

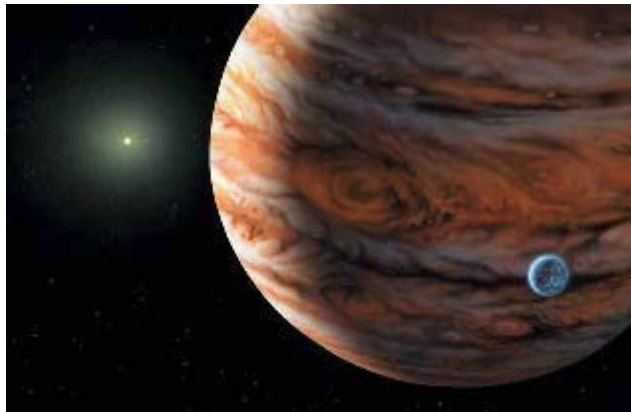
Exoplanety



Co je exoplaneta a co hnědý trpaslík?

pro obě tělesa – jsou méně hmotné než hvězdy, ale mohou mít větší velikost!

- ❖ hnědý trpaslík - 13 až 75-80 M_{Jup} – teoreticky mohou zapálit deuterium nebo lithium (ne trvale!)
- ❖ exoplanety - horní mez hmotnosti - 13 M_{Jup}



Exoplanety (extrasolar planet)

Existují planety také kolem jiných hvězd než Slunce?

antika – myslitelé – proč ne?

od 18. století - Laplace, Kant – vznik Sluneční soustavy

1988 - planeta γ Cep (hypotéza)

1989 – HD 114762b (potvrzeno až 1996)

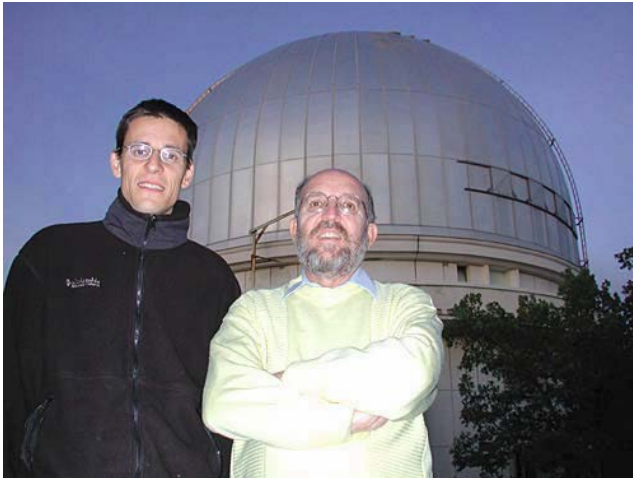
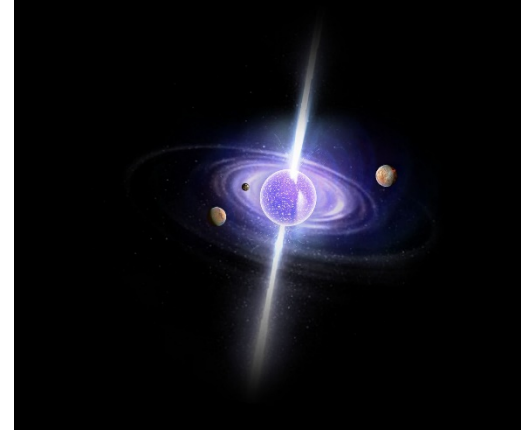
1991/2 - A. Wolszczan, D. A. Frail – Arecibo - dva objekty 2.8 a $3.4 M_z$
u pulsaru PSR1257+12

1995 - M. Mayor, D. Queloz - těleso u 51 Pegasi (od r. 2016 planeta Dimidium)

2024 (8.12.) – 7360 exoplanet!, 5051 pl. soustav (např. Kepler 90 – 8 planet, HD 10180 - 7 planet+2 kandidáti; TRAPPIST-1 - 7+1 planet ...) – zdroj: <http://exoplanet.eu/catalog/>

NASA: 5788 exoplanet (8.12.2024) <https://exoplanets.nasa.gov/discovery/exoplanet-catalog/>

2019 Nobelova cena Mayor & Queloz & Peebles



Exoměsíce(20 kandidátů), exokomety, ...

Rozmanité exoplanety

Podle velikosti a vlastností

- **Plynní obři (exo Jupiter)** – o velikosti Saturnu a Jupiteru a větší
- **Neptunu podobní (exoneptun)** – velikost Uranu nebo Neptunu, s vodíkovou nebo héliovou atmosférou
 - Mini-neptun – menší než Neptun, ale větší než Země
- **Superzemě (superterran)** – kamenné, hmotnější než Země, ale lehčí než Neptun; nemusí mít atmosféru
- **Terestrické (exozemě, terran)** – o velikosti Země a menší ($0,5 - 5 M_Z$ nebo poloměru $0,8 - 1,5 R_Z$), z kamenů a kovů, některé mohou mít oceány a atmosféru; např.: v sousedství pulsaru PSR1257+12, u Gliese 581 (kamenná, asi 1,5krát větší než Země), KOI 500 ($1,3 R_Z$), Kepler 20e, Kepler 42b,d – menší než Země

Podle trajektorie

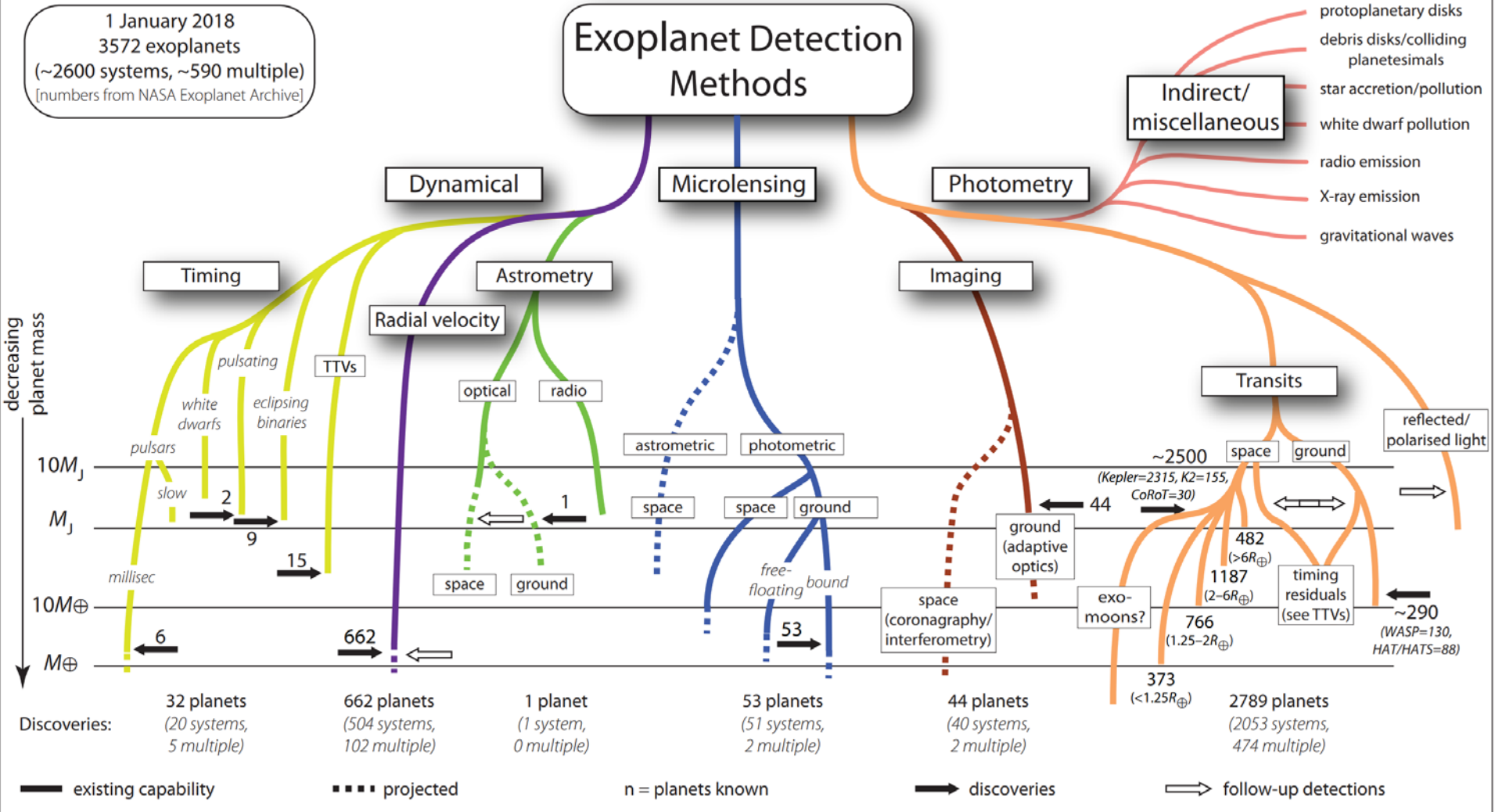
„**horcí Jupiteri**“ - exoplaneta Dimidium u hvězdy 51 Pegasi – velmi malá vzdálenost od hvězdy -> povrch (nejspíš plynná atmosféra) až $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$;
problém: zatím není plně v souladu s teorií vzniku planet

excentričtí exo Jupiteri - tělesa s velice protáhlou dráhou, připomíná trajektorie krátkoperiodických komet;
problém: tak velké excentricity se nečekaly; není jasné, jak je objasnit.

bludné planety (*rogue planet*, isolated planetary-mass object, interstellar planet, nomad planet, free-floating planet, orphan planet) - 892 exoplanet (8. 12. 2024); SDSS J111010.01+011613.1 ($10-12 M_J$, vzdál. 63 ly) a PSO J318.5-22, ($5,5-8 M_J$, vzdál. 80 ly)

1 January 2018
3572 exoplanets
(~2600 systems, ~590 multiple)
[numbers from NASA Exoplanet Archive]

Exoplanet Detection Methods



Na stopě cizích planet

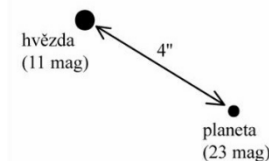
v minulosti - **přímé pozorování** planet jiných hvězd není zatím možné.

velký rozdíl jasností,
malá vzdálenost.

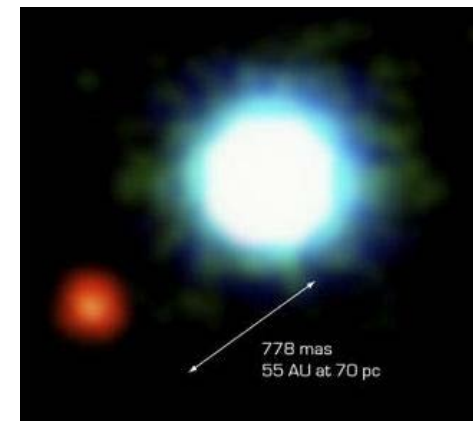
od 2004 už NEPLATÍ – Very Large Telescope
planeta u hnědého trpaslíka 2M1207

k 8.12. 2024 – 1055 exoplanet, 312 soustav

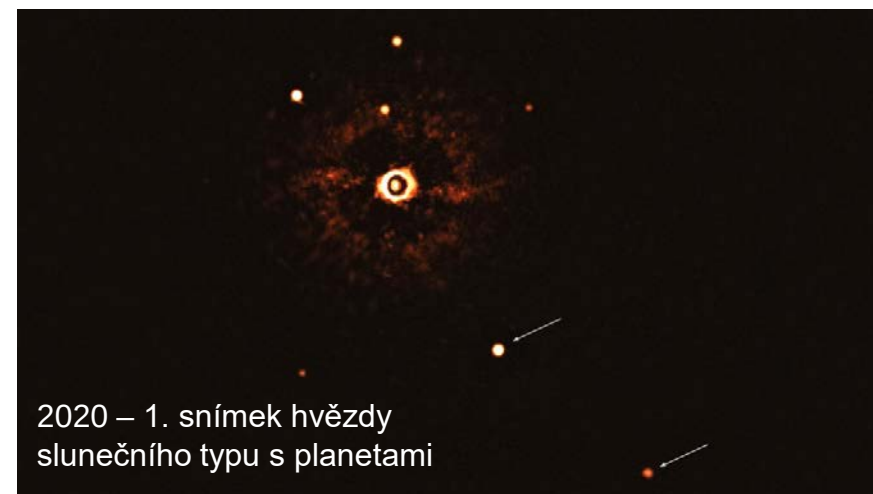
Přímé pozorování:



Jupiter u hvězdy Proxima Centauri obíhající ve vzdálenosti 780 milionů km



hnědý trpaslík 2M1207
(modrý objekt) a jeho
planeta (červeně)



2020 – 1. snímek hvězdy
slunečního typu s planetami



JWST

Star
HIP 65426

zakrytá
mateřská
hvězda

Exoplanet
HIP 65426 b

JWST

NIRCam

F300M

NIRCam

F444W

MIRI

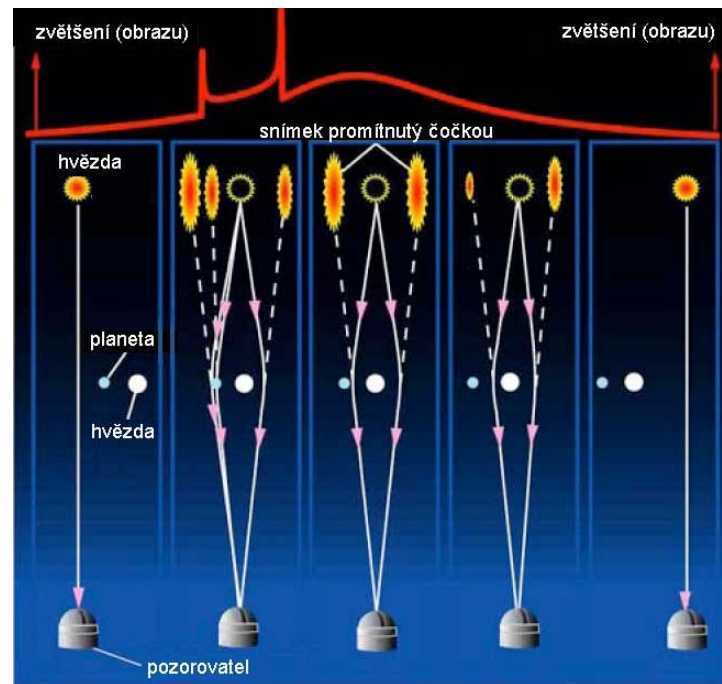
F1140C

MIRI

F1550C

Planet

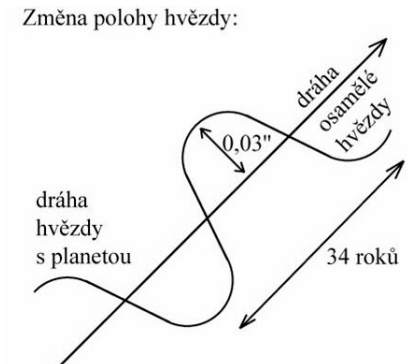
Gravitační mikročočky



309 exoplanet, 265 soustav
(k 8. 12. 2024)

Astrometrie - sledování pohybu vytypované hvězdy na hvězdné obloze: 194 planet (8. 12. 2024)

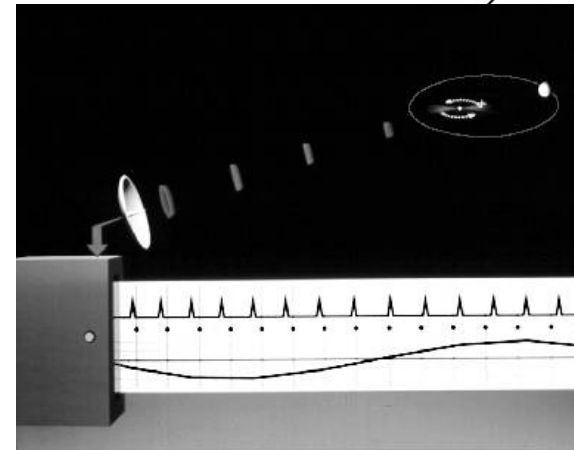
Jupiter u hvězdy Proxima Centauri obíhající ve vzdálenosti 780 milionů kilometrů



Timing - 177 exoplanet (8. 12. 2024)

Pulsar - anomálie v pulzech pulzarů

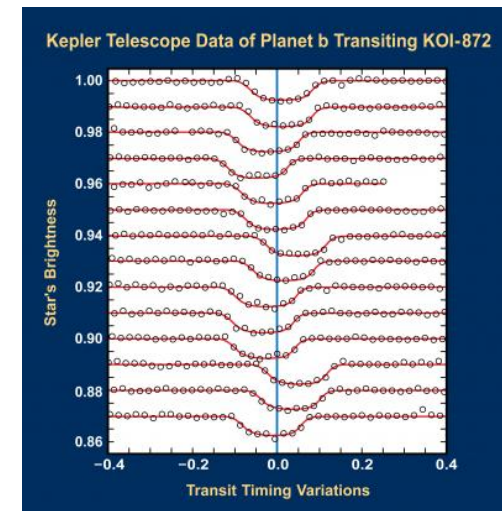
Proměnné hvězdy – odchylky pravidelných změn periodicky proměnné hvězdy



Transit timing variation method (TTV)

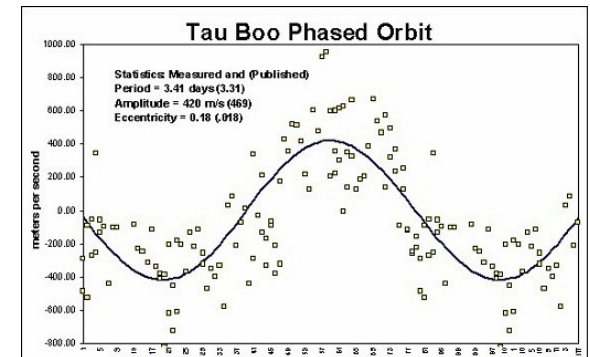
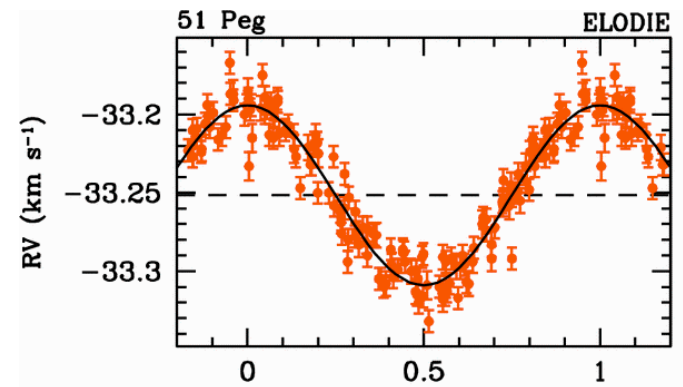
= změny okamžiků středů transitů;

- u transitující exoplanety umožňuje objevit další členy planetární soustavy, případně další hvězdu v systému
- velmi citlivá a použitelná i na velké vzdálenosti, kde RV nestačí
- umožňuje určit max. hmotnost objektu => odlišit hvězdy, hnědé trpaslíky a planety
- poprvé u dat z Keplera: Kepler 19b TTV s amplitudou 5 min a periodou ~ 300 dní => další planeta Kepler 19c
- k 8. 12. 2024 34 exoplanet



Radiální rychlosti

- založeno na Dopplerově principu – využívá se posunu čar ve spektru mateřské hvězdy,
- od 80./90. let 20. století – několik týmů, běžně 15 m/s, zlepšeno až na přesnost 0,1 m/s! (Jupiter – 12,5 m/s, Země 0,1 m/s)
- dříve nejúspěšnější metoda (8. 12. 2024) – 1278 planet, 956 planetárních soustav



Transity

- pozorování přechodu exoplanety před mateřskou hvězdou;
- nyní nejúspěšnější metoda - 4480 exoplanet, 3428 soustav, 686 soustav s více planetami (8. 12. 2024)
- program se zapojením amatérů a menších dalekohledů
- KEPLER, COROT, TESS, CHEOPS

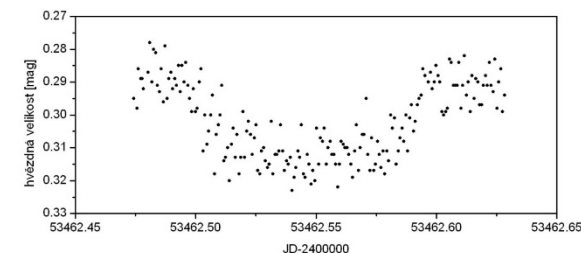
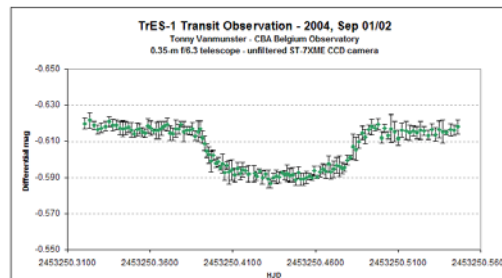
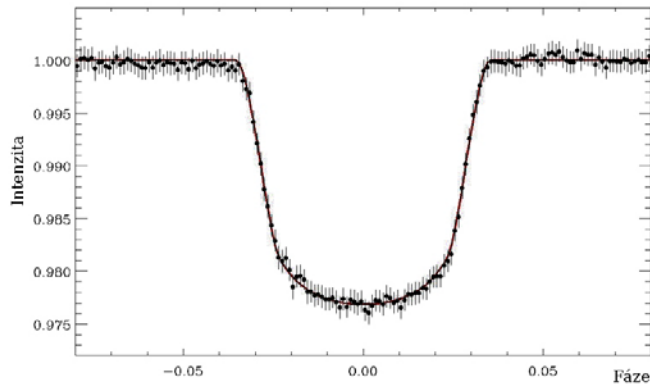
HAT = *Hungarian-made Automated Telescope*

TrES = *The Transatlantic Exoplanet Survey*

WASP = *The Wide Area Search for Planets*

NGTS = *Next-Generation Transit Survey*

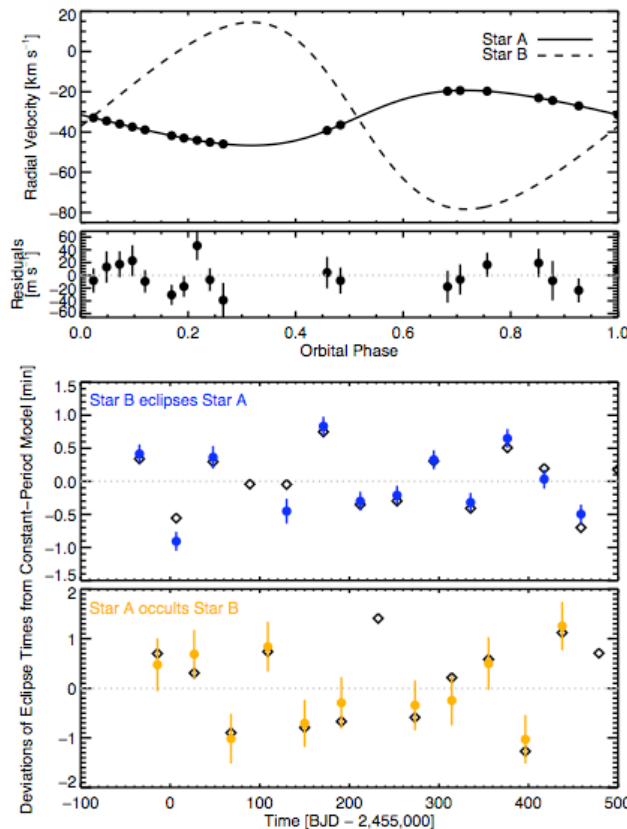
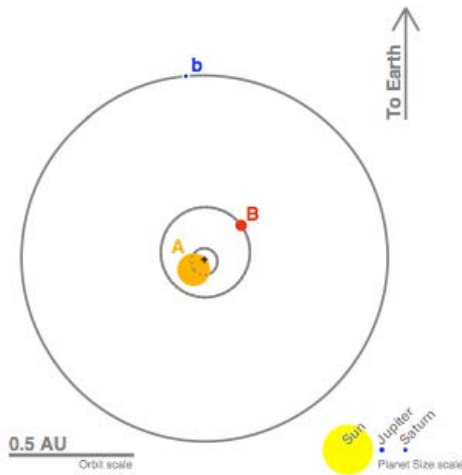
XO, TRAPPIST, MASCARA aj.



Transit duration variation method (TDV)

Změny trvání transitu - důsledek působení dalšího tělesa v soustavě nebo apsidální precese u excentrické planety (přítomnost další planety a důsledek OTR).
První případ circumbinární planety
Kepler 16b – objev potvrzen touto metodou

Kepler-16b: transitující circumbinární planeta



Katalog exoplanet - ETD

[Úvod](#) - [Katalog exoplanet](#) - [Výpis](#)

Zadejte plné nebo částečné jméno exoplanety

Nebo zadejte rovníkové souřadnice (J2000.0)

Rektascenze:

Deklinace:

Poloměr hledání:

Vyhledat

+ Vložit nový objekt

Zobraz záznamů:

Copy

Excel

ID	Záz.	Jméno	Status	Jasnost (Mag)	Hloubka (%)	Délka (m)	Inklinace (°)	V. poloosa (AU)	R _J	R _S	Rektascenze	Deklinace	Vytvořil
		Vyhledat	Vyhledat	Vyhledat	Vyhledat	Vyhledat	Vyhledat	Vyhledat	Vyhledat	Vyhledat	Vyhledat	Vyhledat	Vyhledat
1	650	TrES-3 b	CND	12.41	2.72	77.4	82.15	0.0226	1.305	0.813	17 52 07.00	+37 32 46.00	admin
2	0	HD41004B b	CND	0	8.8	0	0	0	0	0	06 00 00.00	-48 14 00.00	admin
3	17	OGLE-TR-113 b	CND	14.42	2.28	112	89.4	0.0229	1.09	0.77	10 52 24.00	-61 26 48.00	admin
4	12	OGLE-TR-132 b											admin
5	0	GJ 876 d											admin



TrES-3 b (Exoplaneta, Kandidát)

☉ RA: 17h 52m 07.00s; DE: +37° 32' 46.00" (268.0291666567, 37.5461111106)

OSC 03089-00929 b, V: 434 Her b

Údaje:

- jasnost (Mag): 12.410 (V)
- Hloubka transitu (%): 2.72
- Hloubka transitu (Mag): 0.02914
- Délka transitu (m): 77.4
- Poloměr planety (R_{pl}): 1.305 +/- 0.09
- Poloměr hvězdy (R_{sd}): 0.813 +/- 0.027
- impakt faktor: 0.8277

• Vytvořil: admin

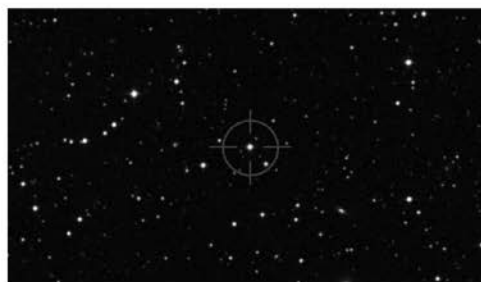
[Zobrazit seznam pozorování >>](#)

Orbitální elementy:

- Perioda (d): 1.30618608
- Zákadní epocha (C): 2454538.58069
- Velká poloosa (AU): 0.0226 +/- 0.0013
- inklinace (°): 82.15 +/- 0.21

[Zobrazit předpověď transitu >>](#)

Mapka



Počet transitzí

650 x



Počet pozorovatelů

74 x



Přidáno v abílených

0 x



Naposledy pozorováno před

35 dny

[Variace okamžiku středu transitu \(TTV diagram\)](#)

Družicový výzkum



2006-2013 - COROT (Convection, Rotation and planetary Transits) na oběžné dráze družice (33 exoplanet a cca 600 kandidátů),



2009-2014 - družice Kepler – (2778 potvrzených, 1984 kandidátů k ověření; 30 exozemí v obyv. zóně)

Mise K2 – 548 potvrzených (977 kandidátů k ověření)



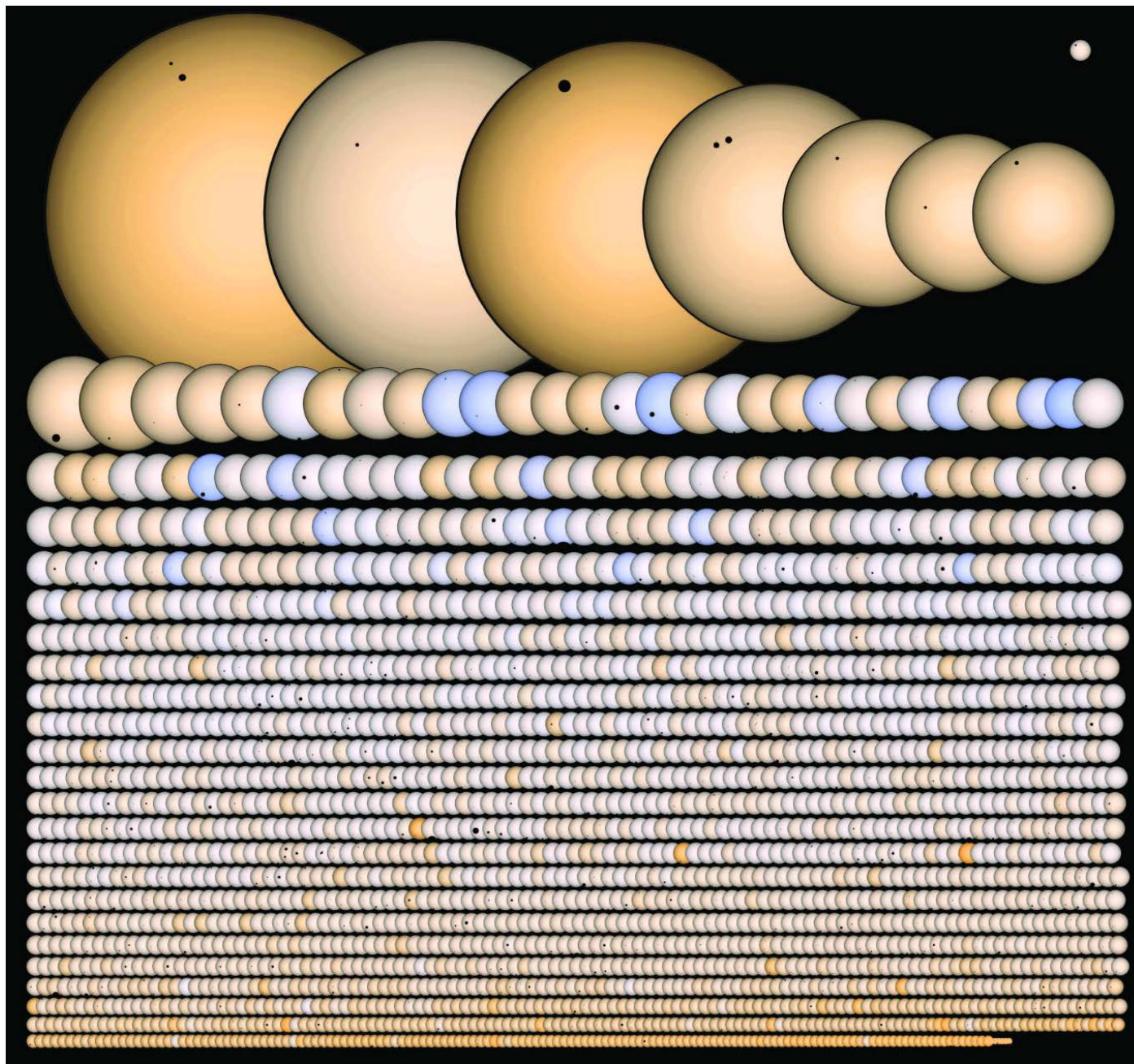
Obě prováděly nezávisle přesnou fotometrii vybraných hvězd a hledaly exoplanety pomocí jejich tranzitů přes disk mateřské hvězdy (počty exoplanet k 13.12. 2023).

TESS (od 2018) – 571 potvrzených exoplanet, 7351 kandidátů (8.12. 2024) <https://exoplanets.nasa.gov/tess/>



Další projekty: CHEOPS (2019), PLATO (2026), Tinkle (2024), ARIEL (2028), RST (2026-7) ...

exoplanety z dat družice KEPLER



Výsledky družice KEPLER

2011 objev kolem hvězdy KOI-730 dvě planety v jedné trajektorii!

2011 – první planety velikosti Země

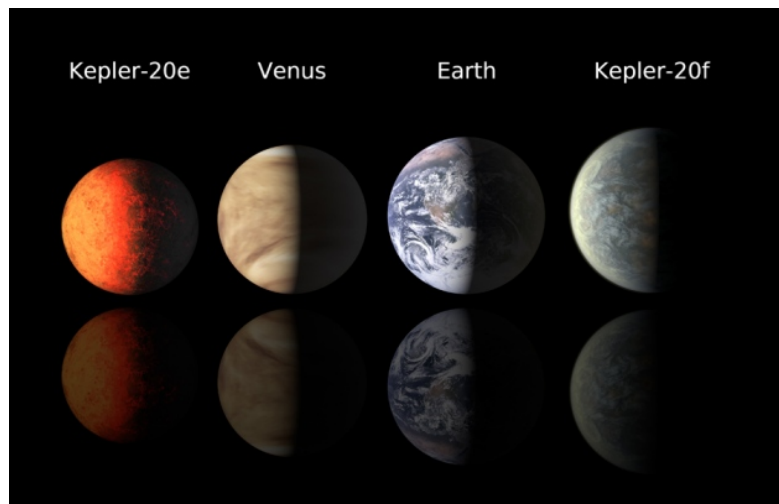
2011/2012 nová třída exoplanet jako Tatooine obíhají kolem dvojhvězdy (190 k 12.12. 2023) https://exoplanet.eu/planets_binary/
dnes i ve vícenásobných soustavách

2013 – 1. odhad počtu exoplanet z pozorování

- 40 mld. exozemí kolem sluncí zónách života v Galaxii!

2015 - KIC 8462852 (Tabbyina nebo Boyajianové hvězda)

– nezvyklé změny jasnosti – zákryty kometami, civilizace...



Keplerův orloj IV

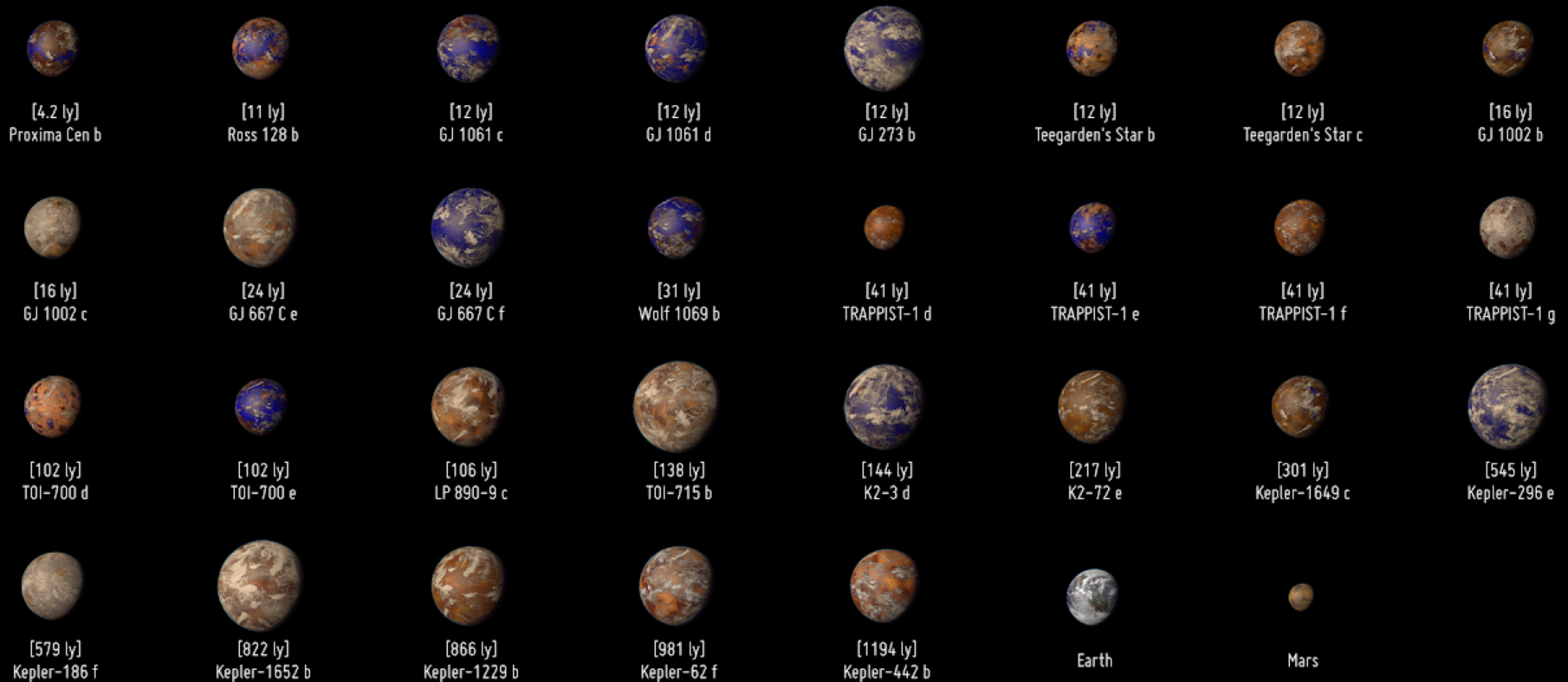


<http://www.astro.cz/apod/ap151205.html>

70 exoplanet v zónách života (21. 3. 2024)
29 kamenných planet, 41 s vodou

[katalog](#)

Potentially Habitable Worlds



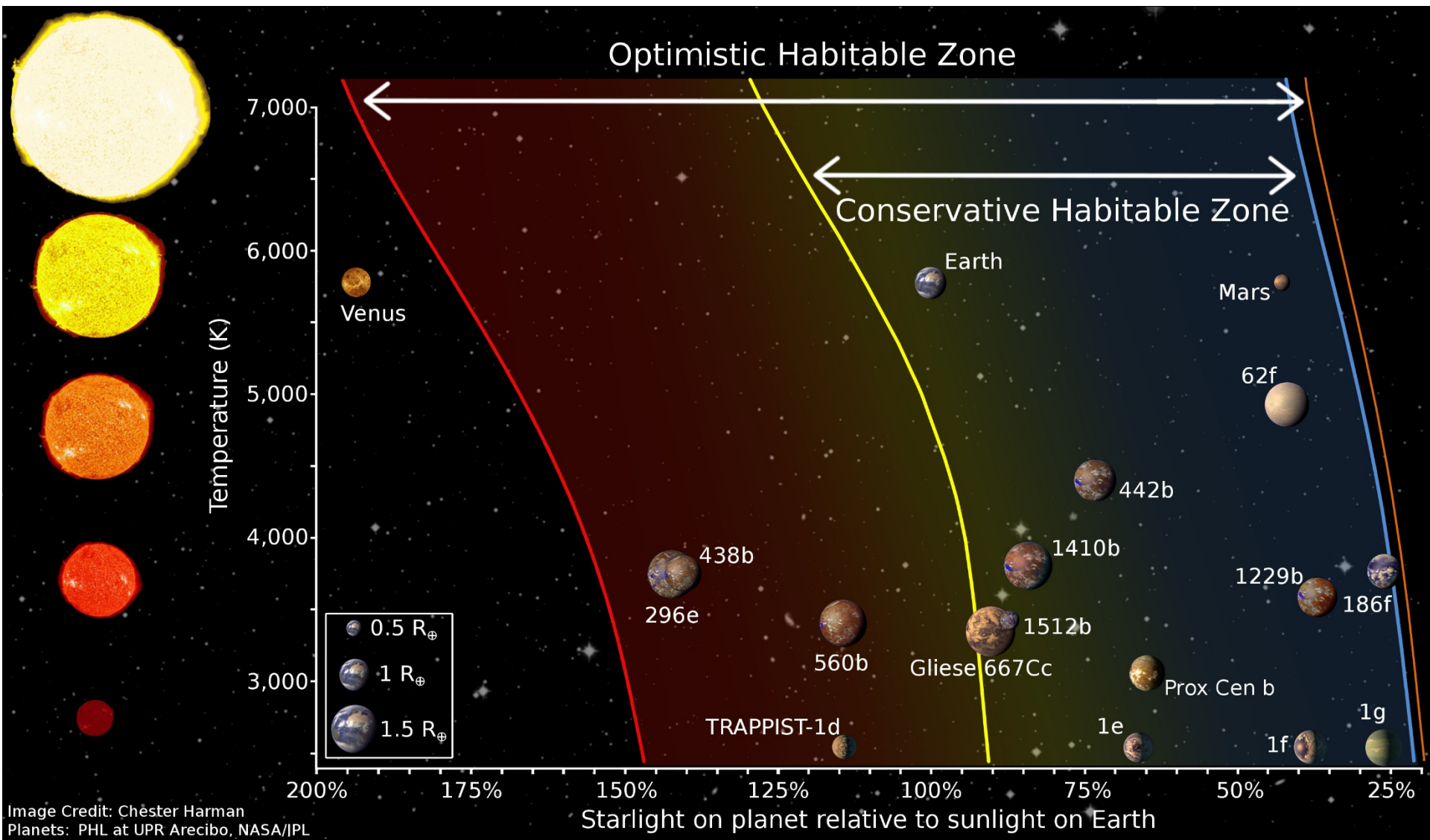
Artistic representations. Earth and Mars for scale.

Planets are organized in order of their increasing distance from Earth (shown between brackets in light-years).

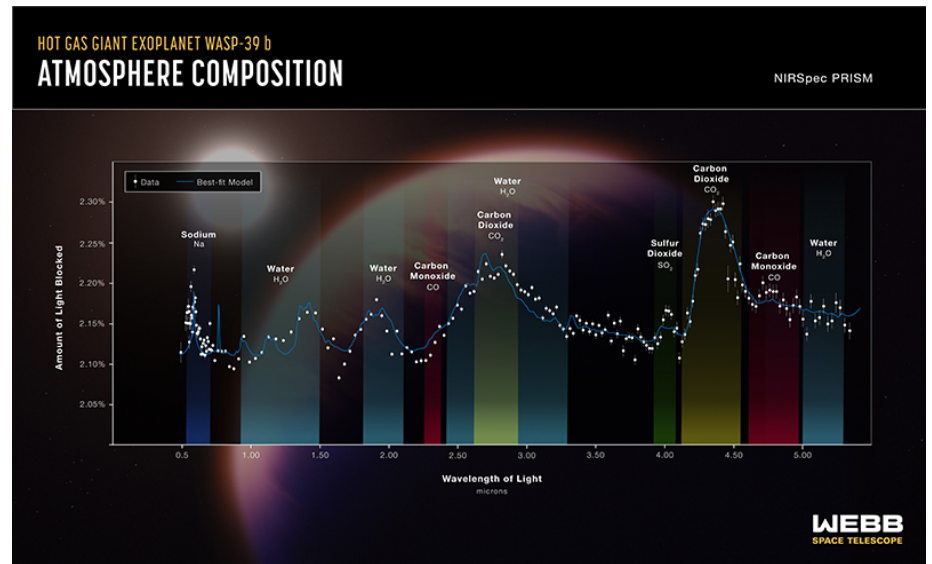
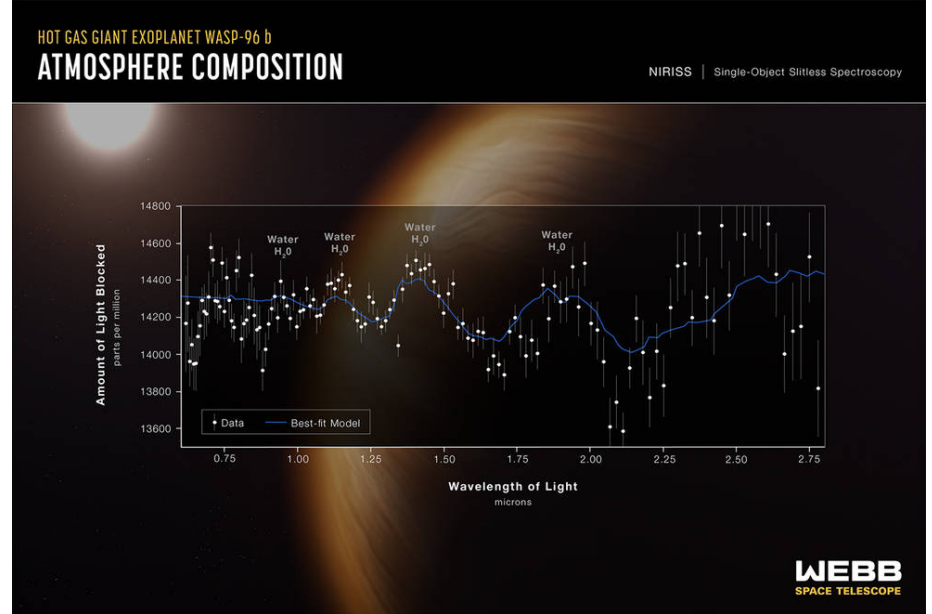
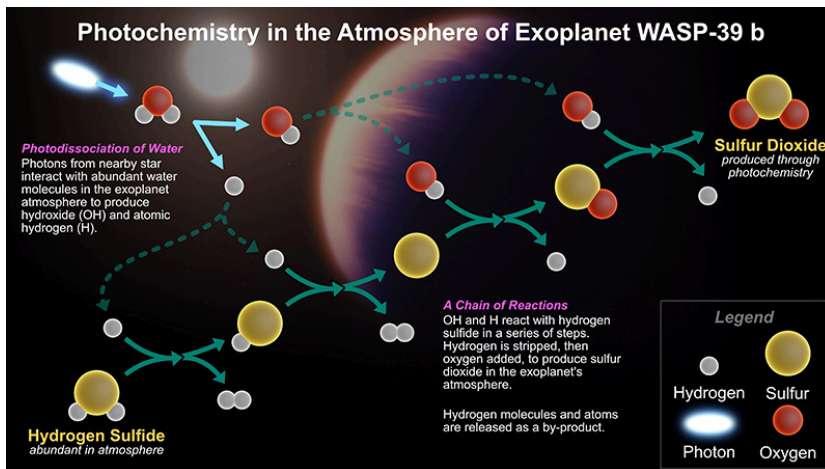
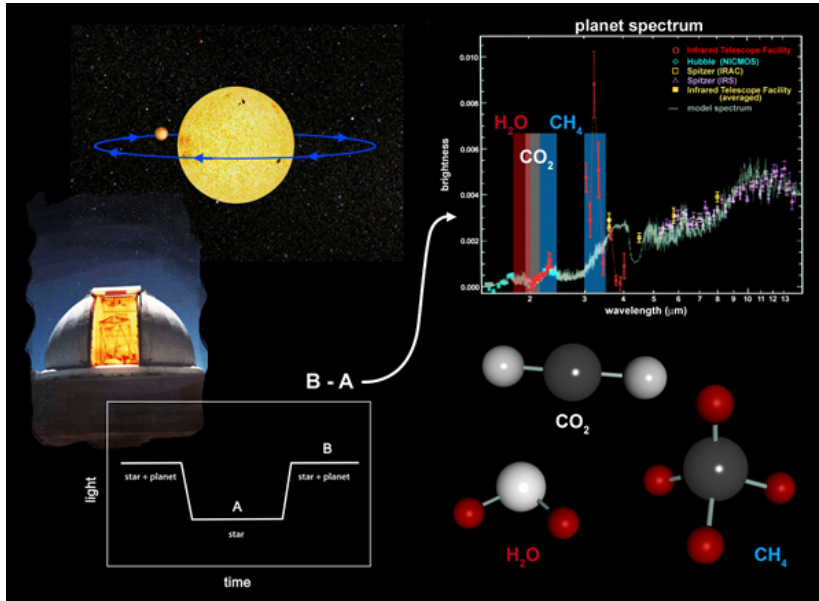
CREDIT: The Habitable Worlds Catalog, PHL @ UPR Arcibo (phl.upr.edu) Jan 2024

exozemě v zónách života? - např. u Gliese 581 - obíhá kolem mateřské hvězdy ve vzdálenosti, která by mohla zajistit přítomnost vody v kapalném stavu na povrchu planety
problém: jsou tam?

Hledání další Země



Atmosféry exoplanet



JWST - WASP-39b (22.11.2022)
transmisní spektroskopie => v atmosféře planety detekován oxid uhličitý, voda, oxid uhelnatý, sodík, draslík a další
=> planeta má podobné složení jako Saturn

Planety na počátku vývoje

Všechny planety a velké družice:

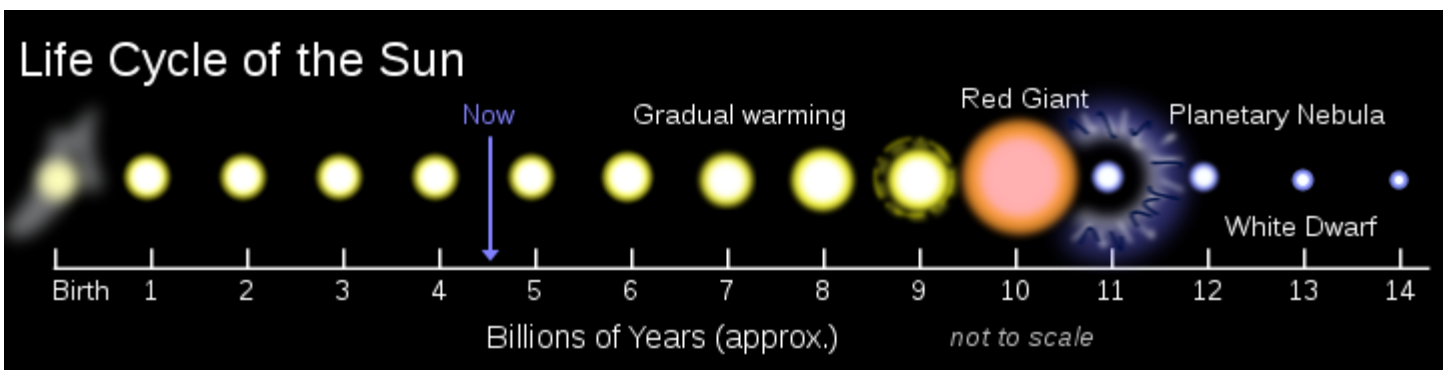
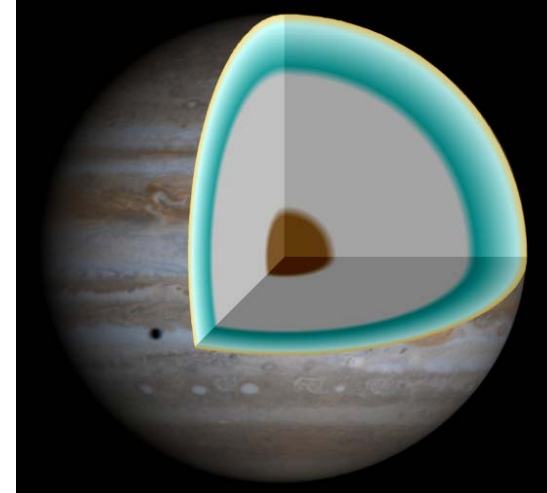
tři hlavní části (podle hustoty): *kůra*, *plášť* a *jádro*.

zárodečná látka v místě vzniku planety

víceméně stejnorodá -> smršťování -> zahřátí -> rozčlenění látky dle hustot (*diferenciace látky*) - před asi 4,5 miliardy roků.

zdroje energie planety

- smršťování zárodku planety,
- teplo vznikající při dopadech zbytků těles na planetární povrch,
- teplo uvolňované rozpadem radioaktivních prvků v nitru planety.



Velké bombardování

- vrchol - před 4 miliardami let
- zbytky po tvorbě planet a jejich družic -> srážky s planetami -> vznik kráterů na povrchu
- ukončení – před 3,5 miliardami let

velké kruhové pánve:

Měsíc - Mare Serenitatis, Mare Imbrium;

Merkur - Caloris Planitia;

Mars – Hellas;

Kallistó (u Jupitera) – Valhalla.



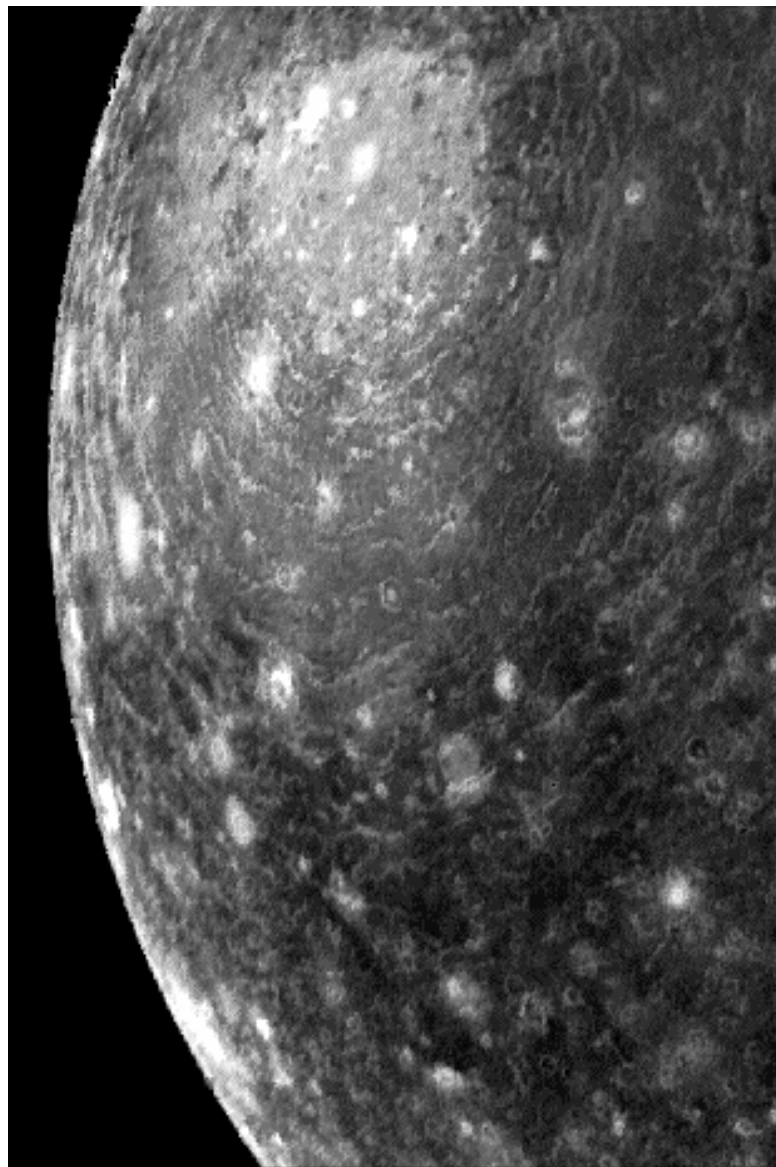




Mare Imbrium na Měsíci

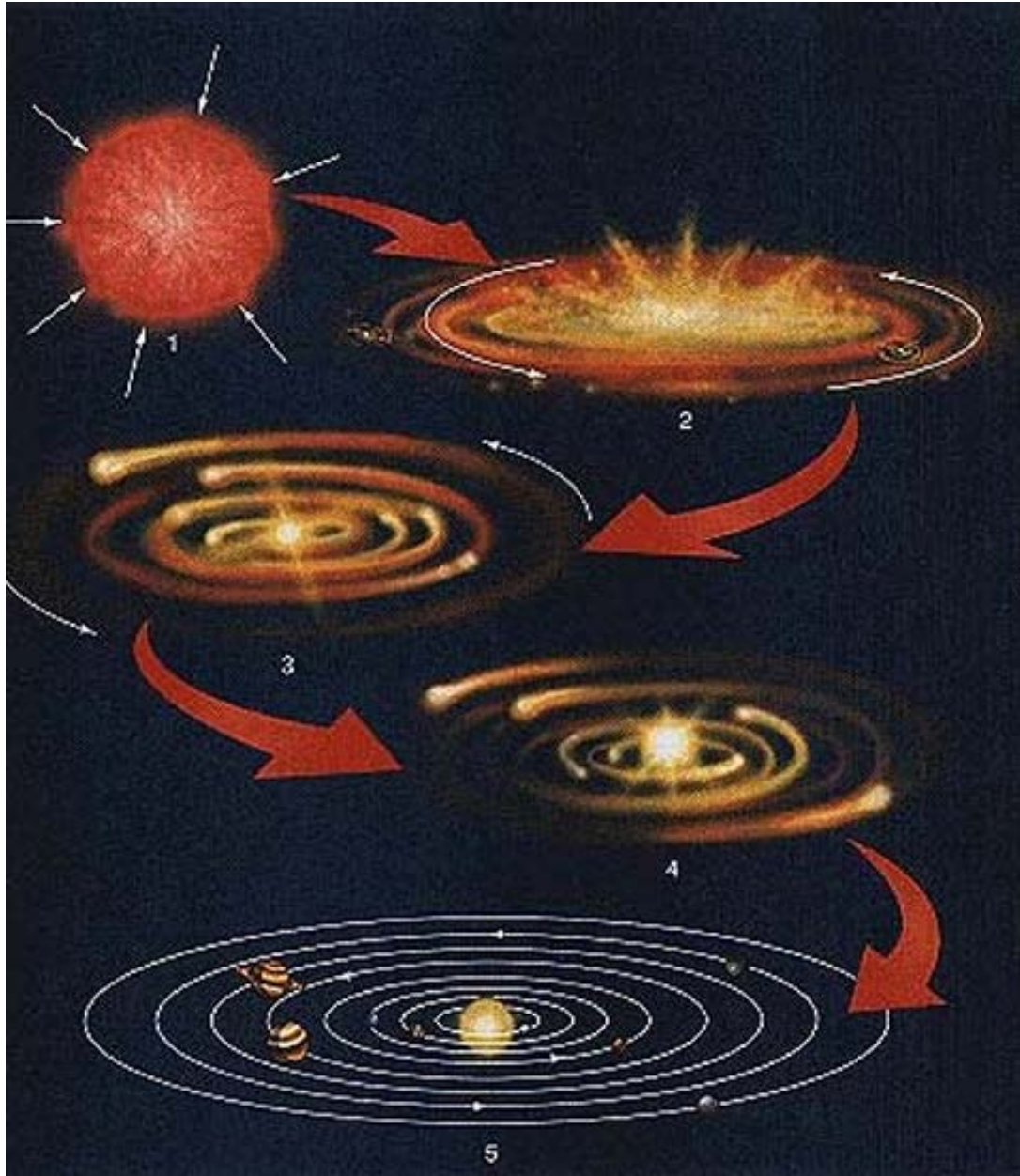


Caloris Planitia na Merkuru.



Pánev Valhalla (Jupiterova družice Kallistó).

Vývojový scénář sluneční soustavy



1 protoslunce

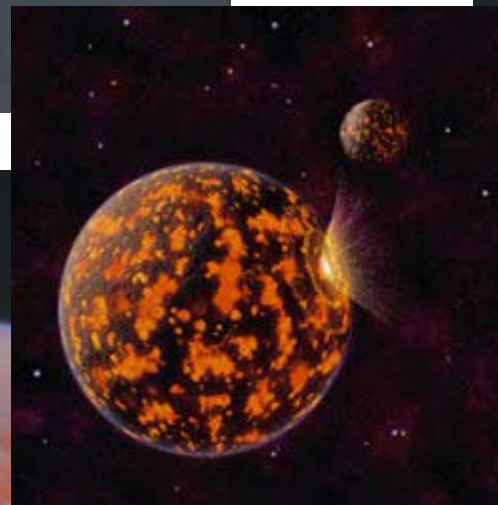
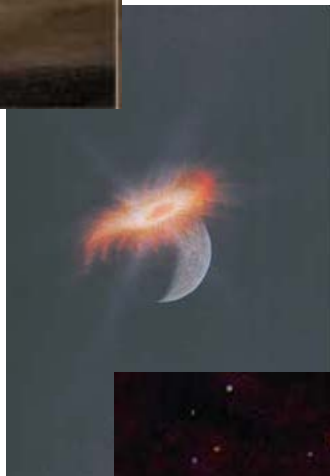
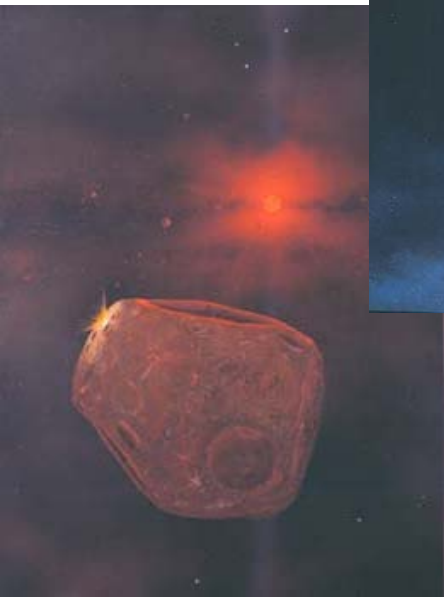
2 zárodečná mlhovina,
vznik vrstvy pevných
částic v rovině rotace
rovníku mlhoviny

3,4 akrece látky na
zárodky planet

5 vymetení zbytků plynu
ze soustavy
intenzivním slunečním
větrem

Představy ilustrátorů

This collage of 12 illustrations depicts various stages of planetary formation and celestial events. The top row shows a protoplanetary disk with a bright central star, a disk with concentric rings of dust and gas, a nebula with a bright central star, and a star with a bright blue and white flare. The middle row features a protoplanet with a bright red and orange core, a protoplanet with a bright blue and white core, a protoplanet with a bright red and orange core, and a protoplanet with a bright blue and white core. The bottom row shows a protoplanet with a bright red and orange core, a protoplanet with a bright blue and white core, a protoplanet with a bright red and orange core, and a protoplanet with a bright blue and white core.



Realita (2016, 2017)



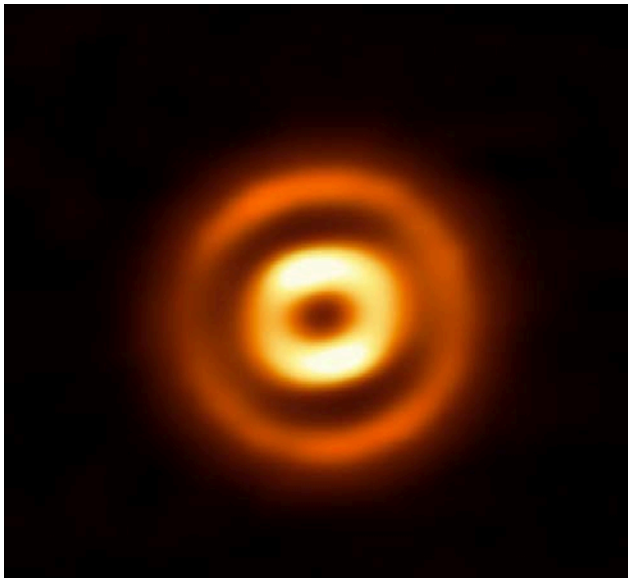
VLT,
SPHERE

HD 97048

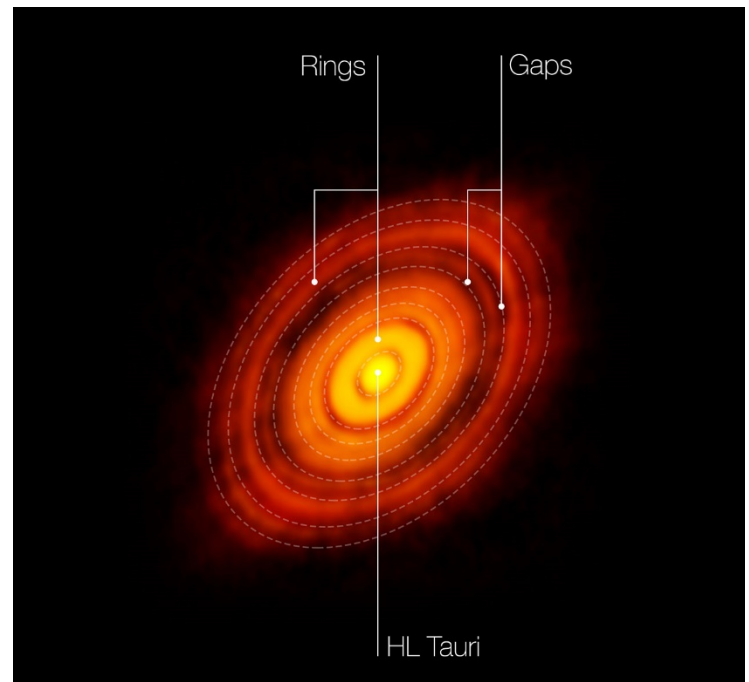
HD 135344B

RX J1615

HD 169142



ALMA



Hvězdná vichřice

Dnešní Sluneční soustava - málo prachu a plynu

Kam se poděly všechny částice?

prachové částice - pád na Slunce, na planety a jejich družice

plyn – odváť slunečním větrem – velmi intenzivní => vichřice – čistka za pouhý milion roků

„vyhozeno smetí“ (plyn a mikroskopický prach) o hmotnosti až $1 M_{\odot}$

Následky vichřice na planetách

- vnitřní planety – ztratily zbytky původních atmosfér
- velké planety – žádné výrazné stopy, atmosféry zůstaly zachovány v původní podobě.

Planety dnes (stopy předchozího vývoje)

v raných stádiích Sl. soustavy - planety a jejich velké družice - diferenciace látky podle hustoty, intenzivní bombardování
před 4-3 mld let - období mohutného vulkanismu – vylévání podpovrchové čedičové (=bazaltové) lávy do pánví a velkých kráterů
dnes – zřejmé stopy bombardování i etapy vulkanismu na terestrických planetách i na Měsíci

Útvary na povrchu planet a velkých družic

- sopky
- krátery
- pánve
- praskliny
- pevninské desky (jen u Země)

Magmatismus, vulkanismus

- formují povrch planet

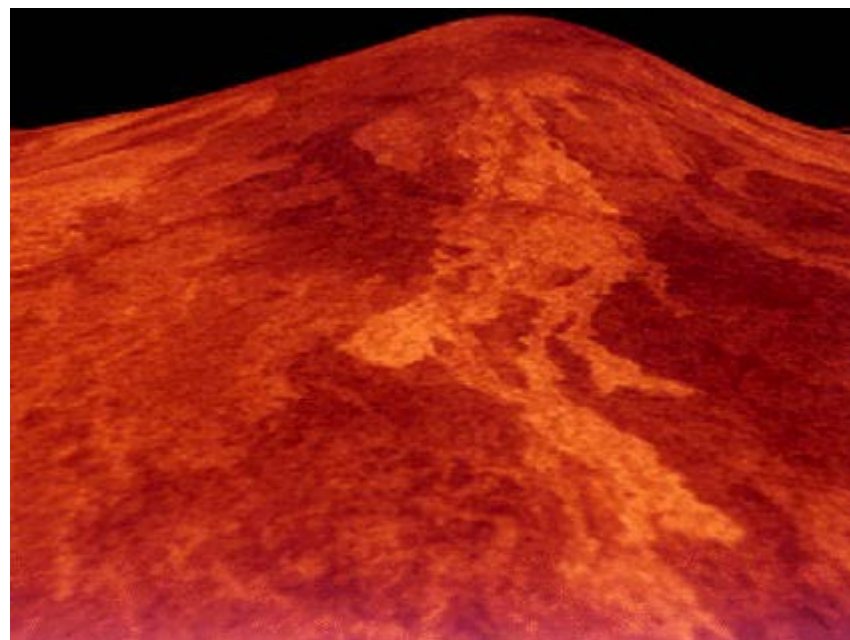
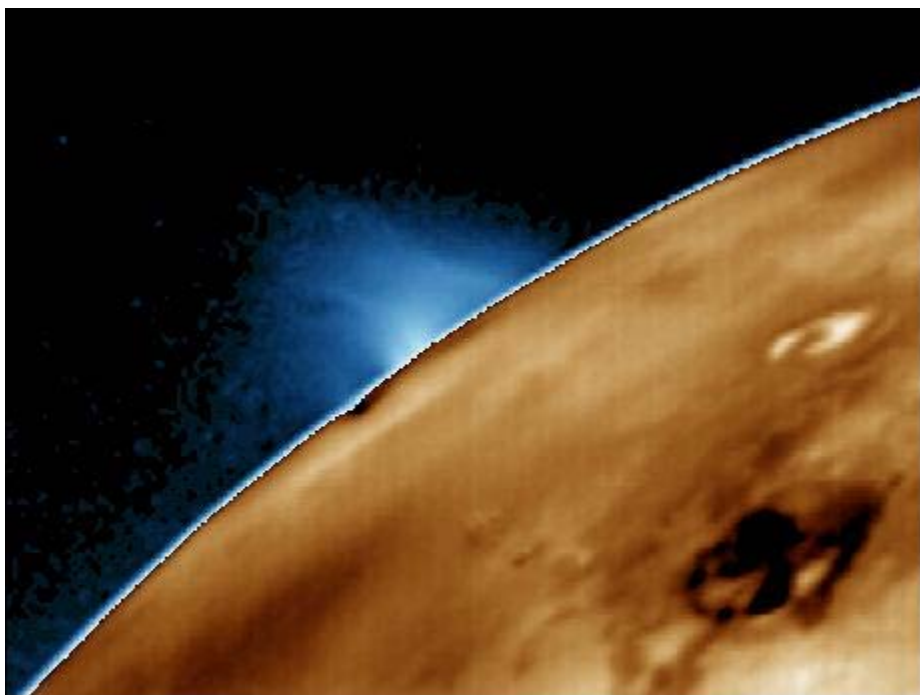
magmatismus - působení magmatu v hloubce

vulkanismus - *sopečná (vulkanická) činnost* na povrchu

- u planet zemského typu - bazaltový (neboli čedičový) vulkanismus, rozsáhlé, opakované výlevy lávy -> vznik bazaltových plošin (měsíční moře, hladké plošiny na Merkuru, oceánská kůra na Zemi);
- štítové sopky - Olympus Mons na Marsu, Beta Regio na Venuši, Havajské ostrovy na Zemi;
- měsíc Íó – jiný typ vulkanismu – důsledek slapových sil Jupiteru



Štítová sopka Olympus Mons na Marsu (průměr základny činí asi 550 km).



Vulkán Loki Patera na okraji Jupiterovy družice Ió (Voyager 1, 5. 3. 1979, 01:02:12 světového času, fialový filtr, snímek upravil M. Druckmüller)

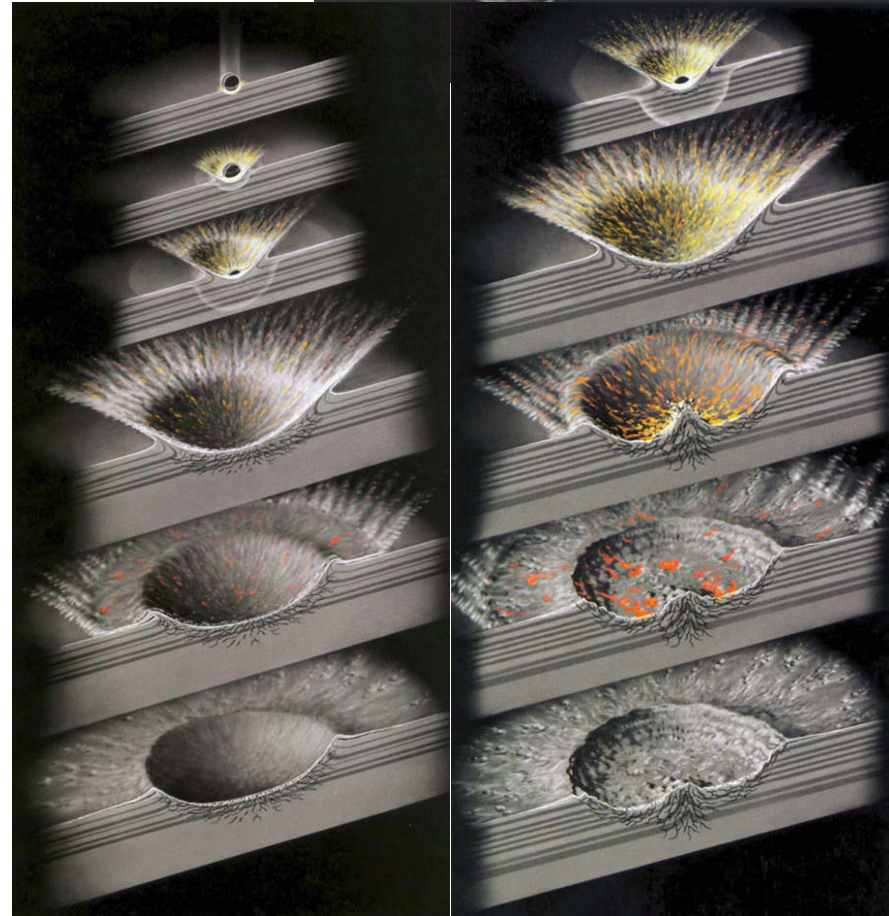
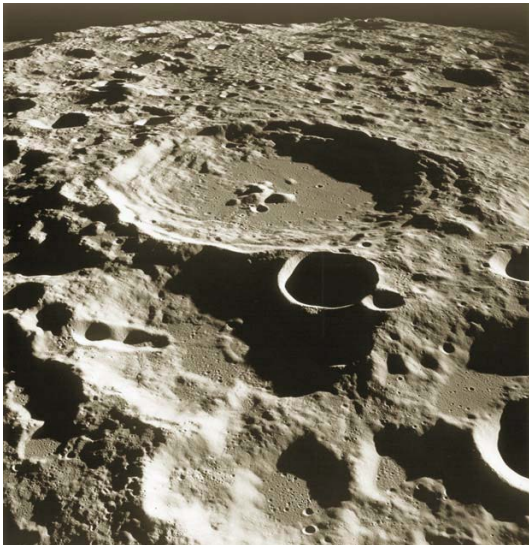
Impakty

= krátery po dopadu cizího tělesa - na všech planetách a jejich družicích

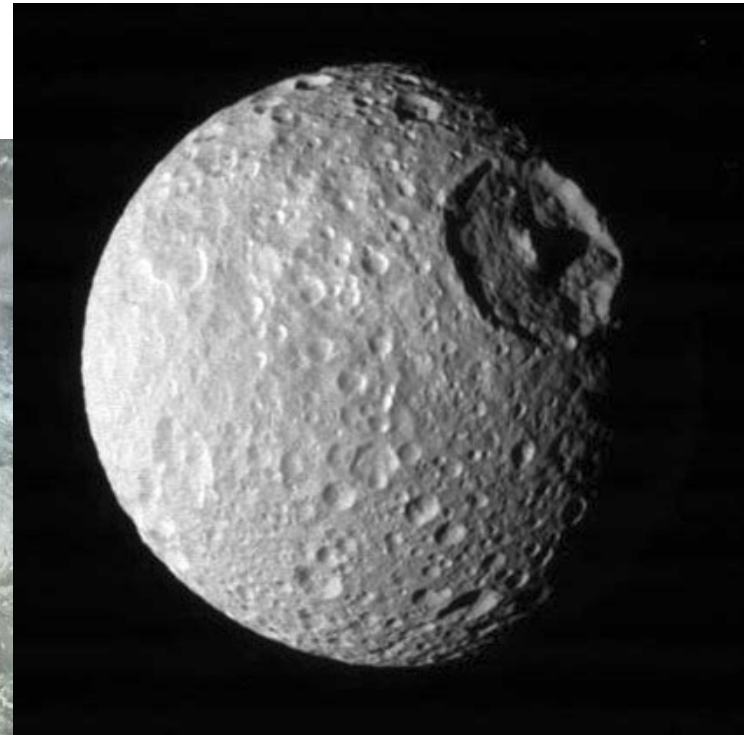
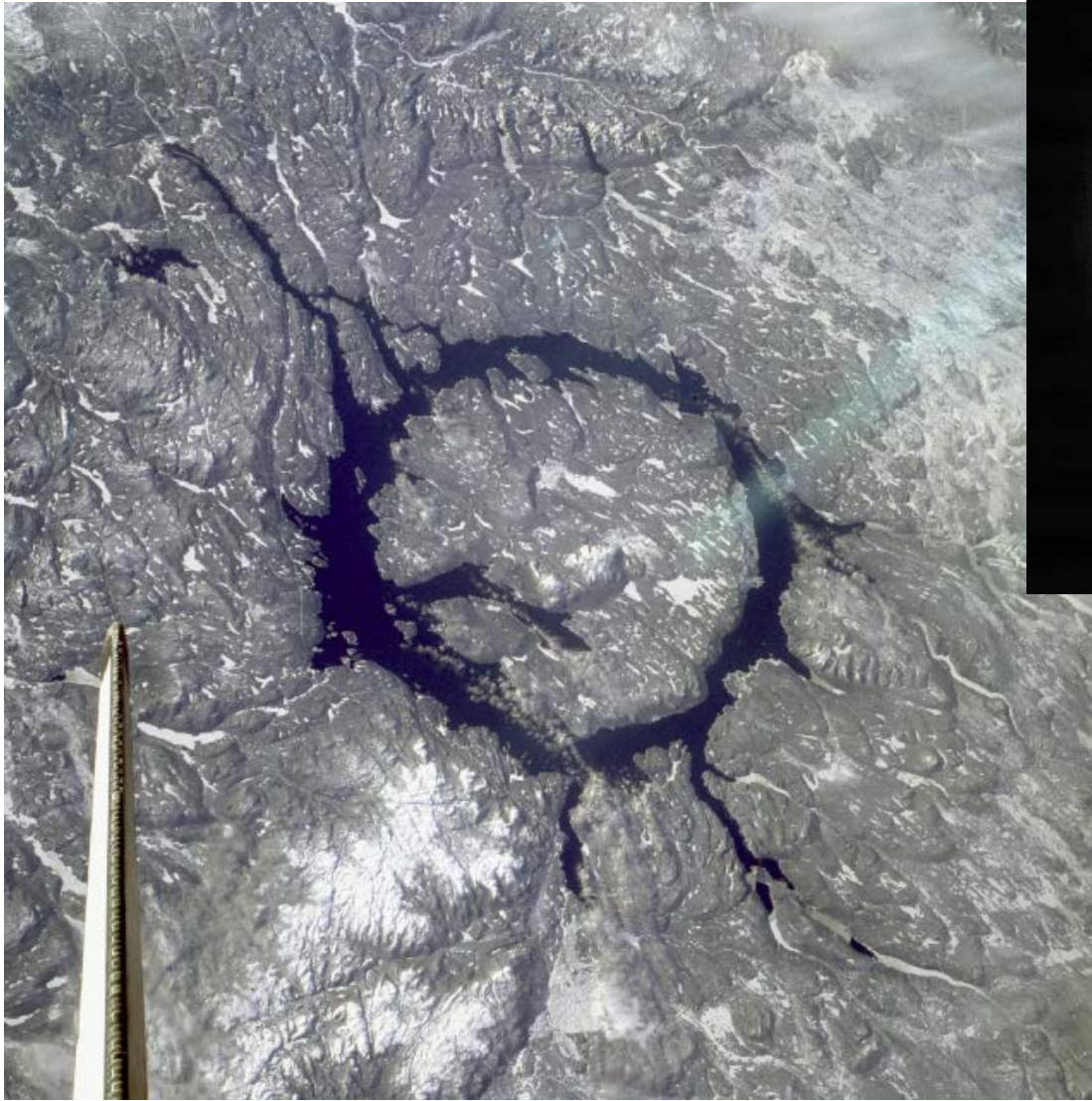
vznik zejména v době intenzivního bombardování, ale i dnes!

Země a další planety s intenzivním geologickým vývojem – stopy zahlazeny; „viditelné“ jen čerstvé krátery (cca 10^6 let nebo 10^7 let staré)

tvar kráterů – kruhový – proč?



Vznik jednoduchého a komplexního impaktního kráteru.



Praskliny

Tektonické pochody jsou velice rozmanité, každá planeta či větší družice má svůj vlastní tektonický styl.

Měsíc - jednoduchá tektonika soustavy trhlin a zlomů vzniklých:

- slapovými silami,
- smršťováním lávové výplně moří při vzniku impaktních pánví a velkých kráterů,

Mars - rozsáhlé příkopy a údolí, (Valles Marineris);

Venuše - tektonické procesy úzce spojeny se sopečnými;

Země – nejsložitější tektonika - rozpínání oceánského dna, *desková tektonika* (výhradně u Země!)



Proměny planetárních atmosfér

obří planety – původní atmosféry

terestrické planety – prvotní atmosféry odvála sluneční vichřice,
druhotná - poznamenána především geologickou aktivitou,
převládá oxid uhličitý

čím je planeta aktivnější, tím je její atmosféra hustší

Země – specifická atmosféra, vysoký obsah N, O; CO₂ je málo;
důsledek fotosyntézy; zdrojem některých složek atmosféry
- hydrosféra (oceány)

Mars – dnes - nehostinná pustina, na povrchu jsou nízké teploty a sucho.
- v 1. miliardě roků – vlhká a teplá (v důsledku sopek) planeta; hustá
atmosféra z CO₂ => silný skleníkový efekt; voda v tekutém stavu;
lijáky i sněhové bouře, řeky, vodní nádrže
- před asi 3,8 miliardy roků – konec prvotní sopečné činnosti -> pokles
koncentrace CO₂ -> řídnutí atmosféry -> voda na povrchu zamrzla
nebo sublimovala; -> Mars téměř jako dnes



Život na stárnoucí Zemi

Osud Země určuje Slunce!

Slunce -> velmi zvolna zvyšuje
zářivý výkon i rozměry ve fázi
červeného obra:

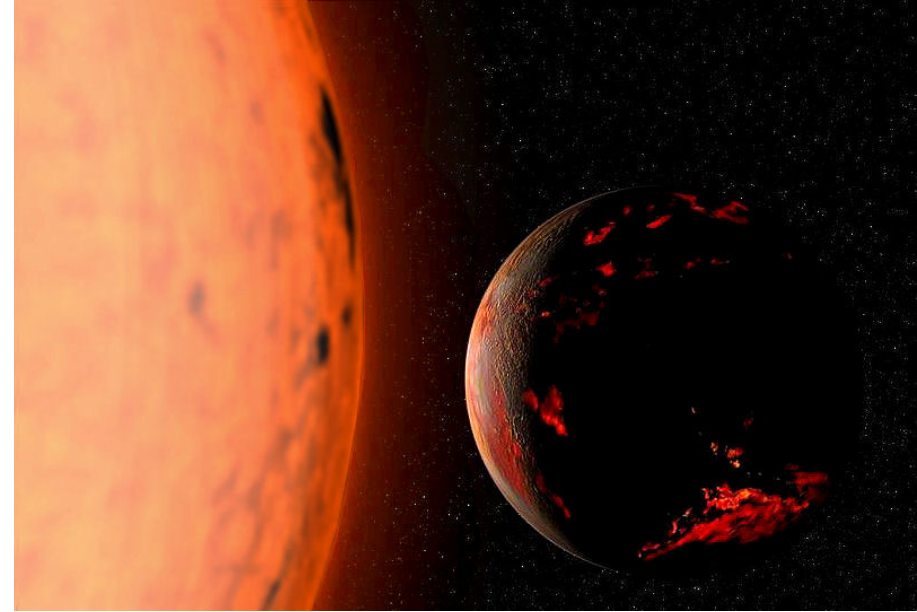
poloměr 1 au,

zářivý výkon $L=10^3 L_{\odot}$,

Merkur pohlcen

velmi silný sluneční vítr -> zmenšení hmotnosti Slunce => zvětší se
vzdálenosti všech planet od Slunce (Země 1,7 au)

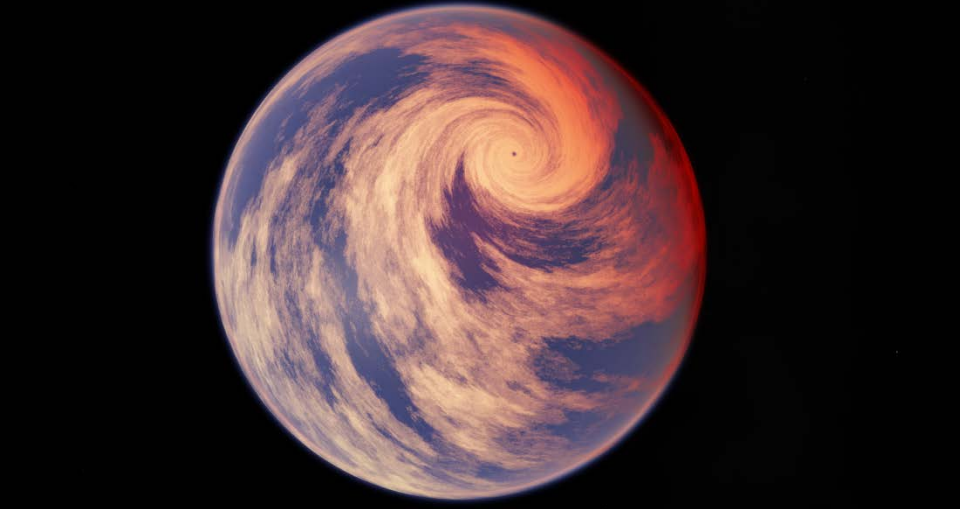
teplota Země výrazně vzroste => rozhodně neobyvatelná!





Země v současnosti



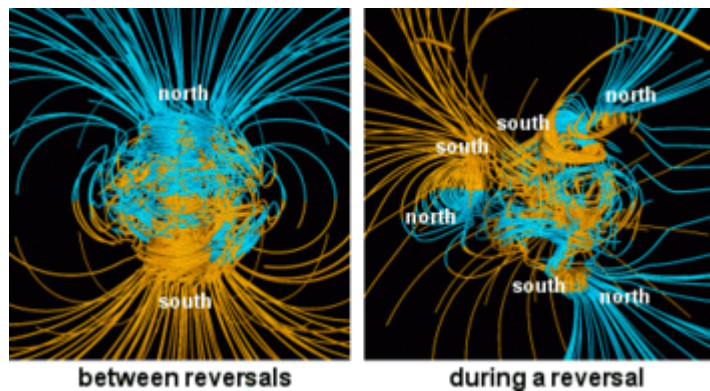


obří cyklón

dopad asteroidu



supervulkán



rychlá změna mg. pole





za 250 mil. let - vznik superkontinentu Pangea Ultima

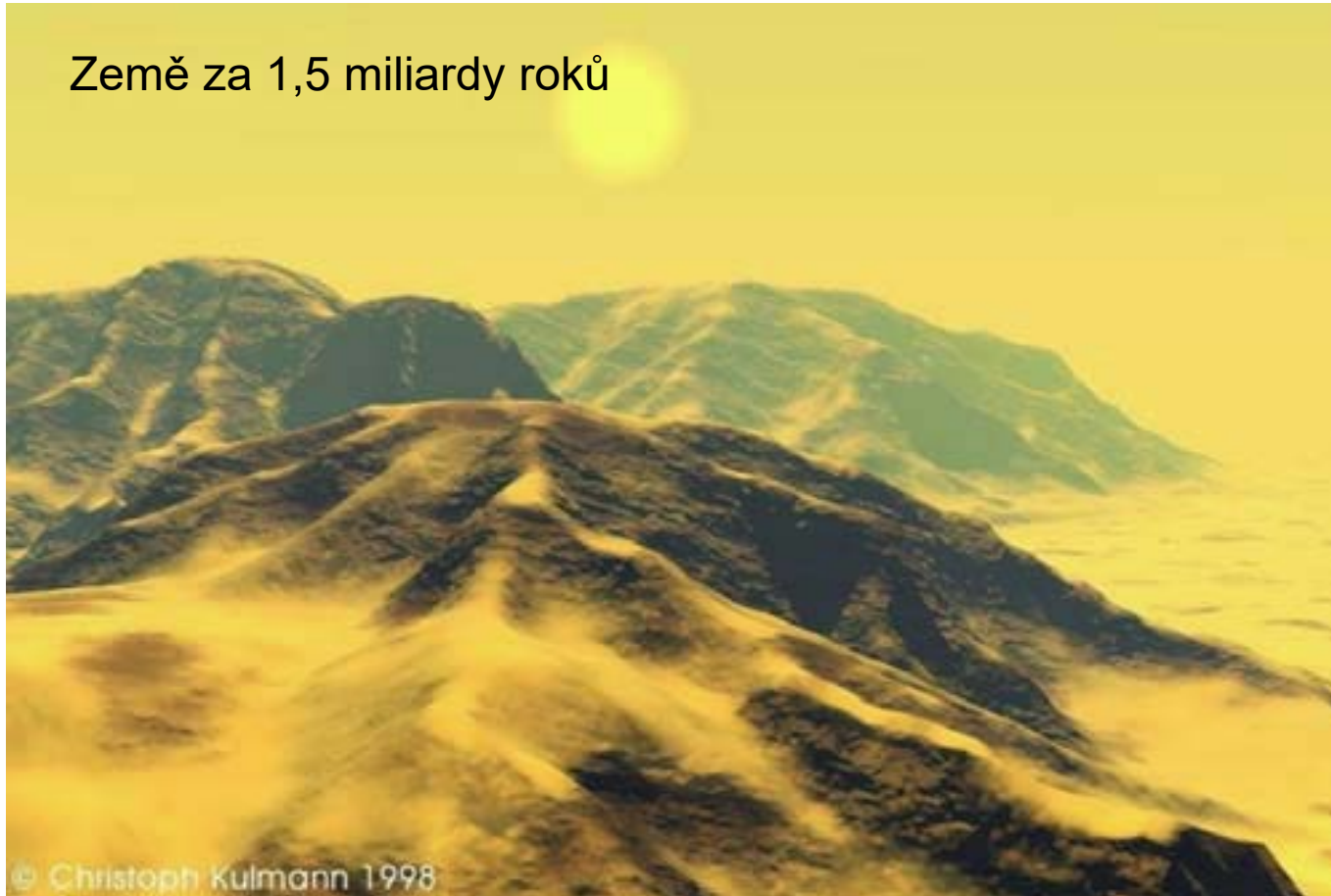
Země za 700 milionů roků



© Christoph Kulmann 1998

vypařování oceánů -> větší skleníkový efekt -> zvýšení teploty na 40-80°C

Země za 1,5 miliardy roků



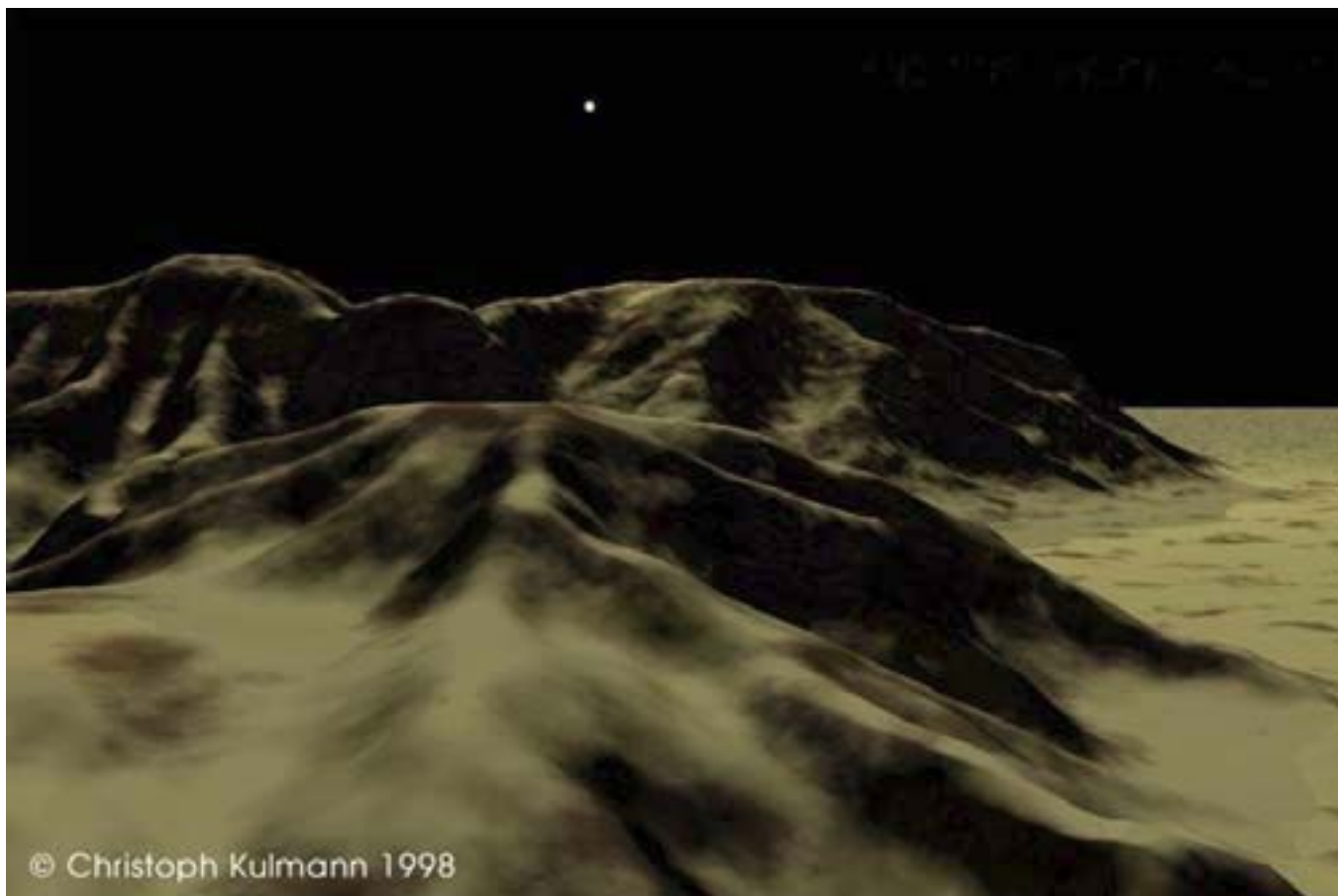
oceány se vypařily; překotný skleníkový jev, teplota $> 200^{\circ}\text{C}$
mrtvá planeta

Země za 7 miliard roků



Slunce červeným obrem až do 1 au => Země dále, ale bez atmosféry
s nataveným povrchem

Země za 10 miliard roků



mrtvý svět u chladnoucího bílého trpaslíka

Osud Země určuje Slunce!

- ano, ale jen na astronomické časové škále (miliardy let)

vývoj klimatu na Zemi - mnohonásobně kratší

– desítky milionů, i jen tisíců (či pouze stovek?) roků

v současnosti - doba meziledová - několikanásobně delší než ty předchozí;
globální oteplování -> ale za stovky až tisíce roků další doba ledová
(zatím nikdo nezveřejnil důvod, proč by se tak *nemělo* stát).

civilizační změny - desítky až stovky roků - přímo nesouvisejí s přírodními jevy

budoucnost Země – není ve hvězdách, ale v lidech!