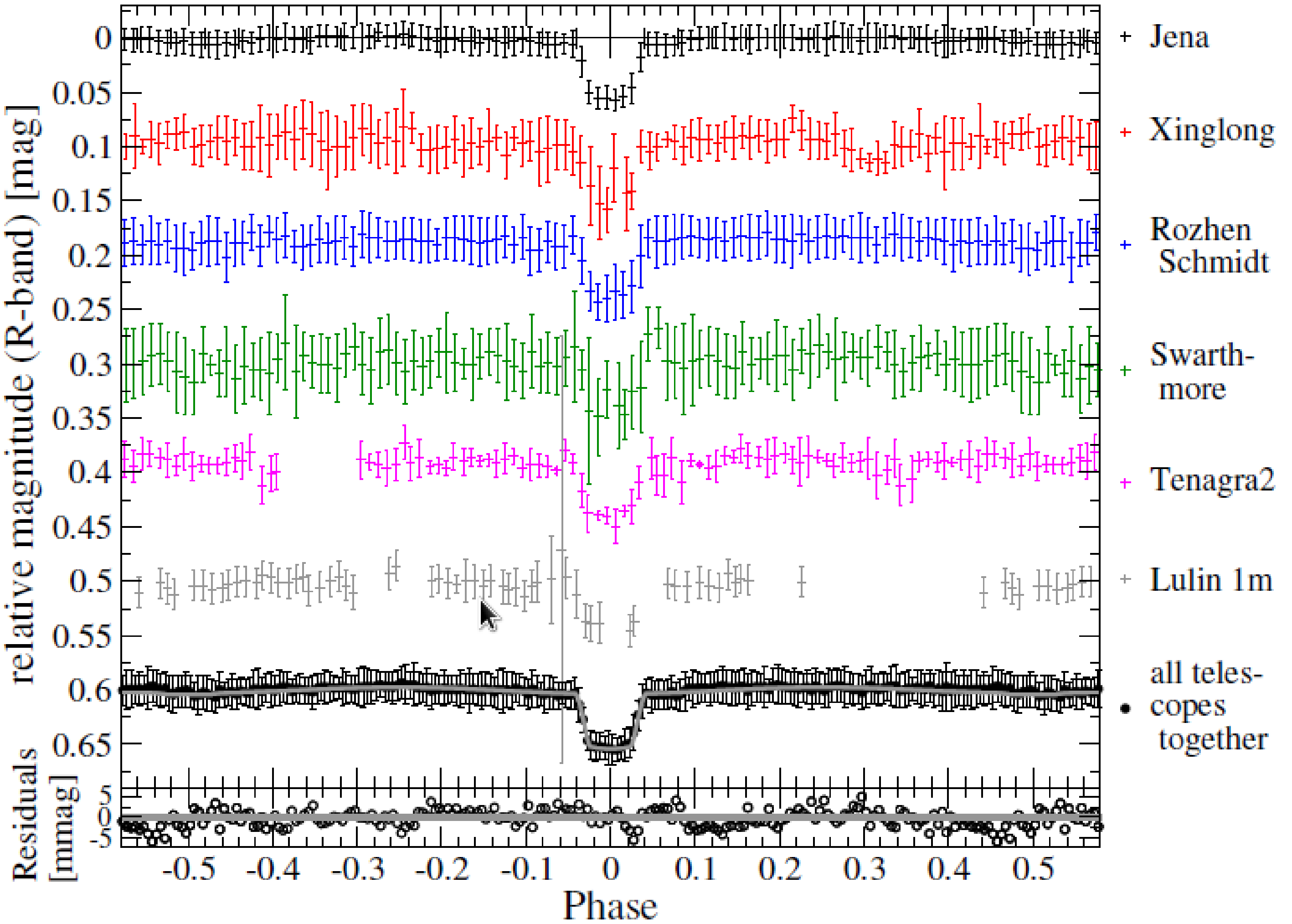


YETI (začiatok 2010)

- Cieľ: detekcia tranzitujúcich exoplanét obiehajúcich hviezdy v mladých (< 100 mil. rokov) a relatívne blízkych (< 1 kpc) vybraných otvorených hviezdokopách.
- Kandidáti: Tr-37, 25 Ori, NGC 7243, IC 348
- Observatória: v súčasnosti > 20 observatórii pokrývajúcich rovnomerne zemep. dĺžku ⇒

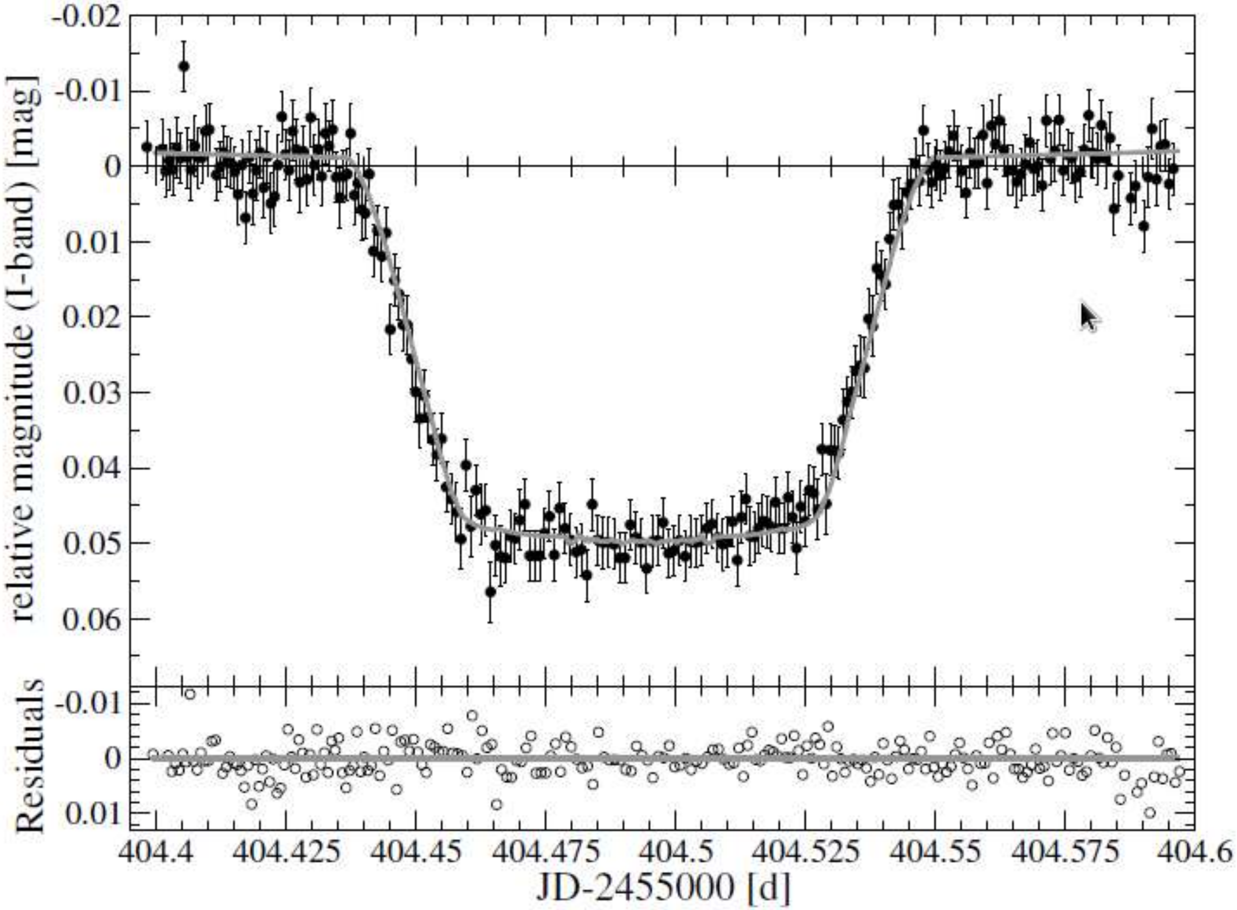
  kontinuálne pozorovania – trvajúce týždne

YETI



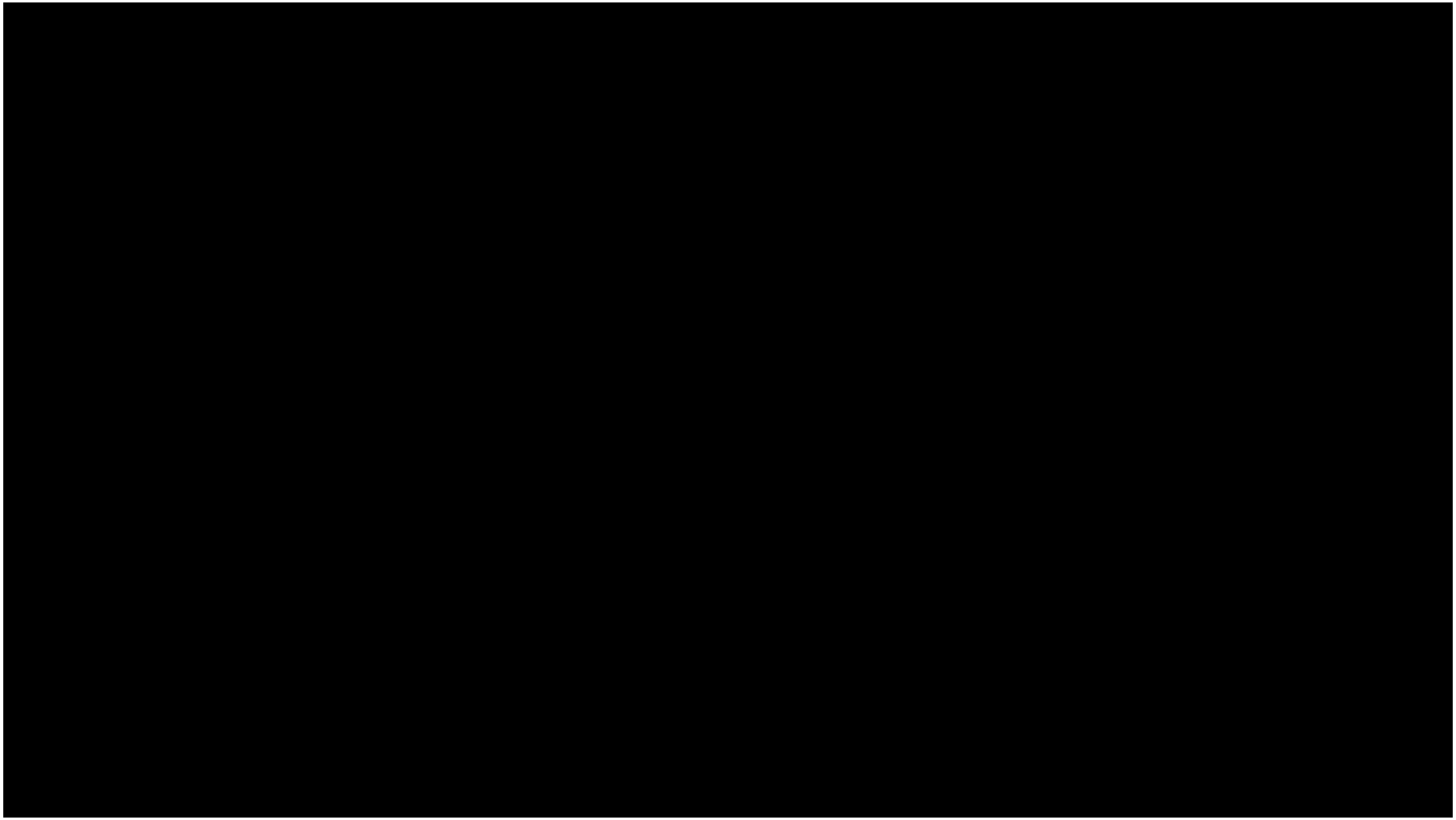
relative magnitude (R-band) [mag]
Residuals [mmag]
Phase
Jena
Xinglong
Rozhen Schmidt
Swarth-more
Tenagra2
Lulin 1m
all teles-copes together

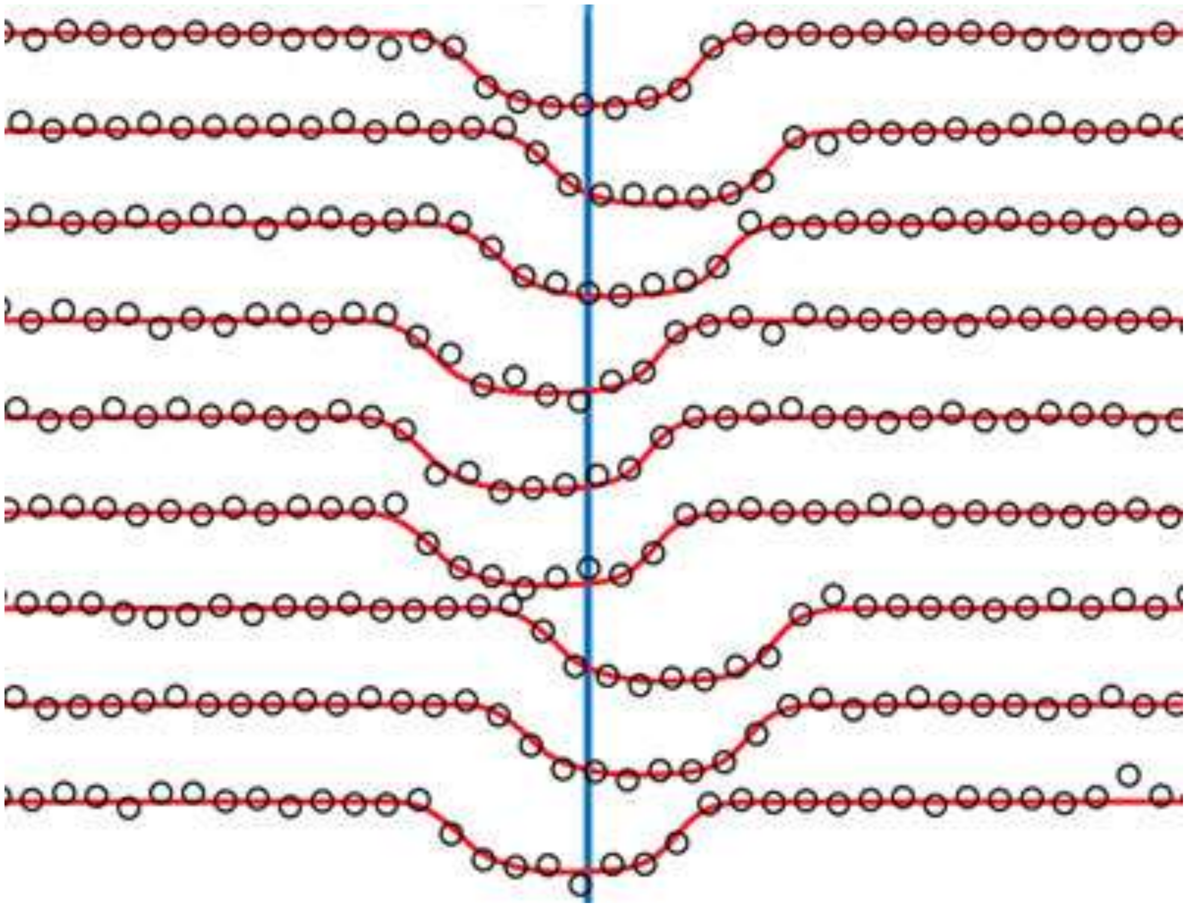
YETI

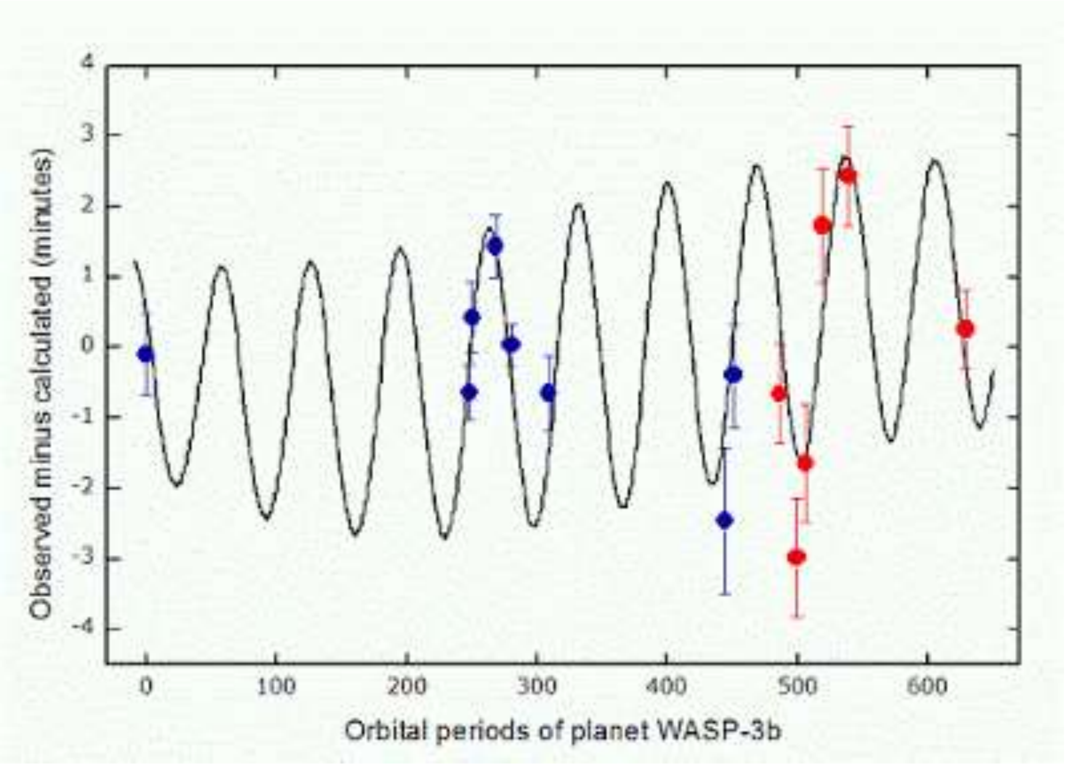


relative magnitude (I-band) [mag]
-0.02
-0.01
0
0.01
0.02
0.03
0.04
0.05
0.06
Residuals
-0.01
0
0.01
404.4
404.425
404.45
404.475
404.5
404.525
404.55
404.575
404.6
JD-2455000 [d]

Už máme "Jupiter", a čo ďalšie...?







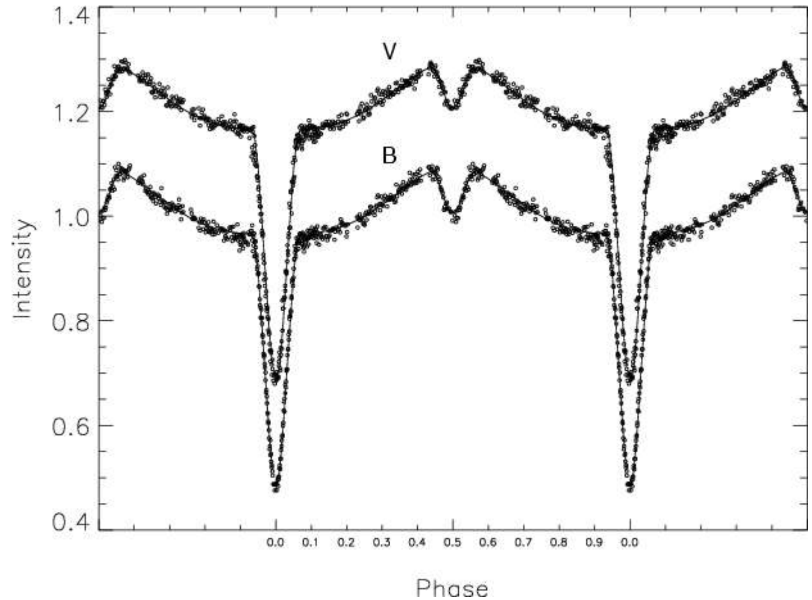
Observed minus calculated (minutes)
Orbital periods of planet WASP-3b
4
3
2
1
0
-1
-2
-3
-4
0
100
200
300
400
500
600

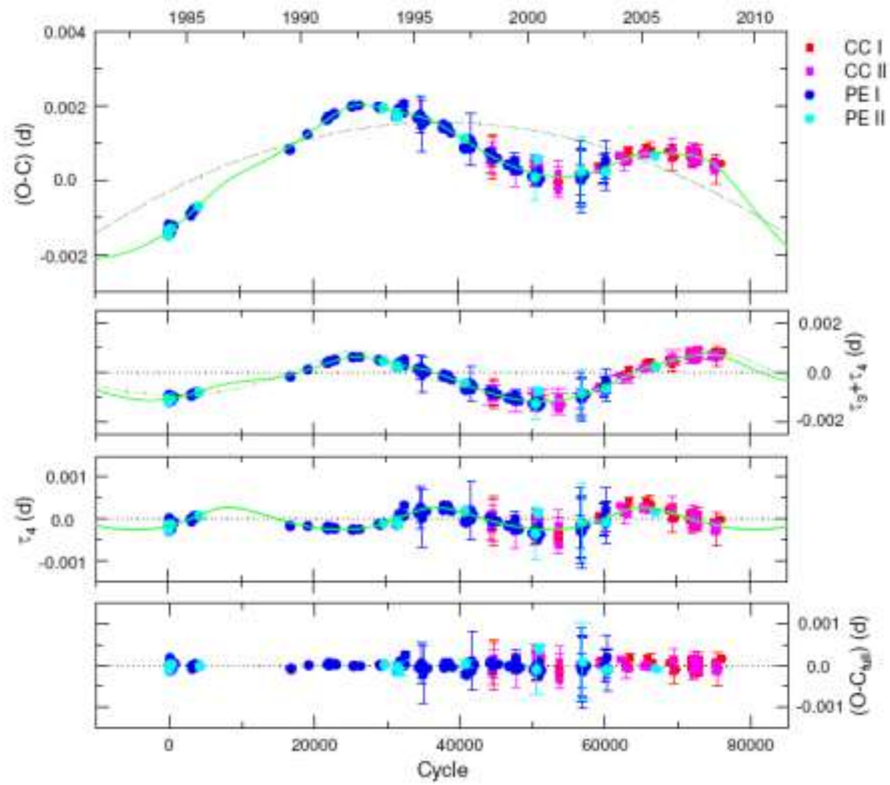
DWARF

- Cieľ: detekcia *cirkumbinárnych planét* - exoplanét

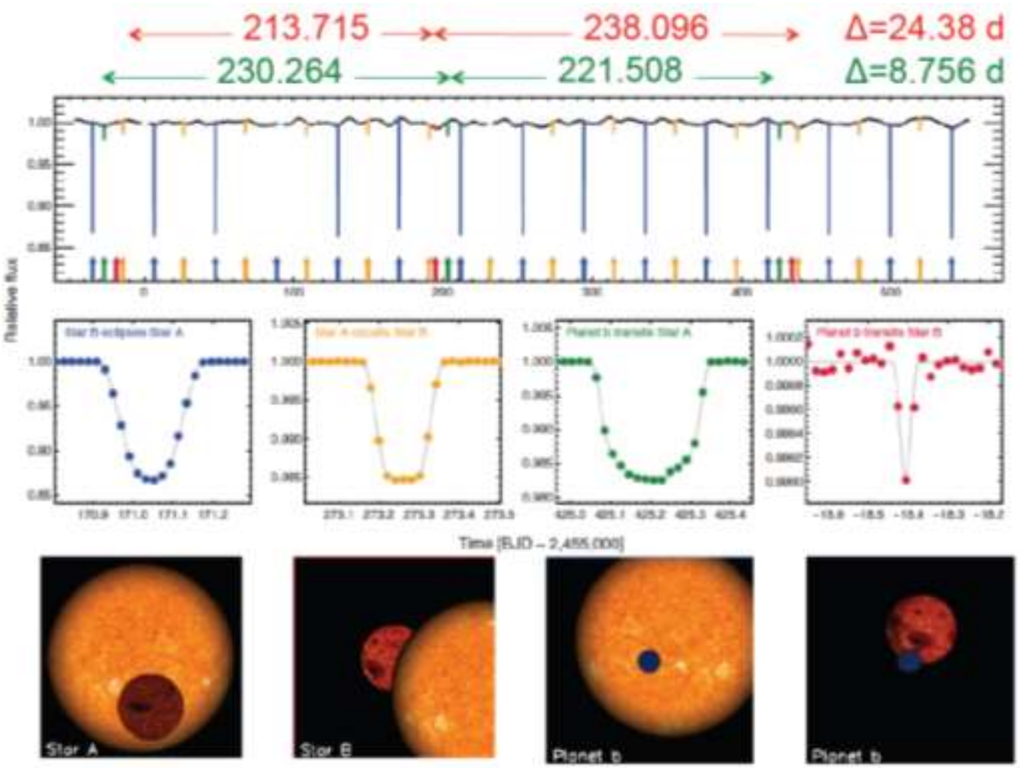
- Materská hviezda – málo hmotná dvojhviezda (zložky – sp. typ M a K, biely trpaslík a horúci podtrpaslík sp. typu O a B)
- Metóda: časovanie okamihov miním (angl. timing), prítomnosť planéty spôsobuje zdanlivé zmeny obežnej periódy dvojhviezdy ⇒ O-C reziduá

- S klesajúcou hmotnosťou dvojhviezdy narastá amplitúda týchto zmien, čo zvyšuje šancu detegovať exoplanétu.
- Amplitúda zmien narastá s orbitálnou periódou tretej zložky v sústave
- Plánovaná dĺžka projektu 5 – 10 rokov.


V
B
Intensity
Phase
1.4
1.2
1.0
0.8
0.6
0.4
0.0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 0.0


1985 1990 1995 2000 2005 2010
CC I
CC II
PE I
PE II
(O-C) (d)
0.004
0.002
0.0
-0.002
$\tau_3+\tau_4$ (d)
0.002
0.0
-0.002
τ_4 (d)
0.001
0.0
-0.001
$(O-C_{full})$ (d)
0.001
0.0
-0.001
0 20000 40000 60000 80000
Cycle

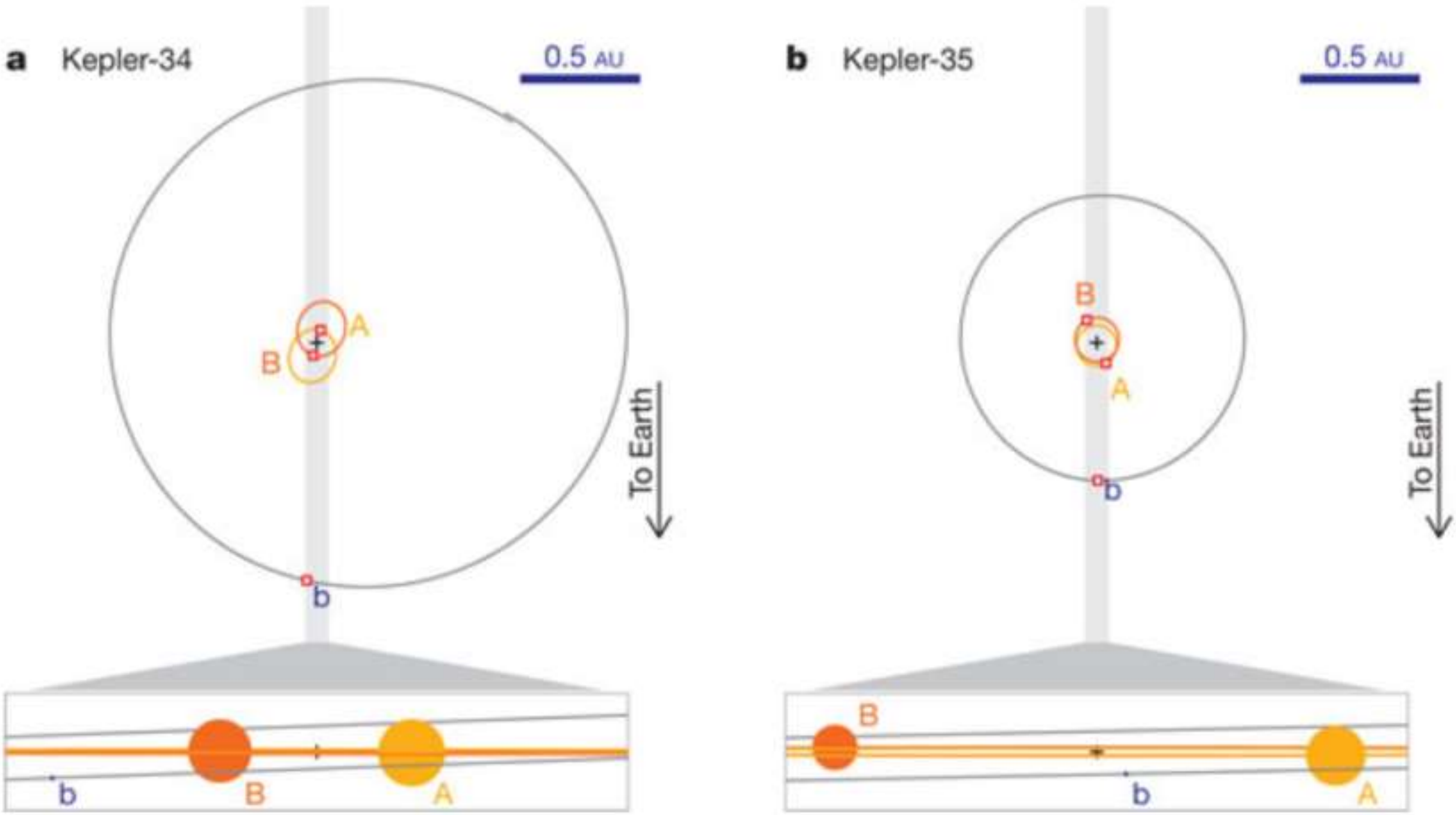
Dvojhviezdne sústavy



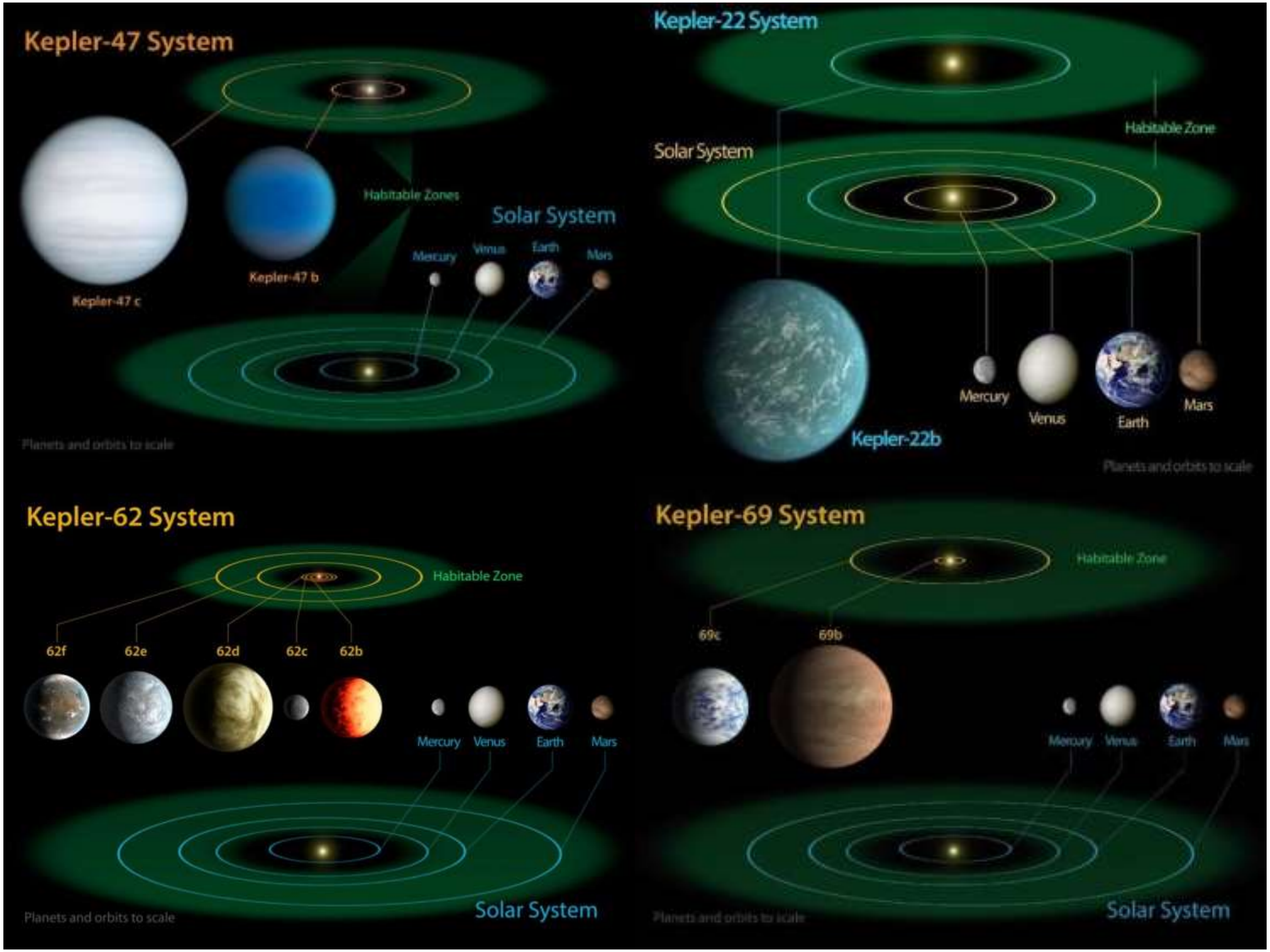
Tatooine (Hviezdne vojny)

Kepler-16b

Dvojhviezdne sústavy

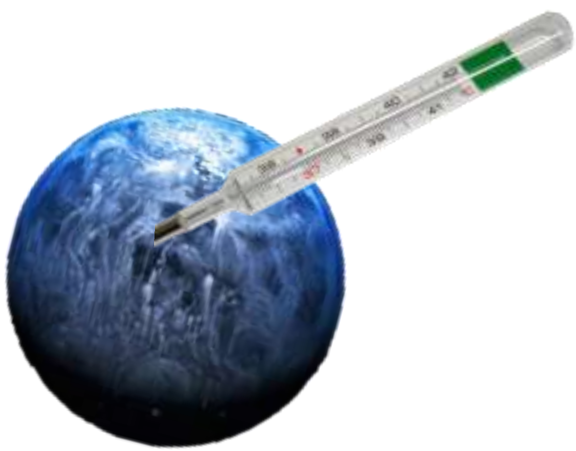


Planetárne sústavy



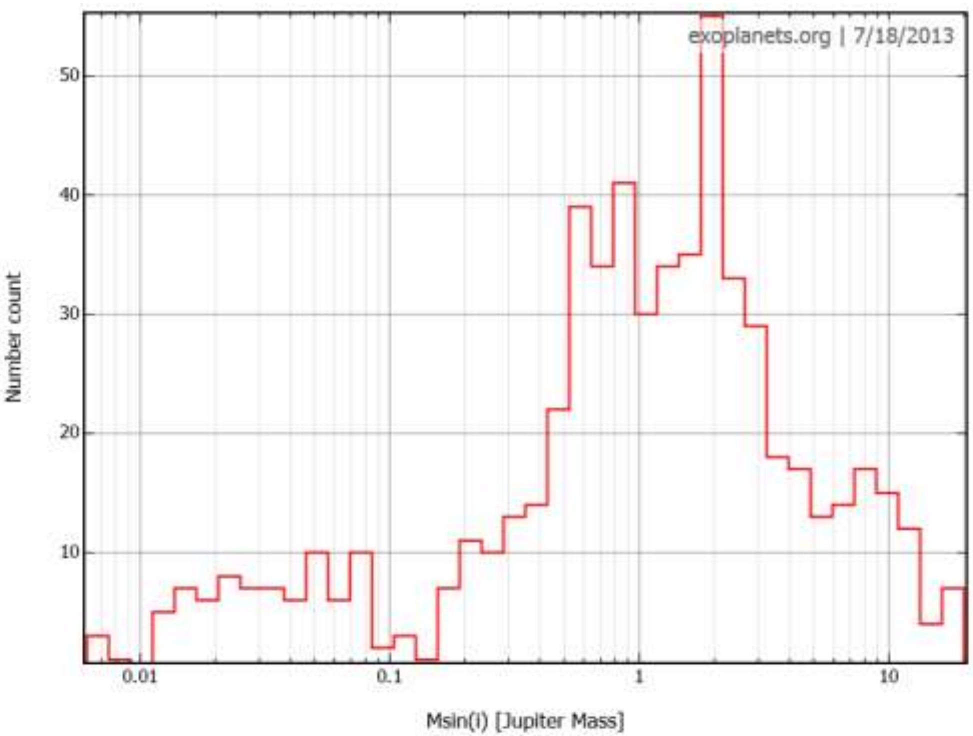
Vlastnosti

- Hmotnosti
  - Povrchová gravitácia
- Polomery
  - Kamenná alebo plynná planéta, atmosféra
- Teploty
  - Teplota stredná, deň/noc



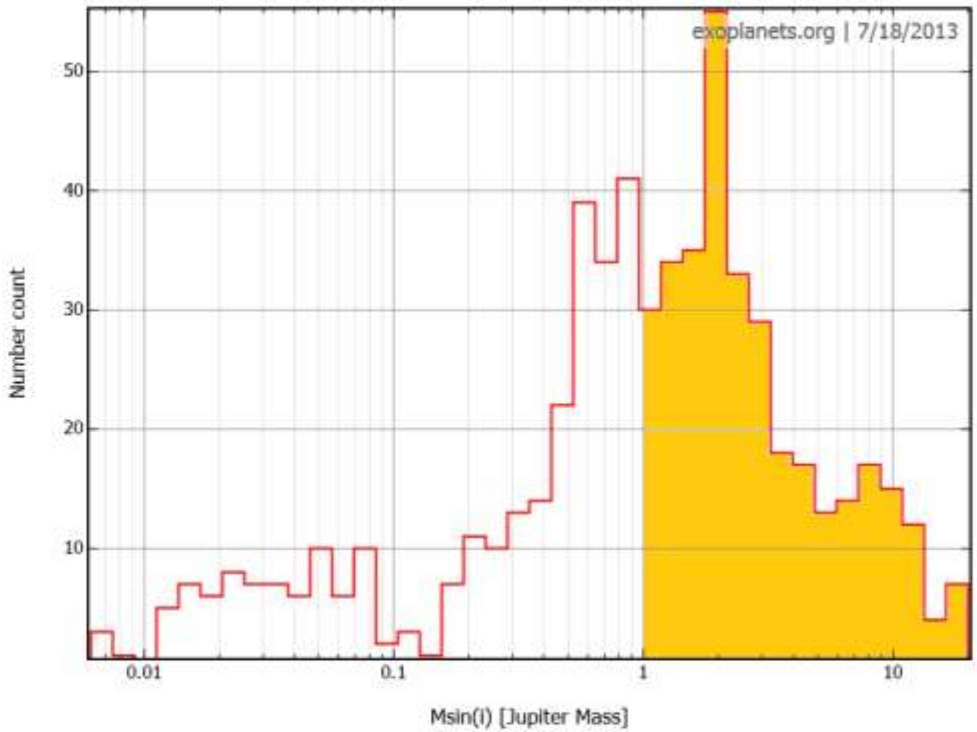
Hmotnosti

- Často len minimálna hmotnosť
- Metódy objavovania favorizujú ťažké a veľké planéty
- 55% ťažších ako Jupiter a 10% s hmotnosťou do 10x Zeme



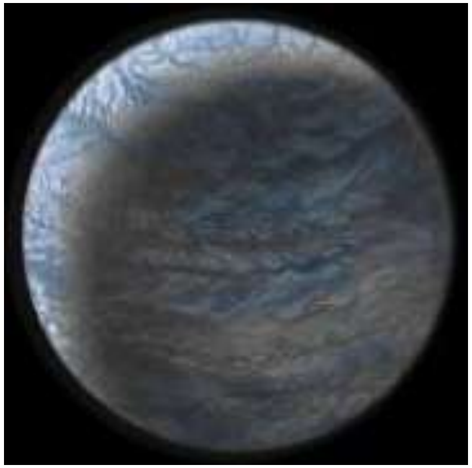
Hmotnosti

- Často len minimálna hmotnosť
- Metódy objavovania favorizujú ťažké a veľké planéty
- **55% ťažších ako Jupiter** a 10% s hmotnosťou do 10x Zeme



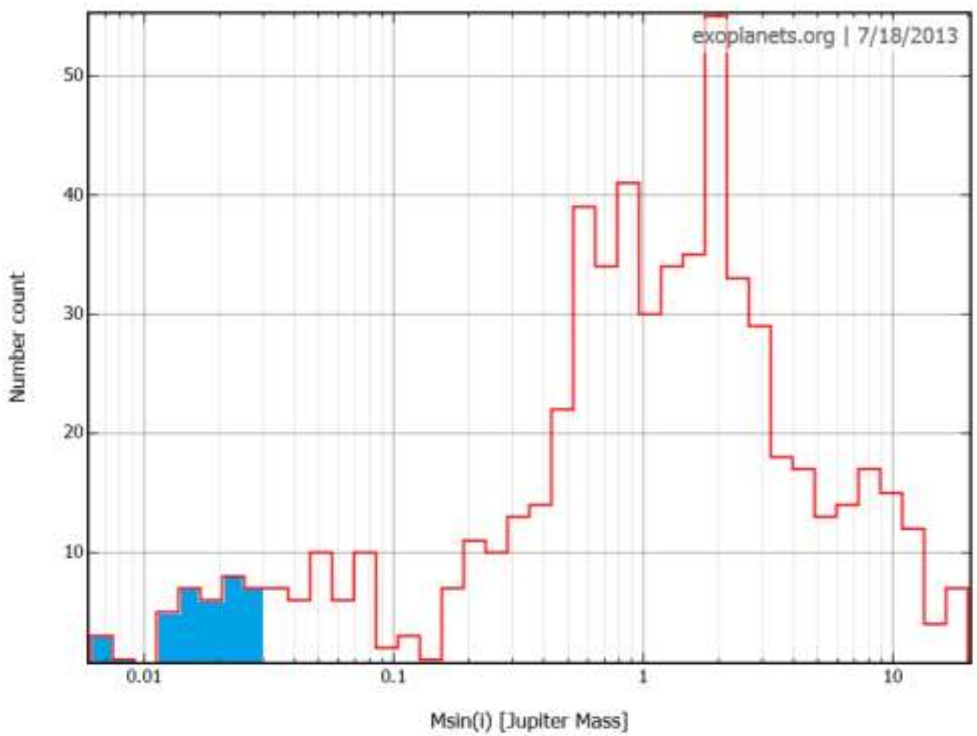
Najťažšia známa: HD38529c

13,08 hmotnosti Jupitera



Hmotnosti

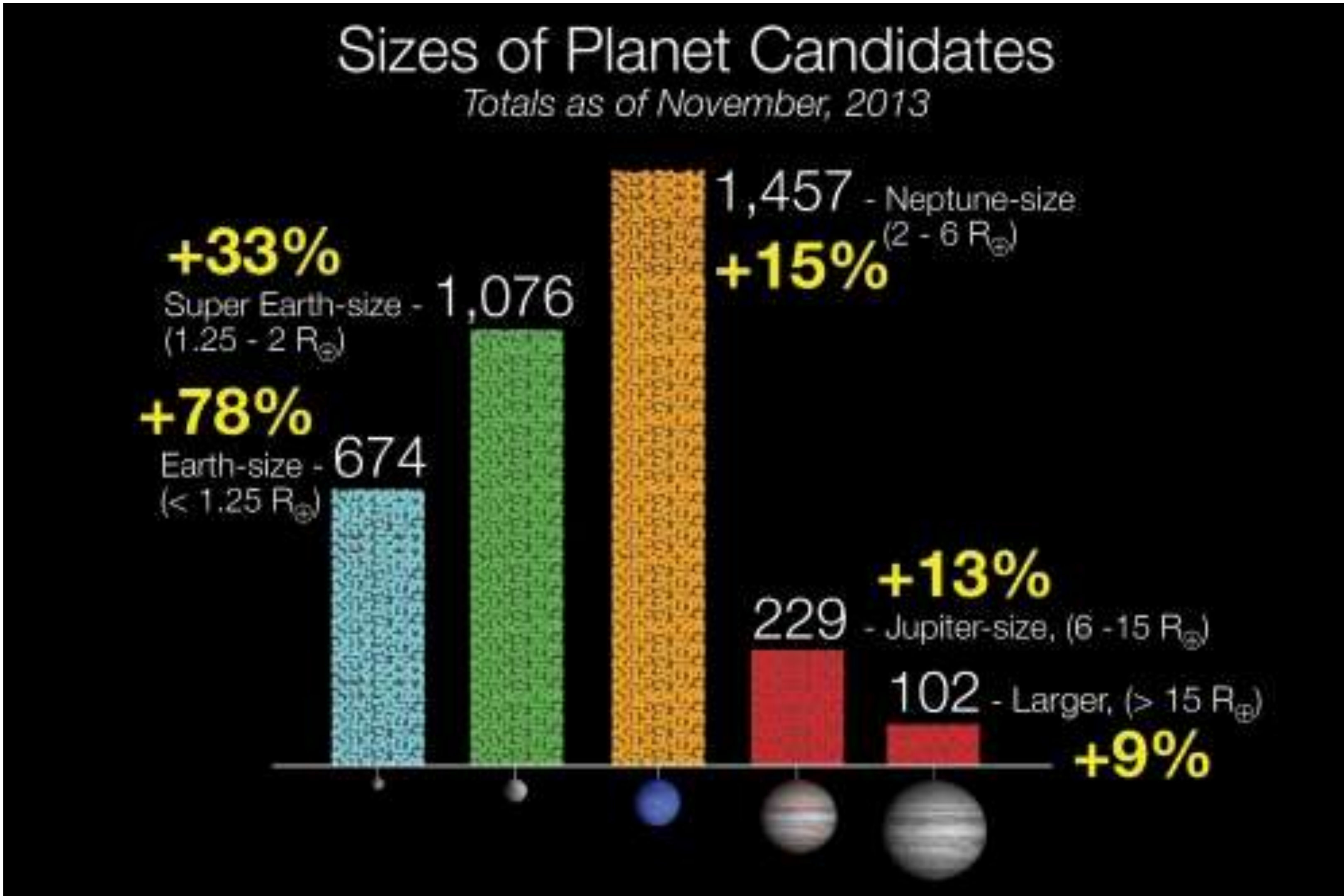
- Často len minimálna hmotnosť
- Metódy objavovania favorizujú ťažké a veľké planéty
- 55% ťažších ako Jupiter a **10% s hmotnosťou do 10x Zeme**



Najľahšia známa: Kepler-37b

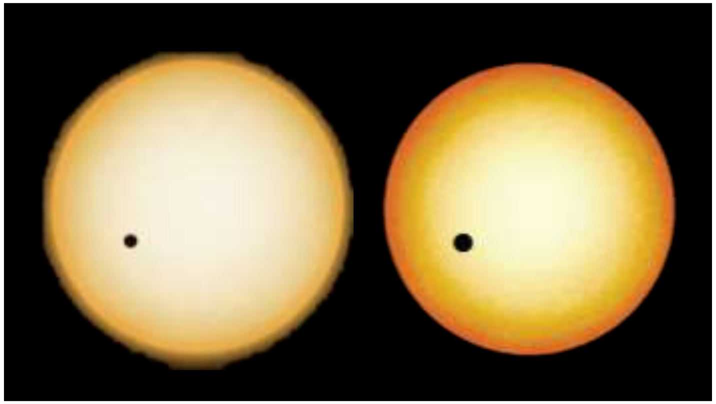
< 0,01 hmotnosti Zeme

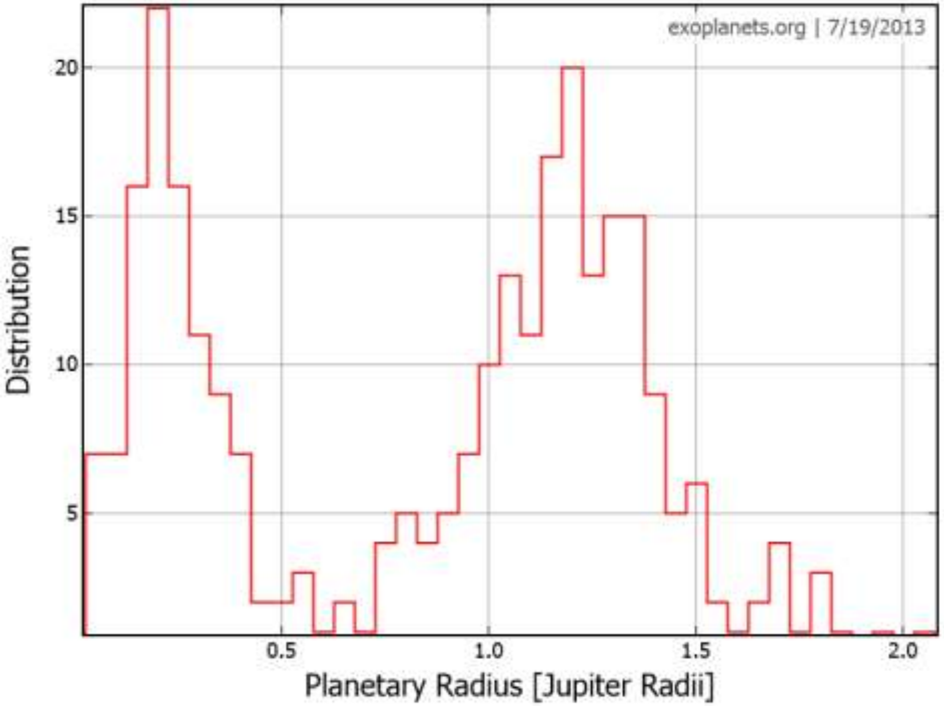
Polomery



Sizes of Planet Candidates
Totals as of November, 2013
1,457 - Neptune-size
(2 - 6 R⊕)
+15%
+33%
Super Earth-size - 1,076
(1.25 - 2 R⊕)
+78%
Earth-size - 674
(< 1.25 R⊕)
+13%
229 - Jupiter-size, (6 -15 R⊕)
102 - Larger, (> 15 R⊕)
+9%

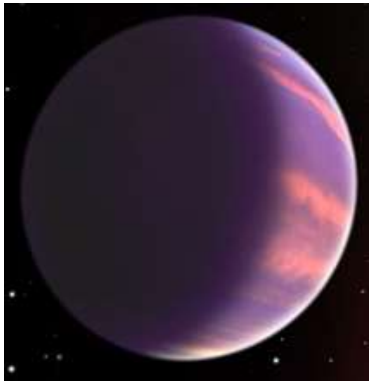
Polomery





Najväčší známy: HAT-P-32b

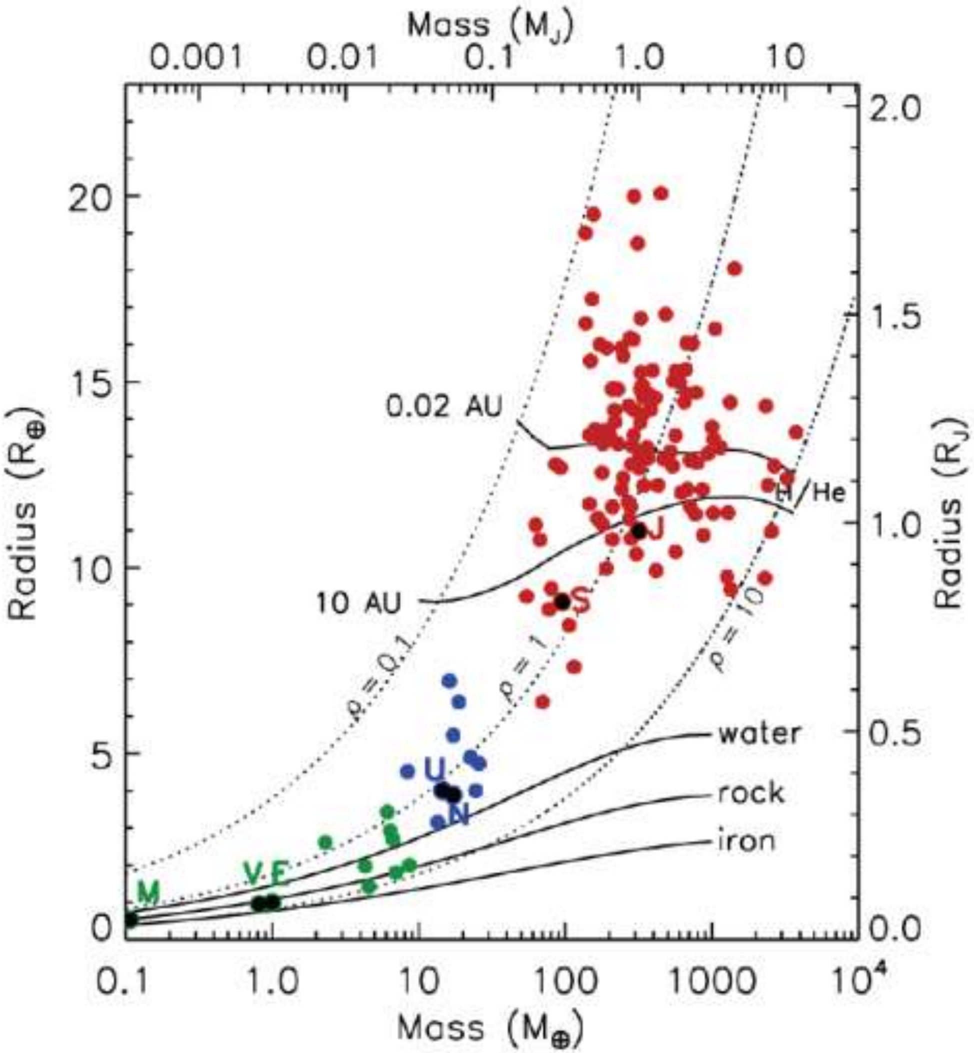
2,04 x jupiterovho



Najmenší známy: Kepler-37b

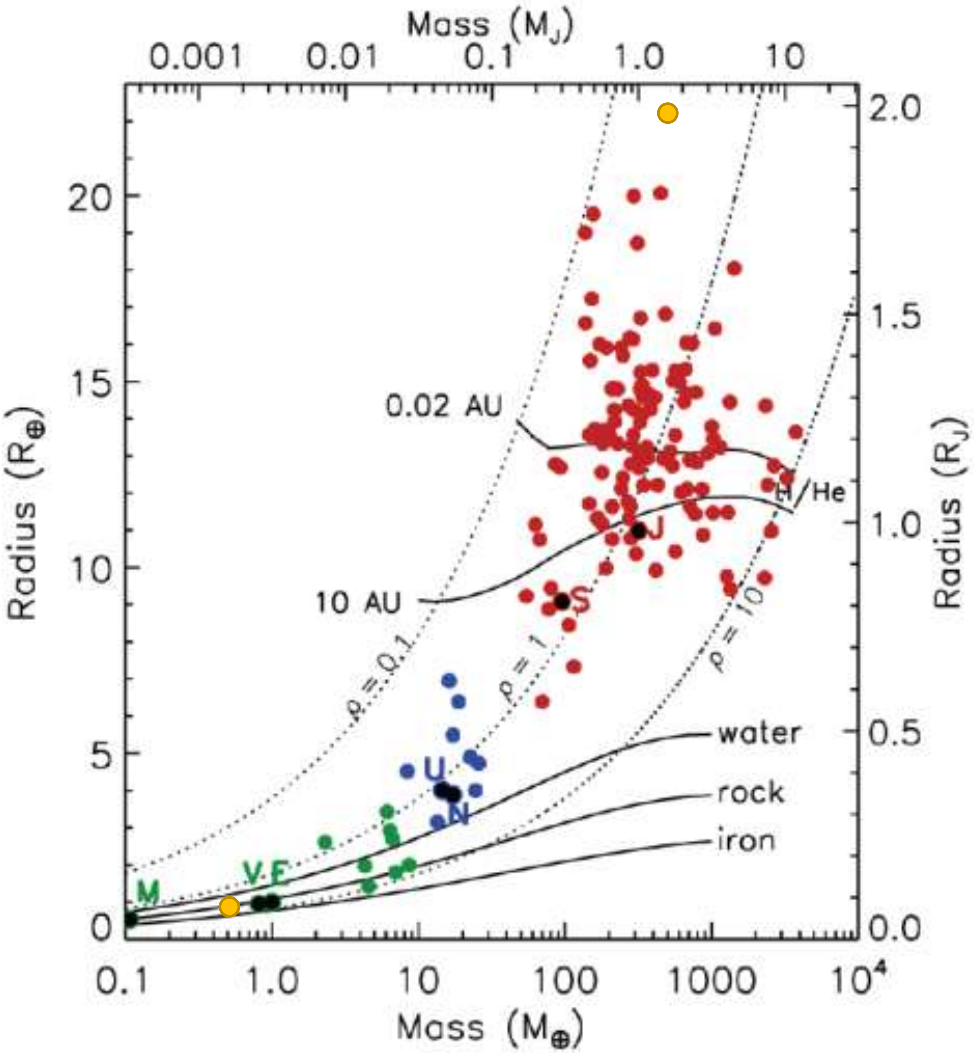
0,30 x zemského

Hustoty



- Plynní obri
  - vodík, hélium
- Ľadoví obri
  - voda, CO_X, ľad...
- Terestrické planéty
  - kamenno-železné

Hustoty



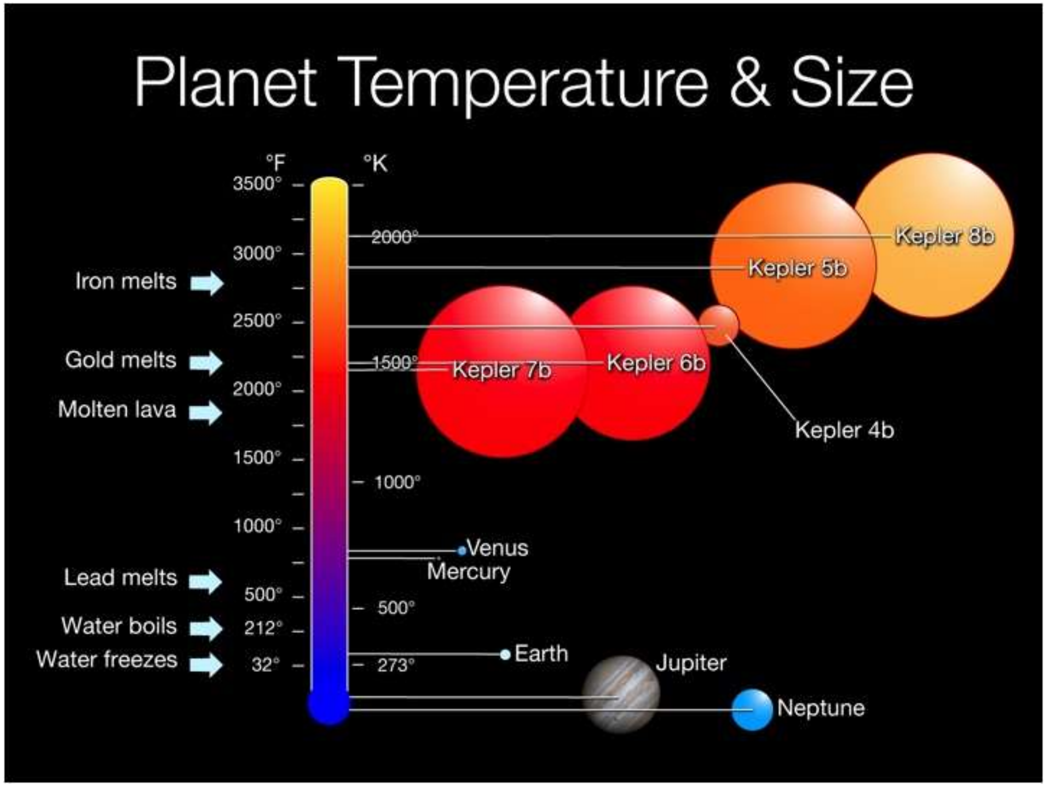
Najväčšia známa: Kepler-70b

6 400 kg/m³ (1,16 zemskej)

Najmenšia známa: WASP-17b

80-185 kg/m³ (0,01-0,03 zemskej)

Teploty



Najhorúcejšia: Kepler-70b

7 178 K (6 905°C)

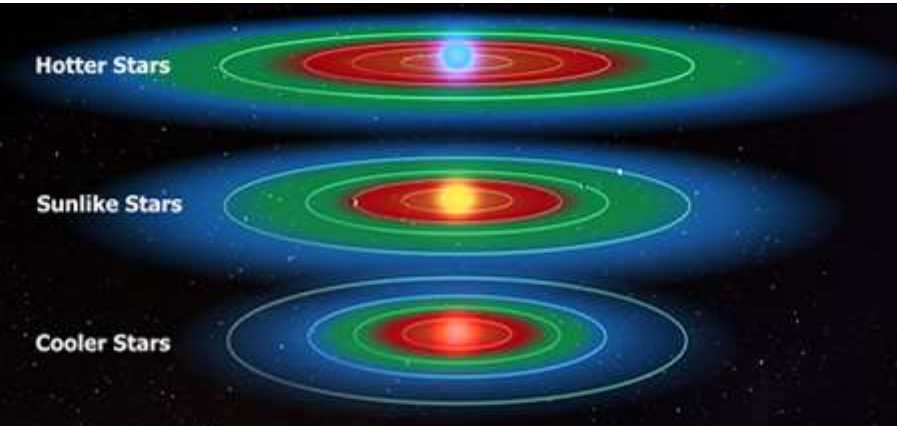
Najchladnejšia: OGLE-2005-BLG-390Lb

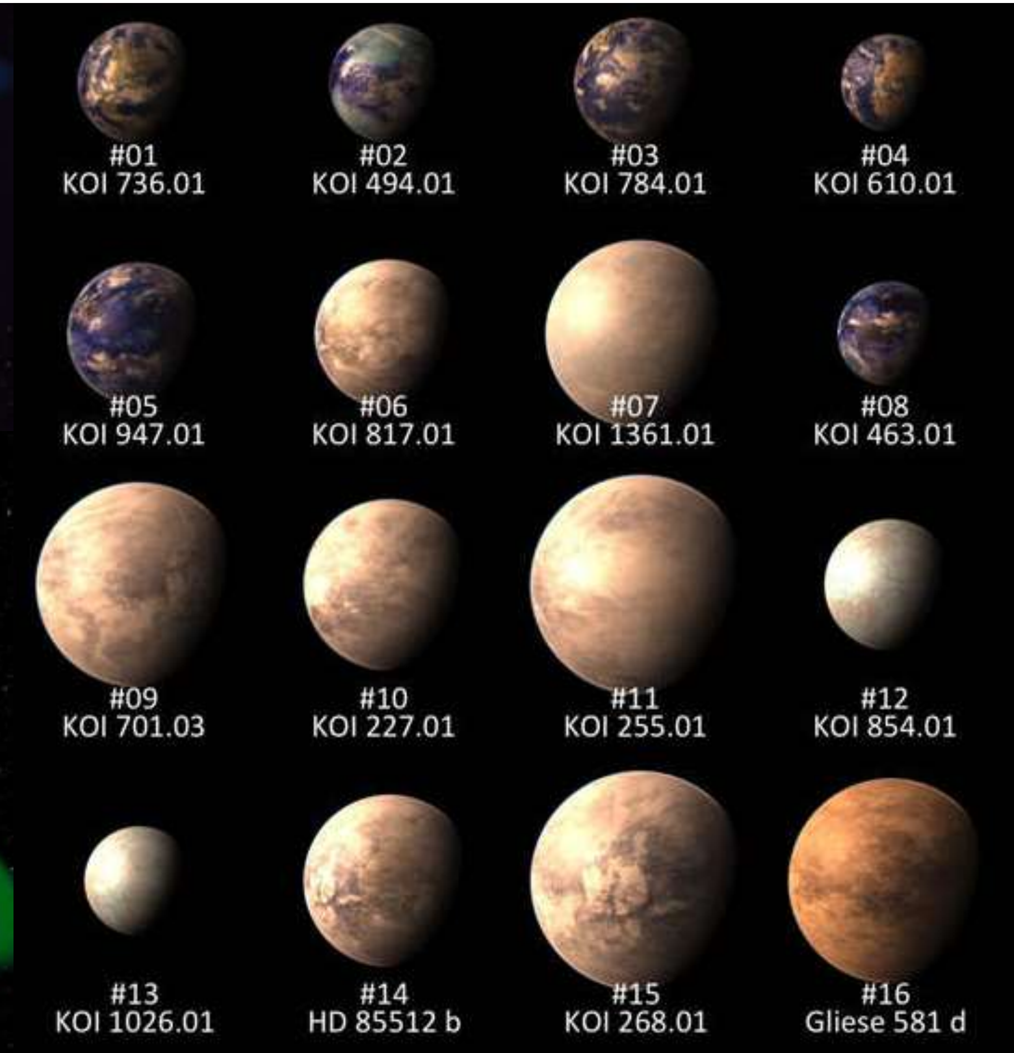
50 K (-223°C)

Teplotná klasifikácia

Trieda	Názov	T [°C]	Model	Príklad	T [°C]
HP	Hypo-psychro-planéta	-100 až -50		Mars	-63
P	Psychro-planéta	-50 až 0		Gliese 581d	-42
M	Mezo-planéta	0 až 50		Gliese 581g KOI-701.03	+4 +21
T	Termo-planéta	50 až 100		KOI-326.01	+93
HT	Hypertermo-planéta	100 až 150		α Cen Bb	+877 ??

Zóna života


Hotter Stars
Sunlike Stars
Cooler Stars


#01
KOI 736.01
#02
KOI 494.01
#03
KOI 784.01
#04
KOI 610.01
#05
KOI 947.01
#06
KOI 817.01
#07
KOI 1361.01
#08
KOI 463.01
#09
KOI 701.03
#10
KOI 227.01
#11
KOI 255.01
#12
KOI 854.01
#13
KOI 1026.01
#14
HD 85512 b
#15
KOI 268.01
#16
Gliese 581 d

Hľadanie života mimo našej Zeme

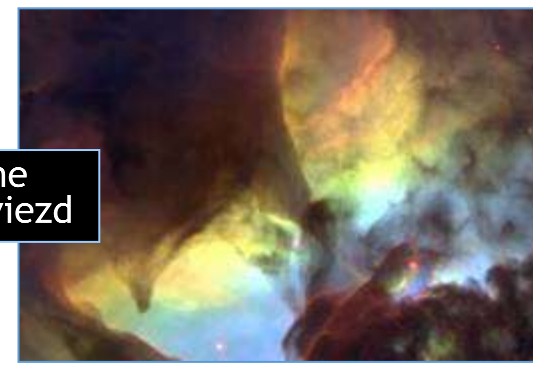
Život tak ako ho poznáme vyžaduje:

1) Vodu v tekutom stave
2) Nejakú formu energie (svetlo materskej hviezdy, chemické reakcie, vulkanickú činnosť)
3) Organické materiály
4) Dostatočne stabilné prostredie (dostatok času na vznik a vývoj)

Fakty, ktoré nás predurčujú hľadať mimo Zeme

Existencia života v miestach s extrémnymi podmienkami. Donedávna sa pokladalo za nemožné nájsť tam život.

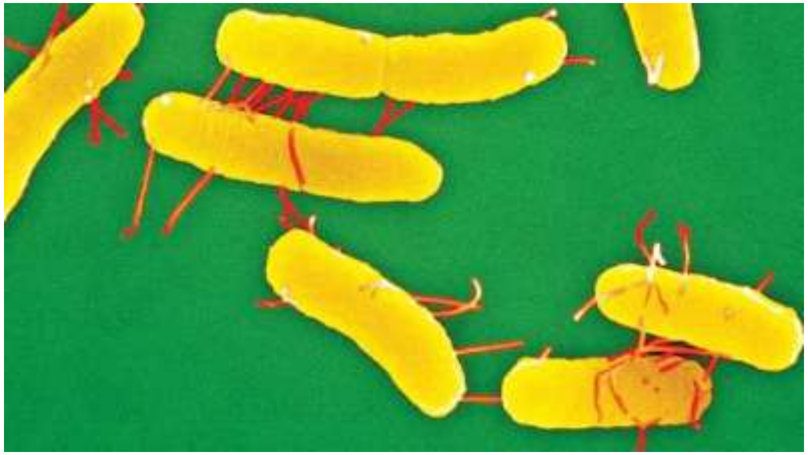
Organické molekuly boli nájdené aj v medzihviezdnom priestore...



Počas posledných 20 rokov bolo nájdených množstvo planét pri iných hviezdach, kde by život mohol existovať

Ďalšie fakty...

Salmonella typhimurium

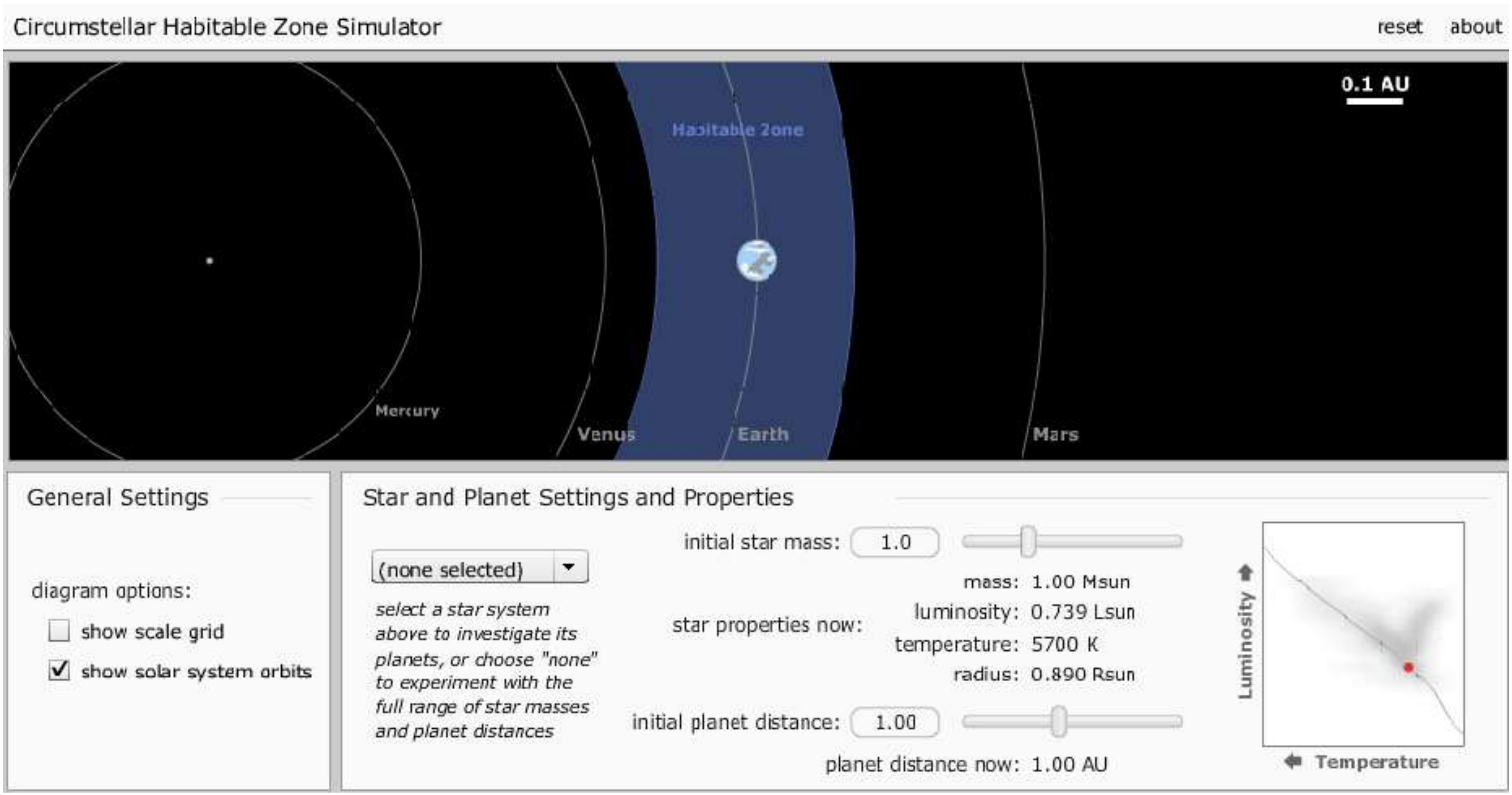


- Biologický experiment, raketoplán Atlantis (2005-6).
- Baktérie boli počas celej misie vystavené prostrediu mikrogravitácie (tzv. beztiaže).
- Mutácia baktérii, po príchode na Zem -> 3-4x silnejšie účinky ako predtým

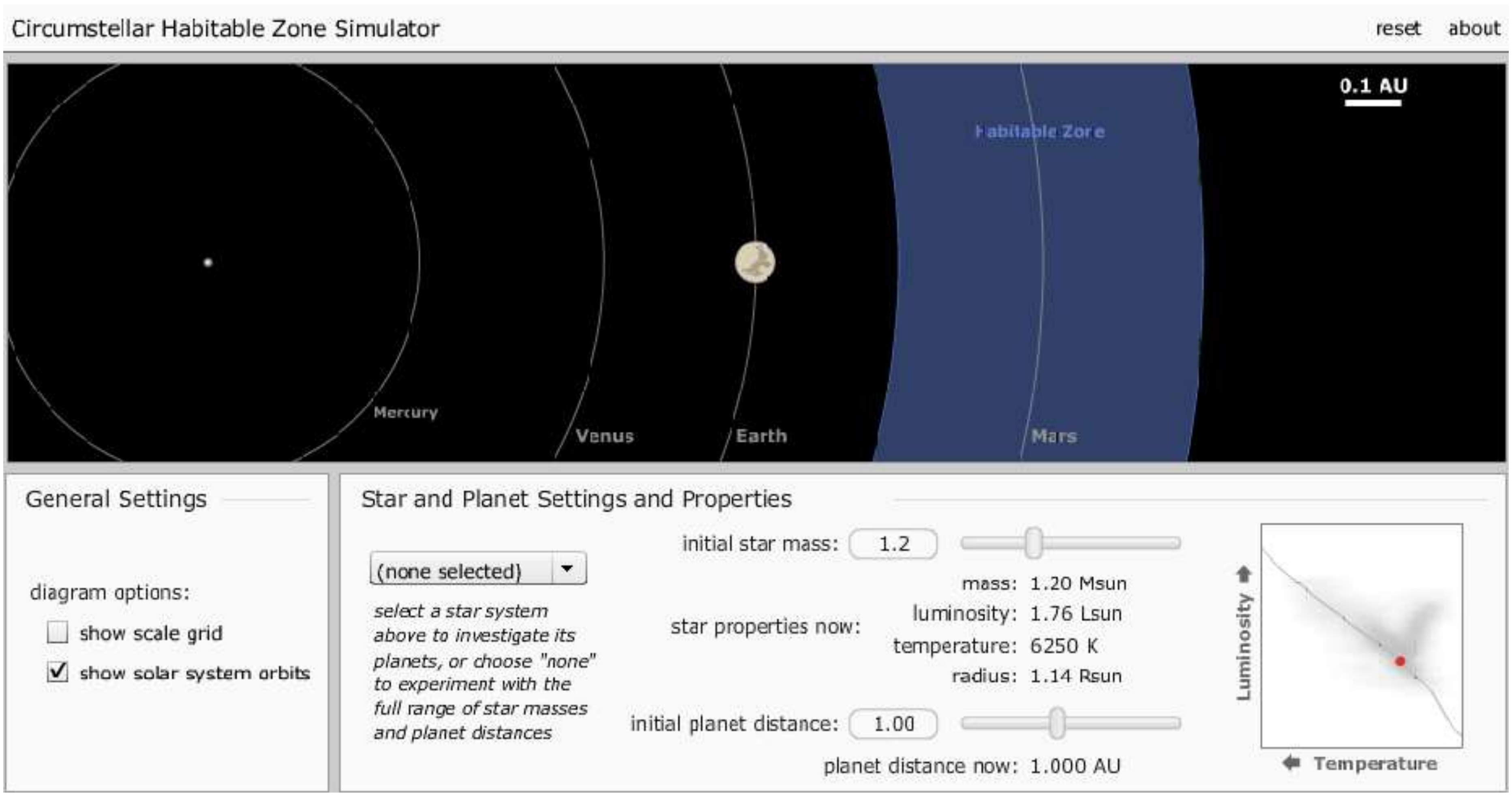
Mikróby rodu Gloeocapsa

- „prilepené“ na vonkajšiu stranu stanice **ISS**
- prežili v otvorenom vesmíre 553 dní
- Ide o vôbec najdlhšiu dobu, akú fotosyntetizujúce baktérie prežili vo vesmíre.

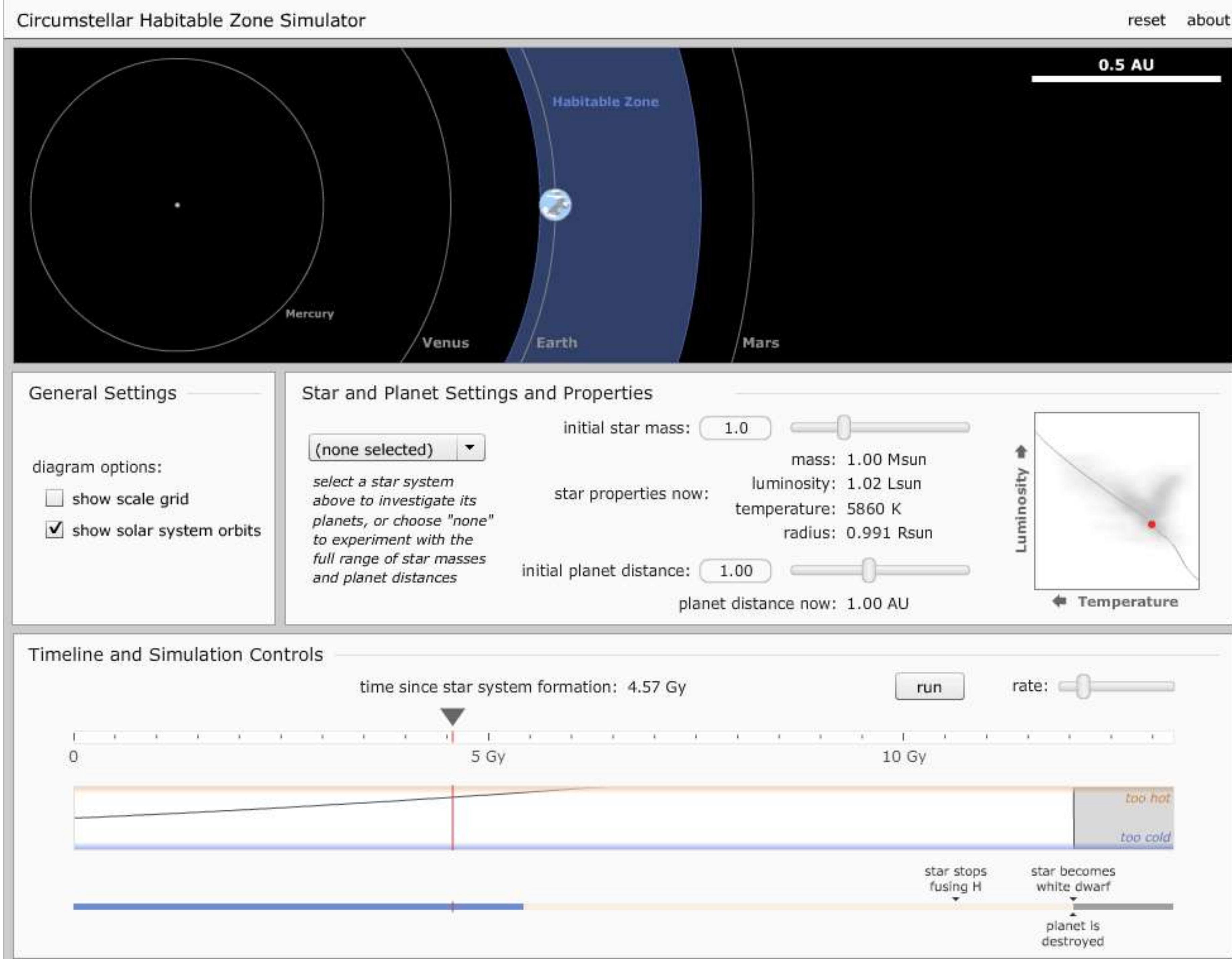
Zóna života

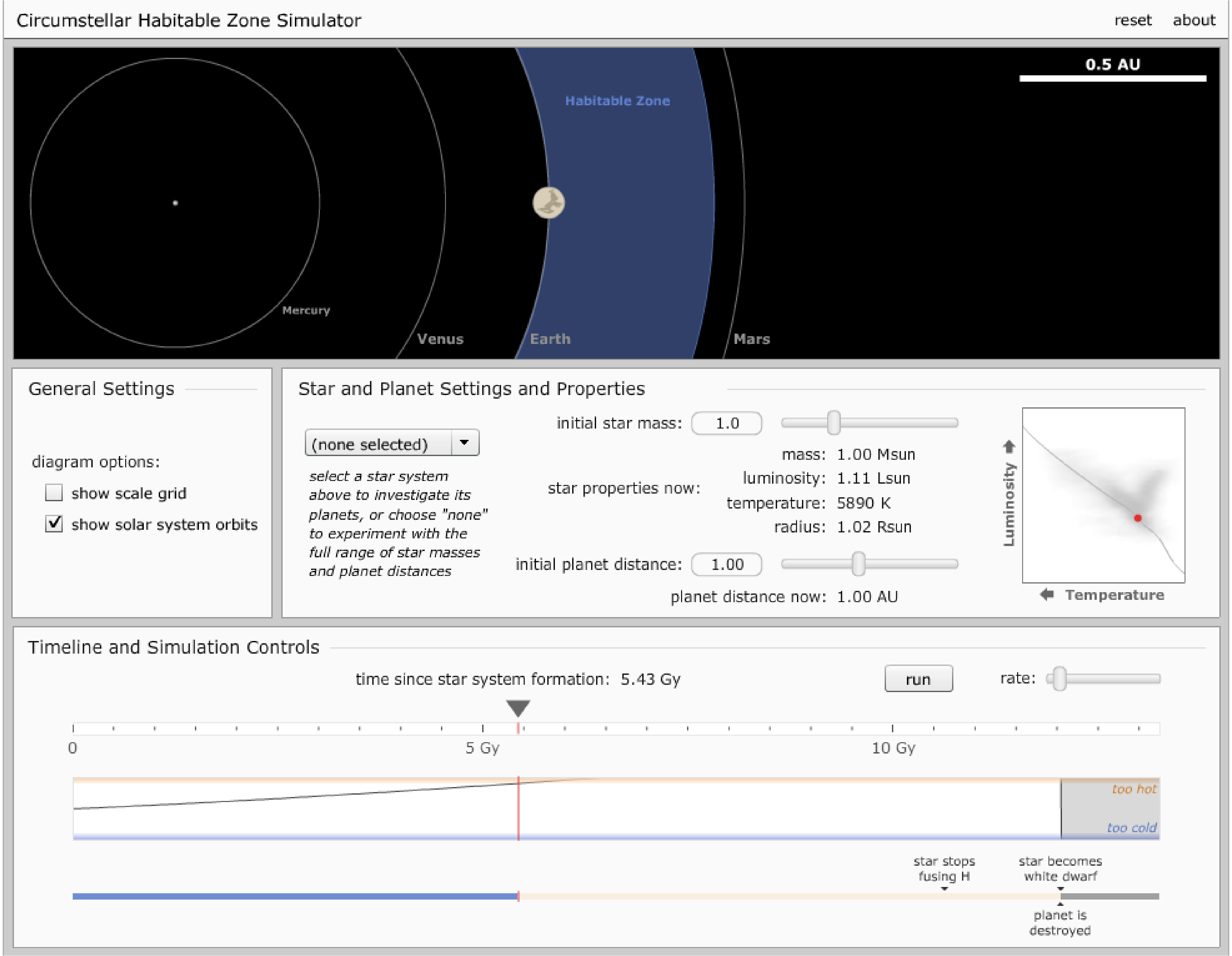

Circumstellar Habitable Zone Simulator
reset
about
0.1 AU
Habitable Zone
Mercury
Venus
Earth
Mars
General Settings
diagram options:
show scale grid
show solar system orbits
Star and Planet Settings and Properties
(none selected)
select a star system above to investigate its planets, or choose "none" to experiment with the full range of star masses and planet distances
initial star mass: 1.0
star properties now:
mass: 1.00 Msun
luminosity: 0.739 Lsun
temperature: 5700 K
radius: 0.890 Rsun
initial planet distance: 1.00
planet distance now: 1.00 AU
Luminosity
Temperature

Zóna života



Circumstellar Habitable Zone Simulator
reset
about
0.1 AU
Habitable Zone
Mercury
Venus
Earth
Mars
General Settings
diagram options:
show scale grid
show solar system orbits
Star and Planet Settings and Properties
(none selected)
select a star system above to investigate its planets, or choose "none" to experiment with the full range of star masses and planet distances
initial star mass: 1.2
star properties now:
mass: 1.20 Msun
luminosity: 1.76 Lsun
temperature: 6250 K
radius: 1.14 Rsun
initial planet distance: 1.00
planet distance now: 1.000 AU
Luminosity
Temperature


Circumstellar Habitable Zone Simulator
reset
about
0.5 AU
Habitable Zone
Mercury
Venus
Earth
Mars
General Settings
diagram options:
show scale grid
show solar system orbits
Star and Planet Settings and Properties
(none selected)
select a star system above to investigate its planets, or choose "none" to experiment with the full range of star masses and planet distances
initial star mass: 1.0
star properties now:
mass: 1.00 Msun
luminosity: 1.02 Lsun
temperature: 5860 K
radius: 0.991 Rsun
initial planet distance: 1.00
planet distance now: 1.00 AU
Luminosity
Temperature
Timeline and Simulation Controls
time since star system formation: 4.57 Gy
run
rate:
0
5 Gy
10 Gy
too hot
too cold
star stops fusing H
star becomes white dwarf
planet is destroyed


Circumstellar Habitable Zone Simulator
reset
about
0.5 AU
Habitable Zone
Mercury
Venus
Earth
Mars
General Settings
diagram options:
show scale grid
show solar system orbits
Star and Planet Settings and Properties
(none selected)
select a star system above to investigate its planets, or choose "none" to experiment with the full range of star masses and planet distances
initial star mass: 1.0
star properties now:
mass: 1.00 Msun
luminosity: 1.11 Lsun
temperature: 5890 K
radius: 1.02 Rsun
initial planet distance: 1.00
planet distance now: 1.00 AU
Luminosity
Temperature
Timeline and Simulation Controls
time since star system formation: 5.43 Gy
run
rate:
0
5 Gy
10 Gy
too hot
too cold
star stops fusing H
star becomes white dwarf
planet is destroyed

Sme sami?

$$N = R_{*} \times f_{P} \times n_{E} \times f_{L} \times f_{I} \times f_{C} \times L$$

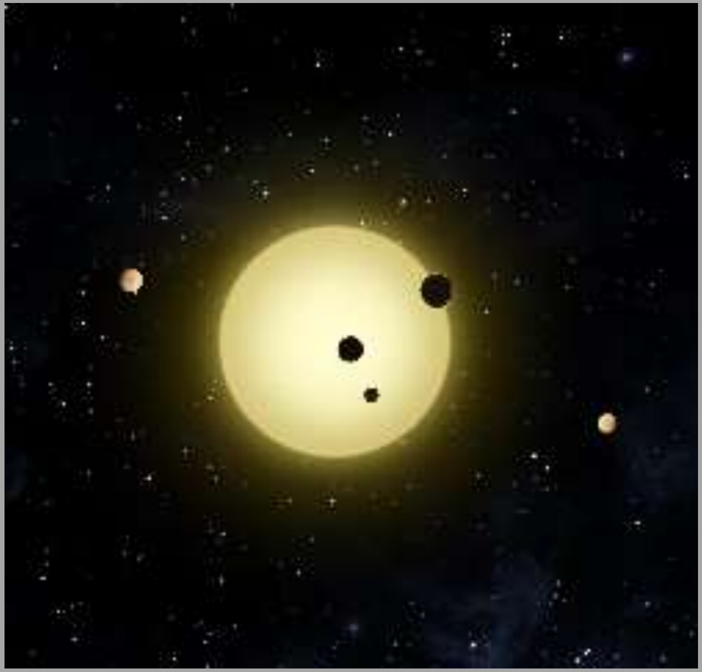
Vznik hviezd v Galaxii: 7,7 /rok

Sme sami?

$$N = R_{*} \times f_P \times n_E \times f_L \times f_I \times f_C \times L$$

Vznik hviezd v Galaxii: 7,7 /rok

Hviezdy s planétami: 50%



Sme sami?

$$N = R_* \times f_P \times n_E \times f_L \times f_I \times f_C \times L$$

Vznik hviezd v Galaxii: 7,7 /rok

Hviezdy s planétami: 50%

Zemi-podobné planéty: 1

Sme sami?

$$N = R_* \times f_P \times n_E \times f_L \times f_I \times f_C \times L$$

Vznik hviezd v Galaxii: 7,7 /rok

Hviezdy s planétami: 50%

Zemi-podobné planéty: 1

Planéty so životom: 1%

Sme sami?

$$N = R_* \times f_P \times n_E \times f_L \times f_I \times f_C \times L$$

Vznik hviezd v Galaxii: 7,7 /rok

Hviezdy s planétami: 50%

Zemi-podobné planéty: 1

Planéty so životom: 1%

Inteligentný život: 1%

Sme sami?

$$N = R_* \times f_P \times n_E \times f_L \times f_I \times f_C \times L$$

Vznik hviezd v Galaxii: 7,7 /rok

Hviezdy s planétami: 50%

Zemi-podobné planéty: 1

Planéty so životom: 1%

Inteligentný život: 1%

Koľkí komunikujú: 1%

Sme sami?

$$N = R_* \times f_P \times n_E \times f_L \times f_I \times f_C \times L$$

Vznik hviezd v Galaxii: 7,7 /rok

Hviezdy s planétami: 50%

Zemi-podobné planéty: 1

Planéty so životom: 1%

Inteligentný život: 1%

Koľkí komunikujú: 1%

Dĺžka trvania: 1 milión rokov

Sme sami?

$$N = R_* \times f_P \times n_E \times f_L \times f_I \times f_C \times L$$

Vznik hviezd v Galaxii: 7,7 /rok

Hviezdy s planétami: 50%

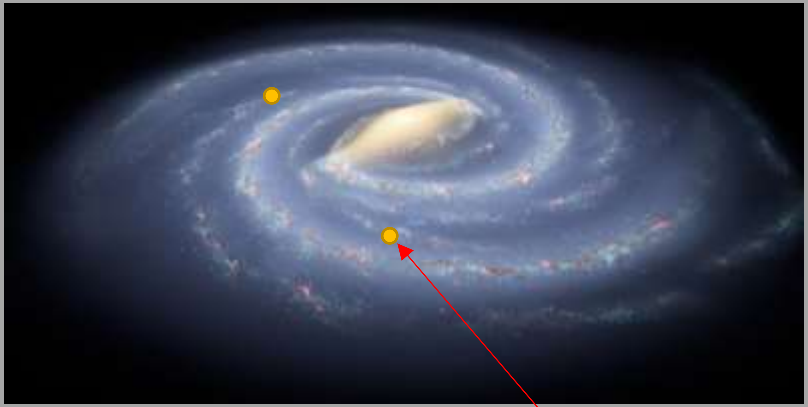
Zemi-podobné planéty: 1

Planéty so životom: 1%

Inteligentný život: 1%

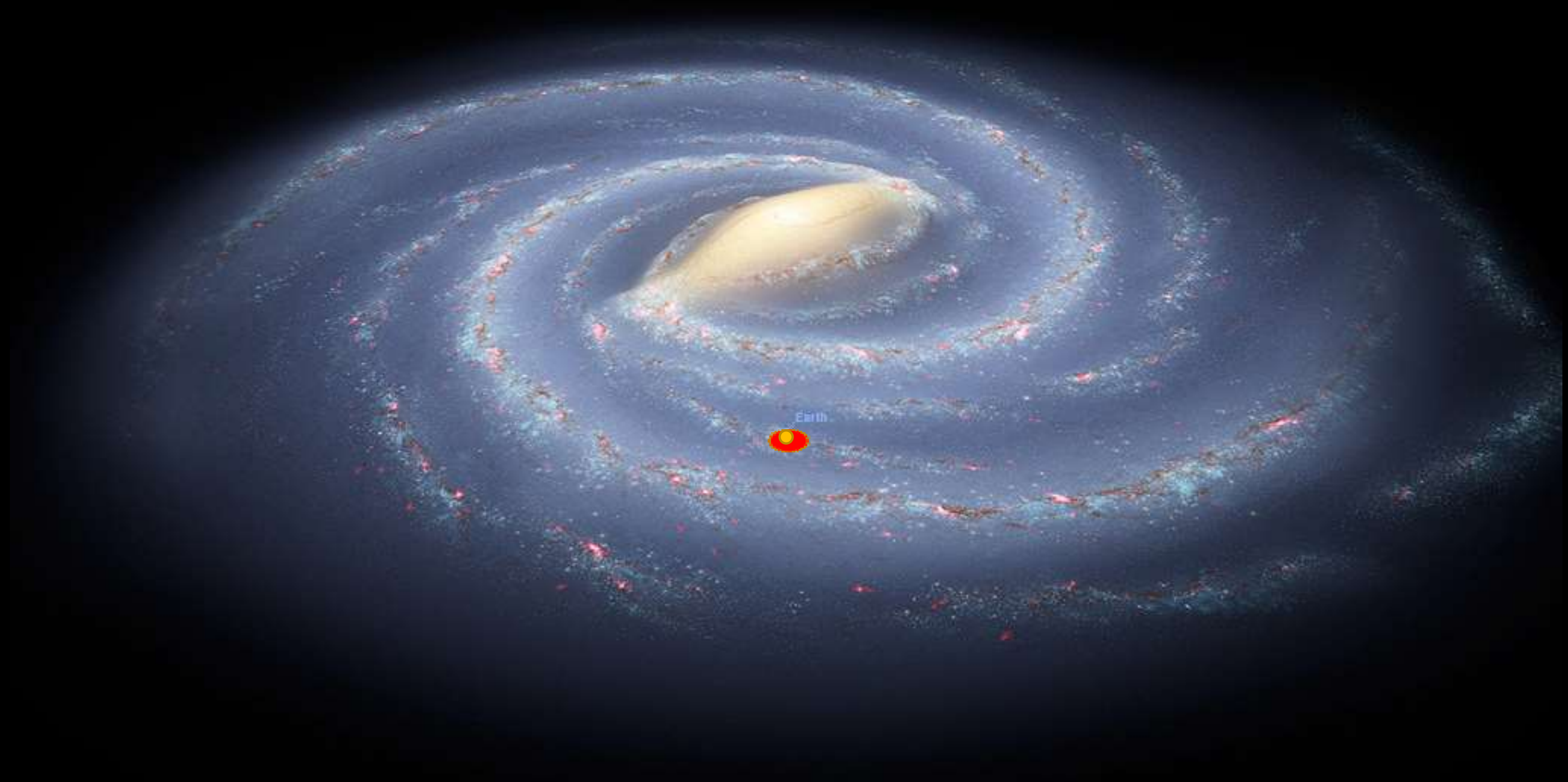
Koľkí komunikujú: 1%

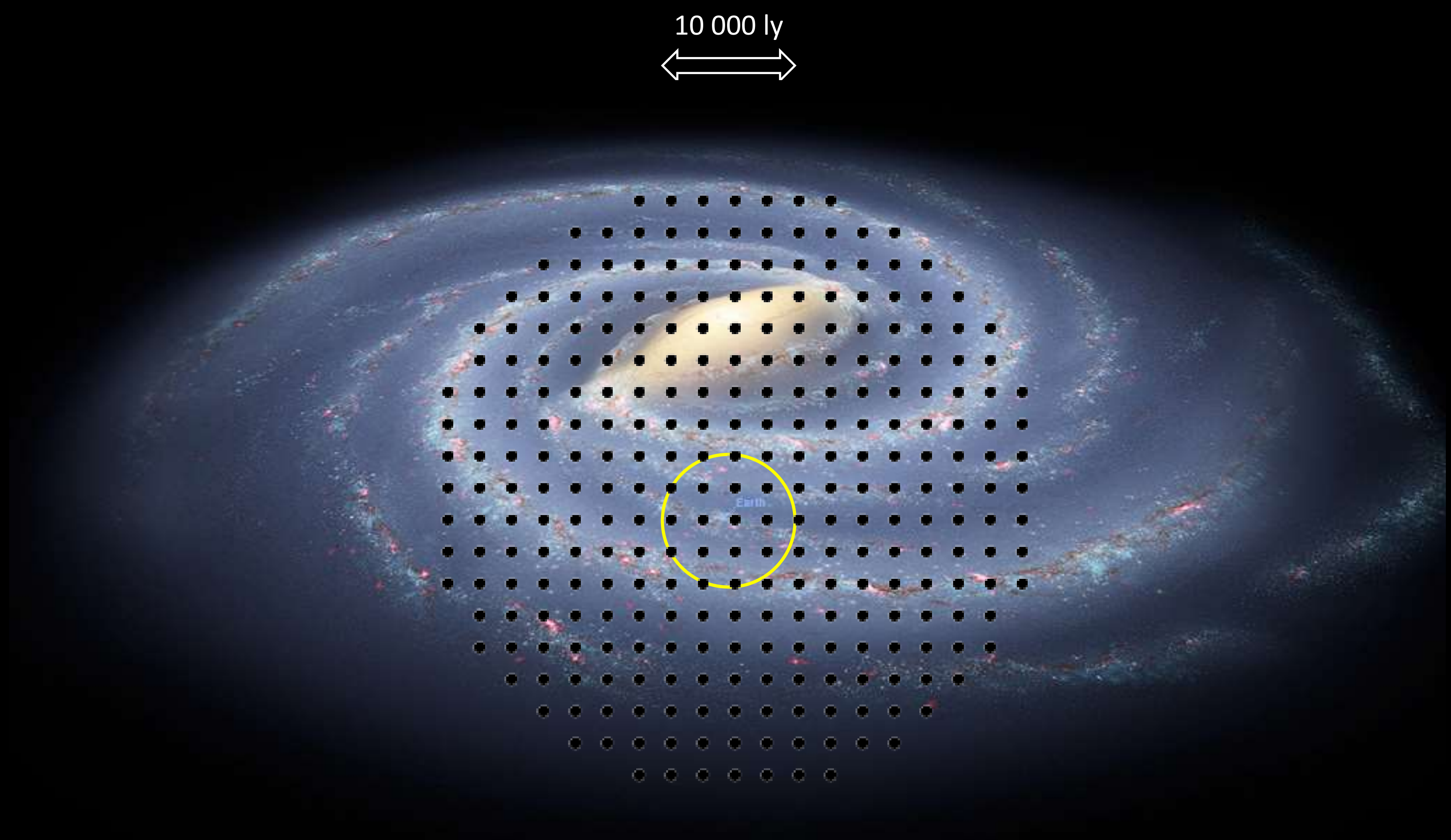
Dĺžka trvania: 1 milión rokov



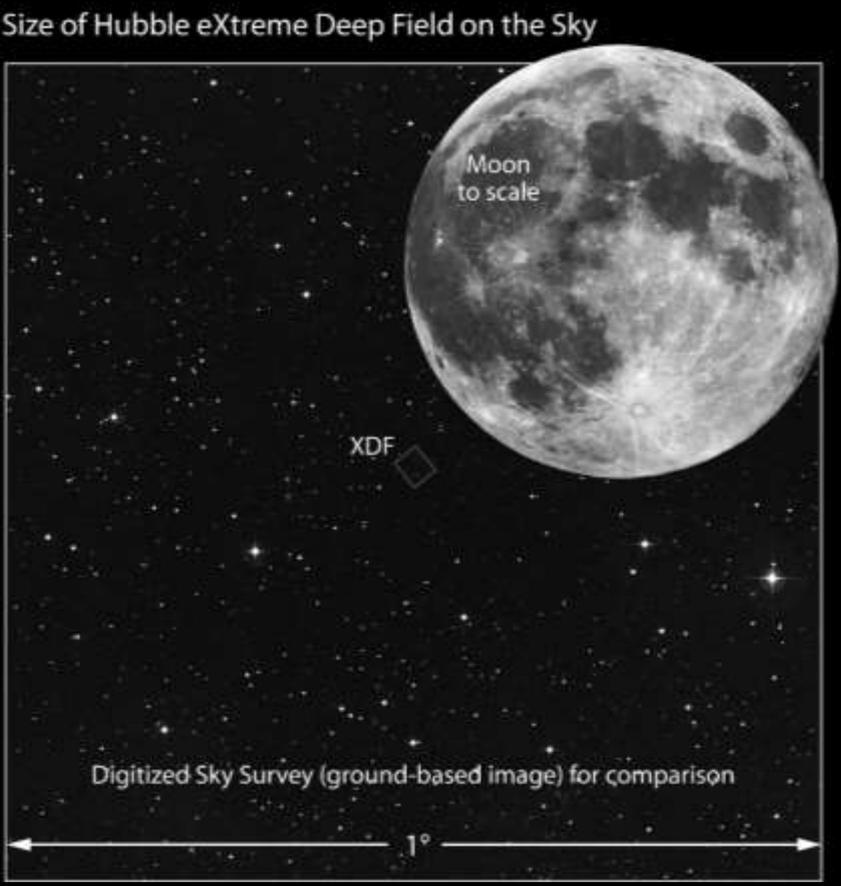
Počet v Galaxii: **2**

0,8 ‰

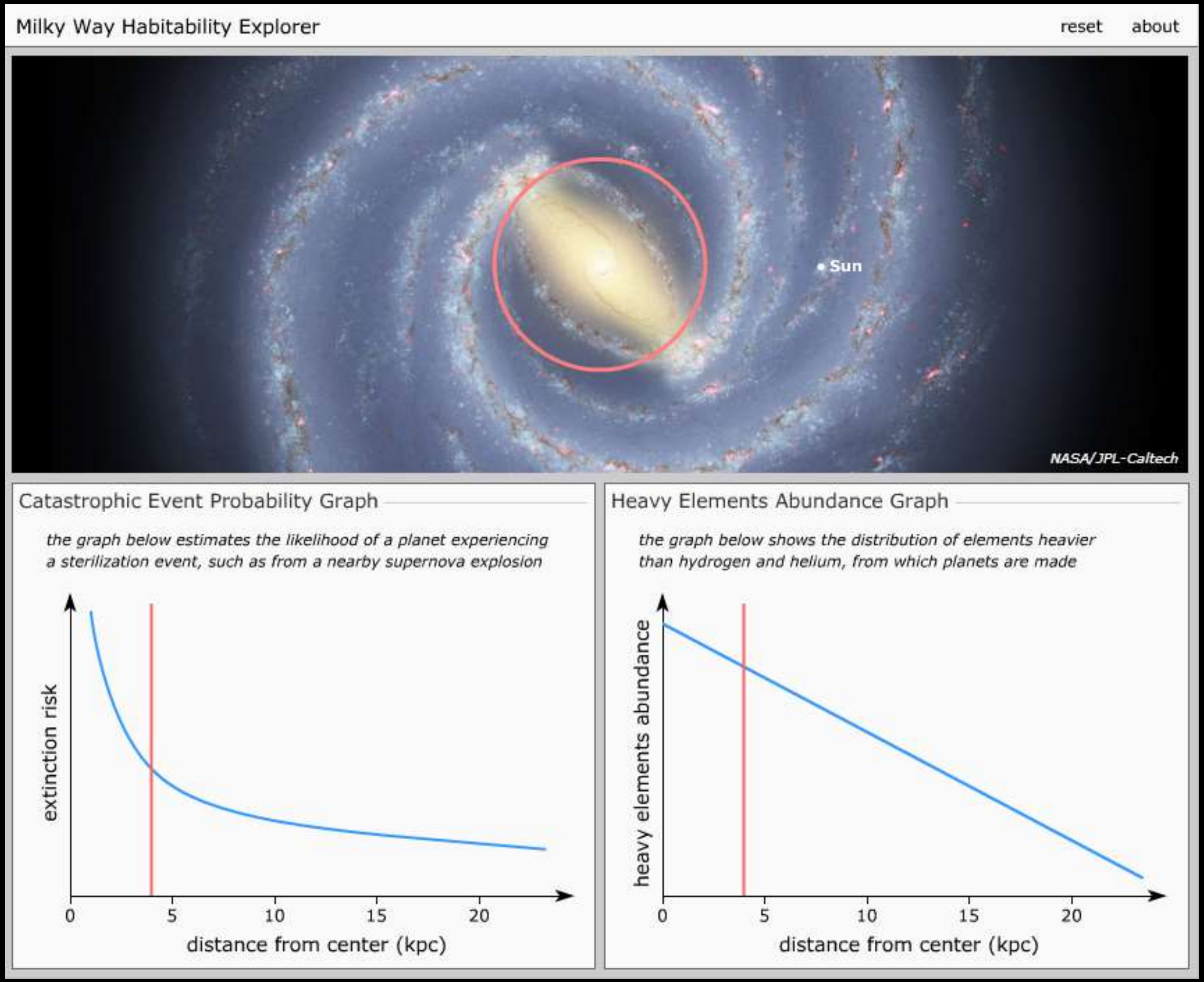



10 000 ly
Earth

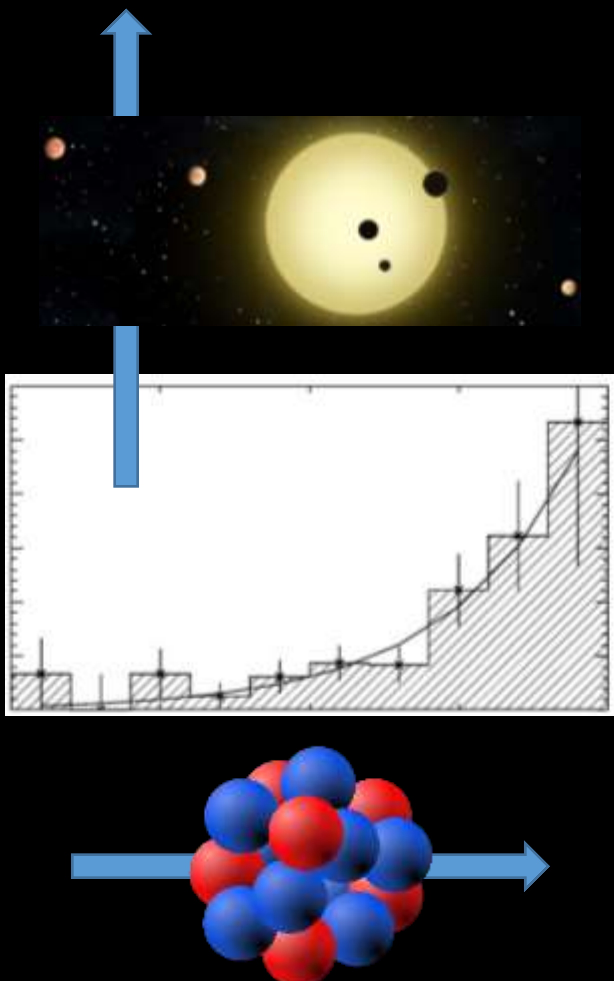
Vesmírne okolie

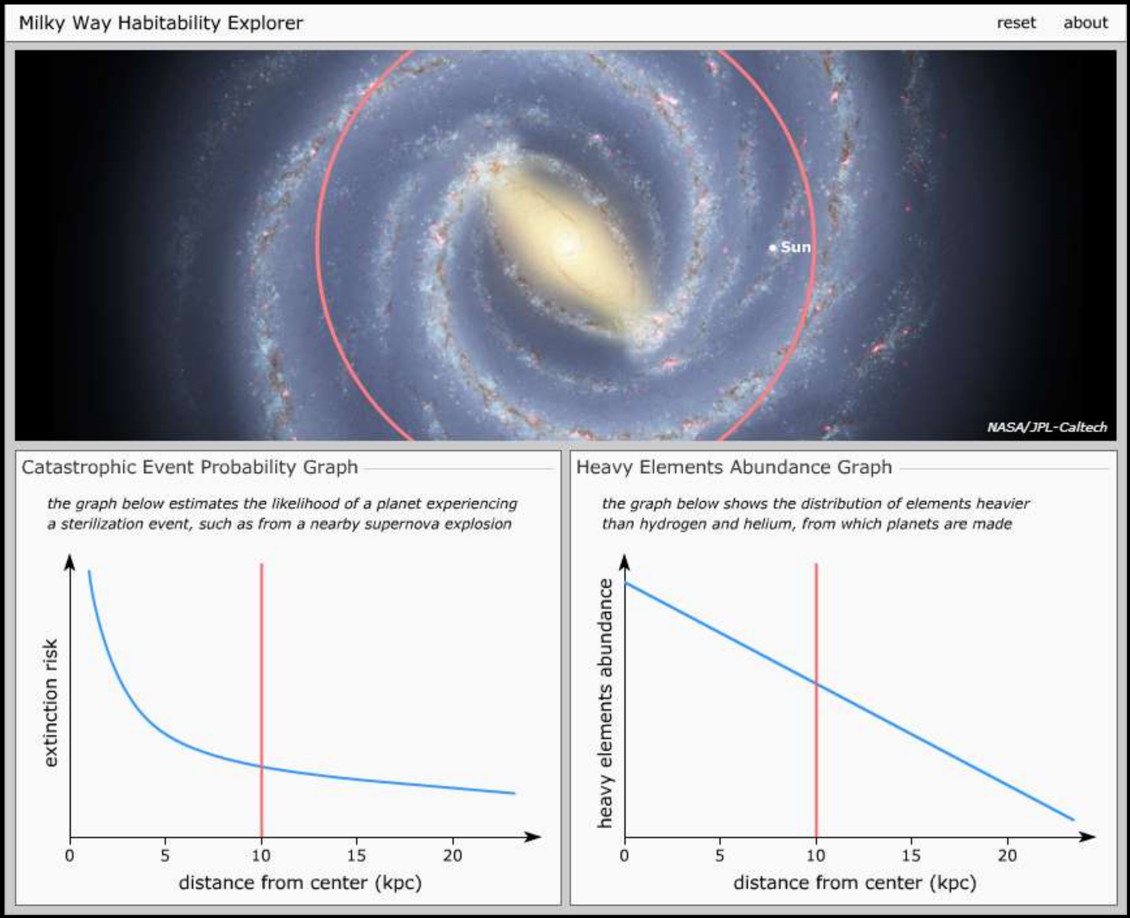


Galaktická zóna života



Galaktická zóna života





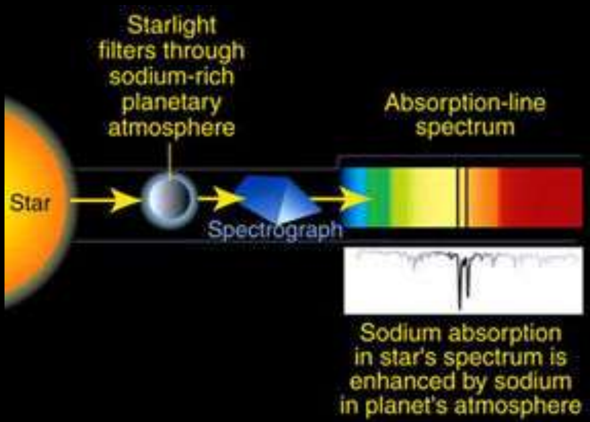
Hľadanie života

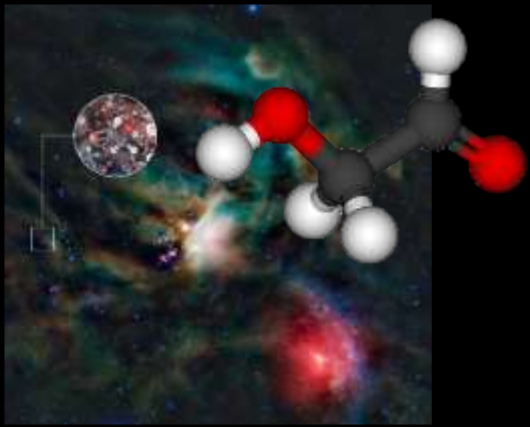
Priame

- Povrch vesmírnych telies, vzorky meteoritov

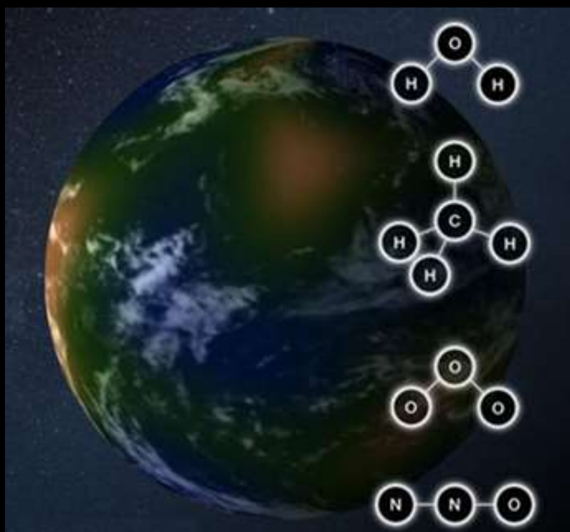
Nepriame

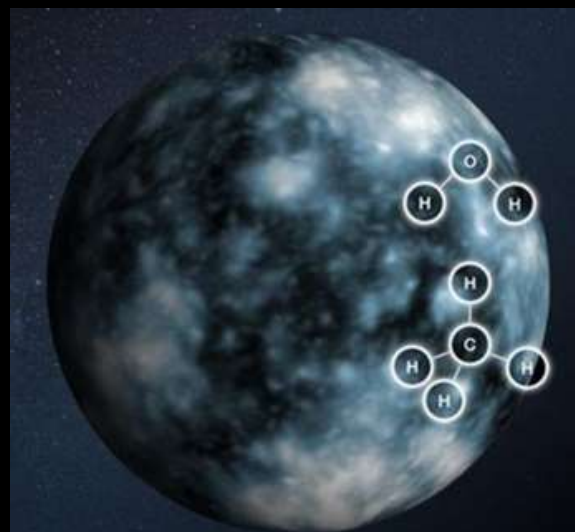
- Diaľkové skúmanie atmosfér planét
- Hľadanie komplikovaných organických molekúl
- Medzihviezdna komunikácia

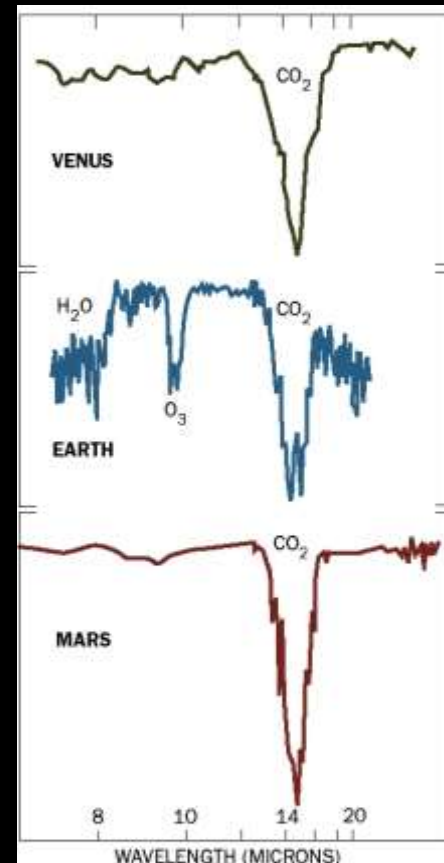


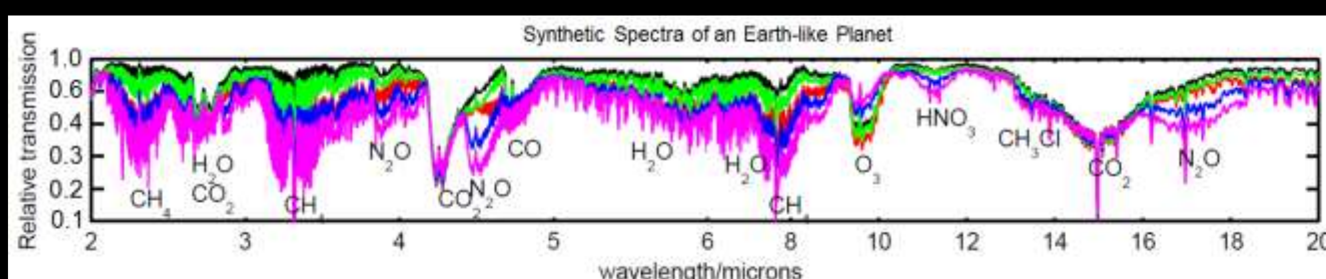


Atmosférické dôkazy





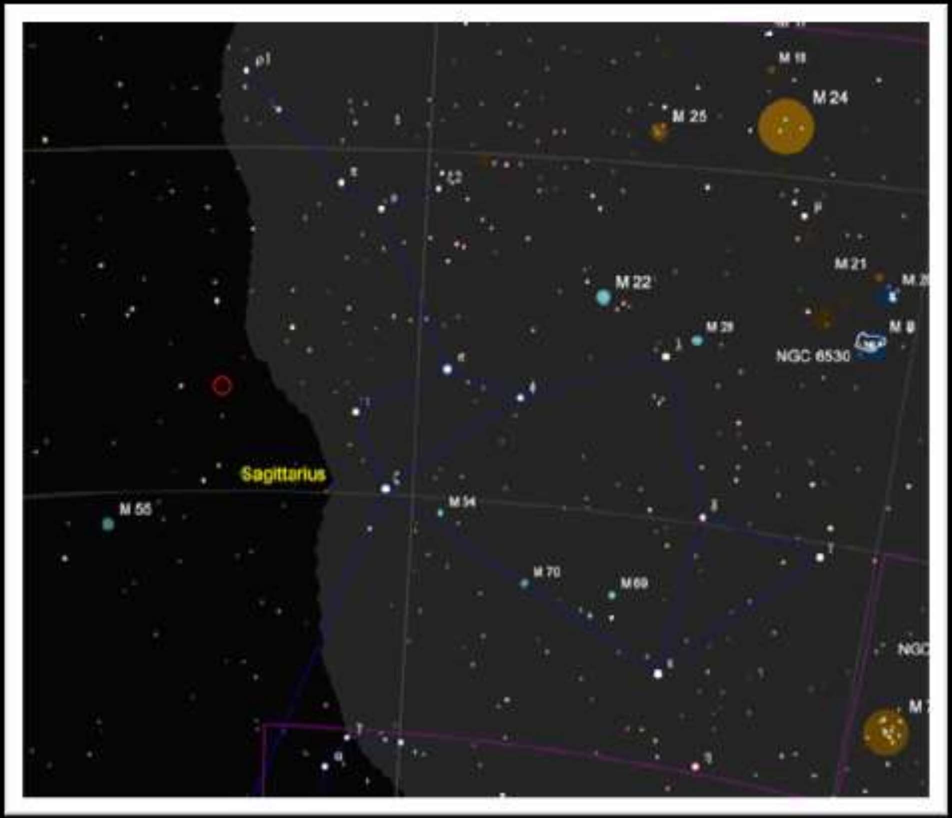


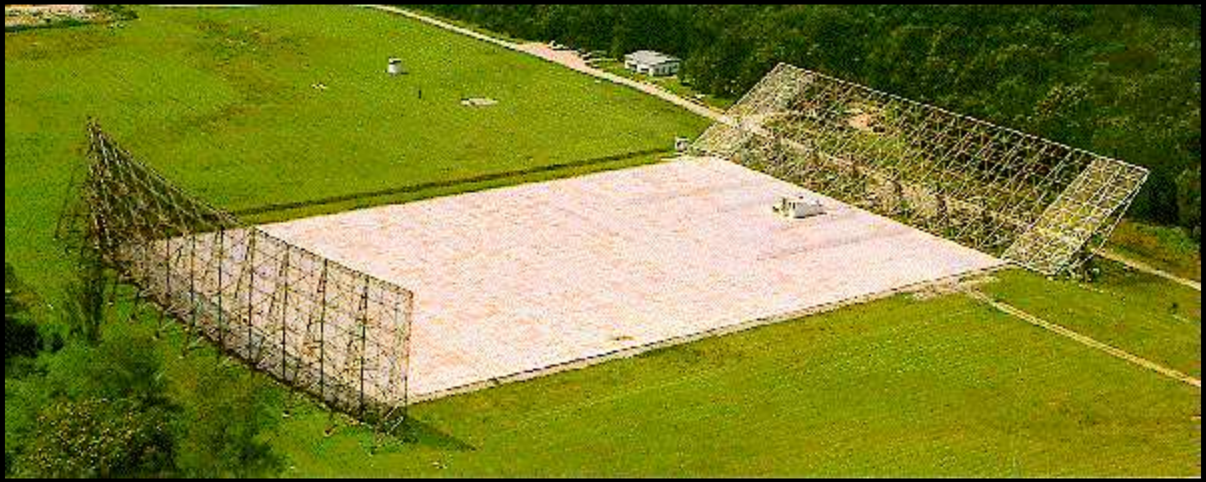


Rádiový hluk

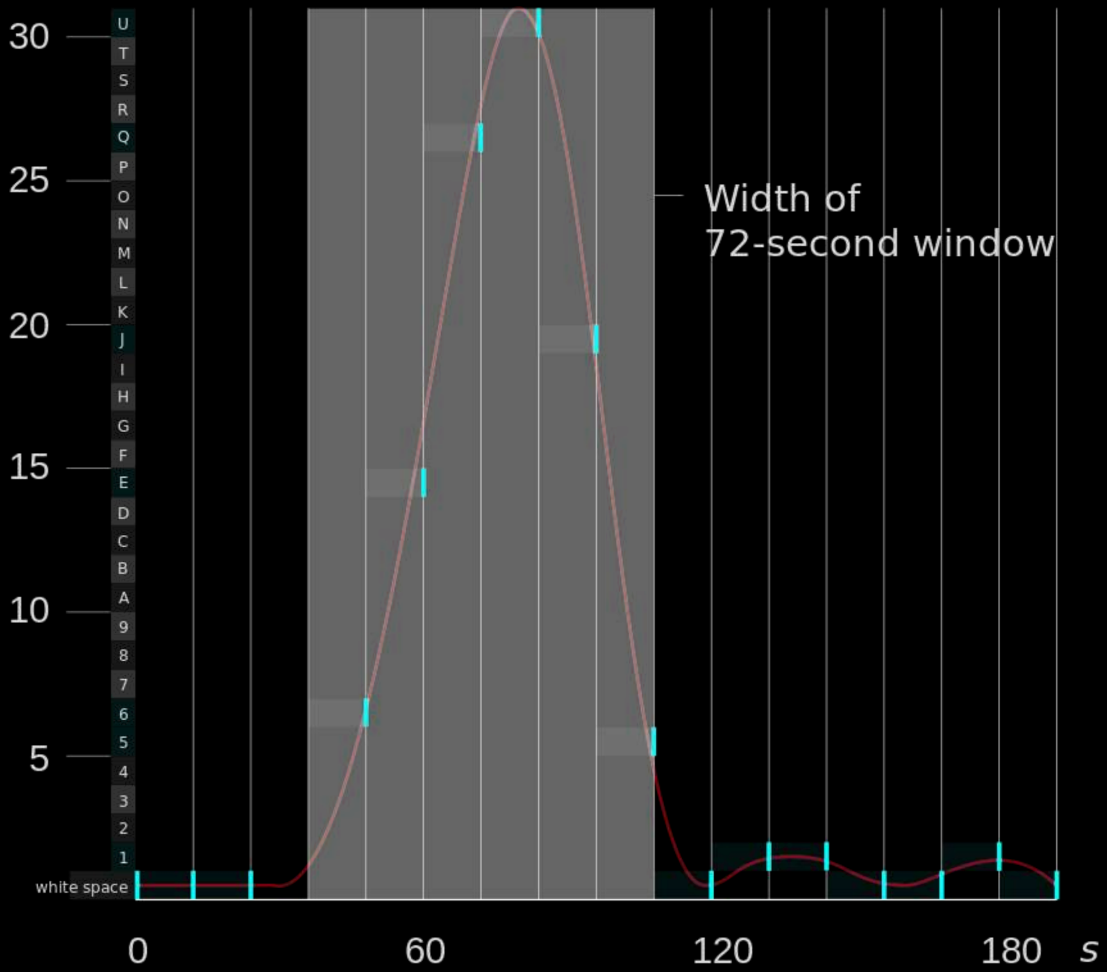
WOW

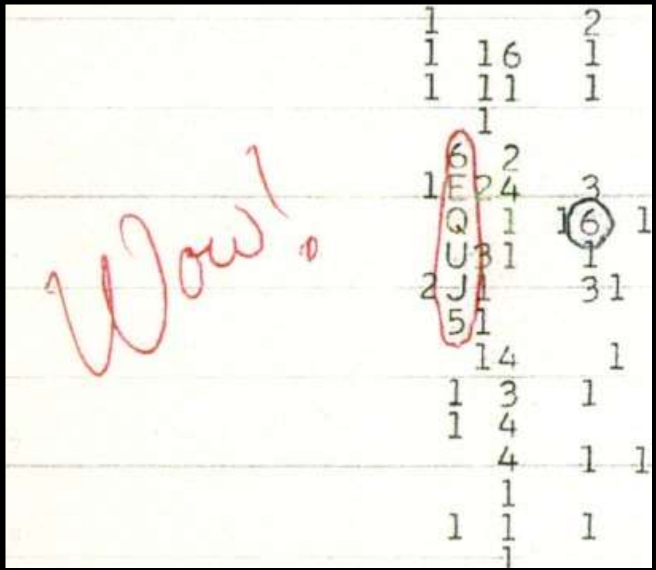
1977





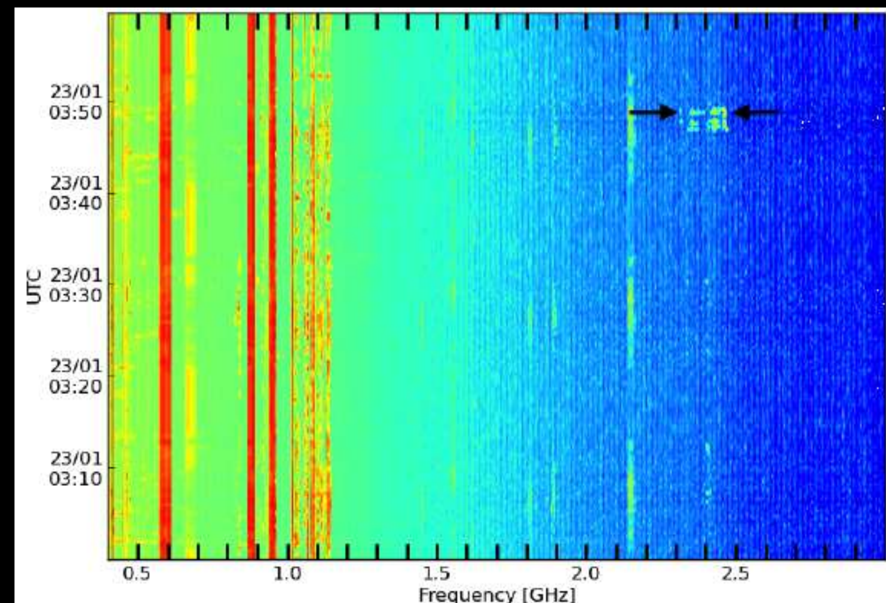
WOW


30
25
20
15
10
5
U
T
S
R
Q
P
O
N
M
L
K
J
I
H
G
F
E
D
C
B
A
9
8
7
6
5
4
3
2
1
white space
Width of
72-second window
0
60
120
180
s


Wow!

Záhadný signál

1998 - 2015



Mon. Not. R. Astron. Soc. 000, 000–000 (0000) Printed 10 April 2015 (MN LaTeX style file v2.2)

Identifying the source of perytons at the Parkes radio telescope

E. Petroff[1,2,3*], E. F. Keane[1,4,3], E. D. Barr[1,3], J. E. Reynolds[2], J. Sarkissian[2], P. G. Edwards[2], J. Stevens[2], C. Brem[2], A. Jameson[1], S. Burke-Spolaor[5], S. Johnston[2], N. D. R. Bhat[6,3], P. Chandra[7], S. Kudale[7], S. Bhandari[1,3]

Kde hľadať

- Hviezdy typov G, K, M
- Staršie hviezdy
- Zemi-podobné planéty
- Veľké mesiace obrov

Čo nám zostáva:

- Preskúmať dôkladne Slnečnú sústavu
- Byť schopní navštíviť aspoň blízke hviezdy
- Postaviť citlivejšie prístroje
- Mať trpezlivosť a šťastie

Hľadáme, ale zatiaľ bez presvedčivých dôkazov

ĎAKUJEM ZA POZORNOSŤ

“Existujú dve možnosti: alebo sme vo vesmíre sami, alebo nie sme. Obidve sú rovnako desivé!

-- *Arthur C. Clarke*