

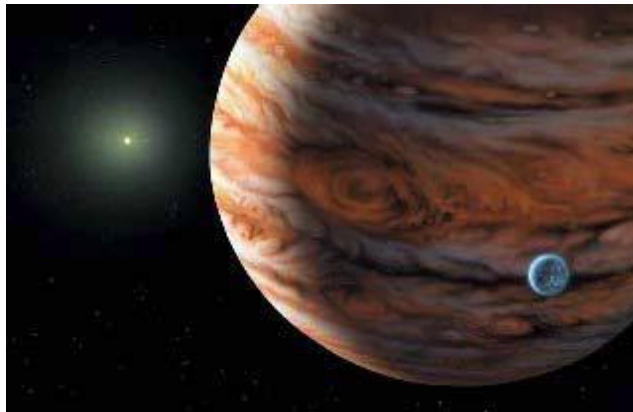
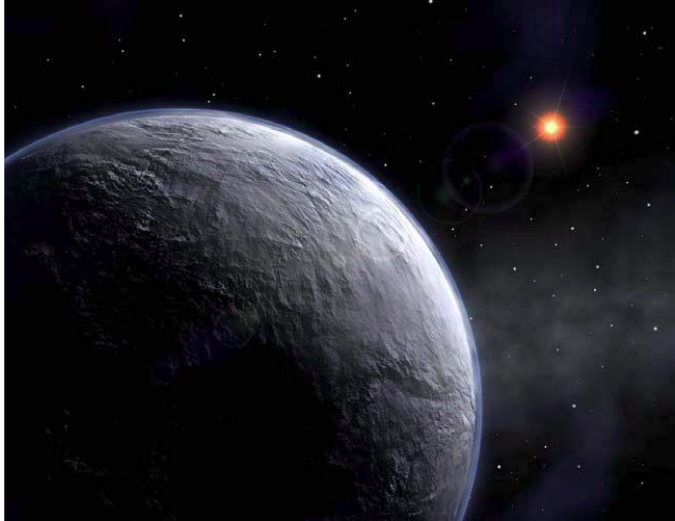
# Exoplanety



# 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  $M_{\text{Jup}}$  – teoreticky mohou zapálit deuterium nebo lithium (ne trvale!)
- ❖ exoplanety - horní mez hmotnosti - 13  $M_{\text{Jup}}$



# 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  $\gamma$  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

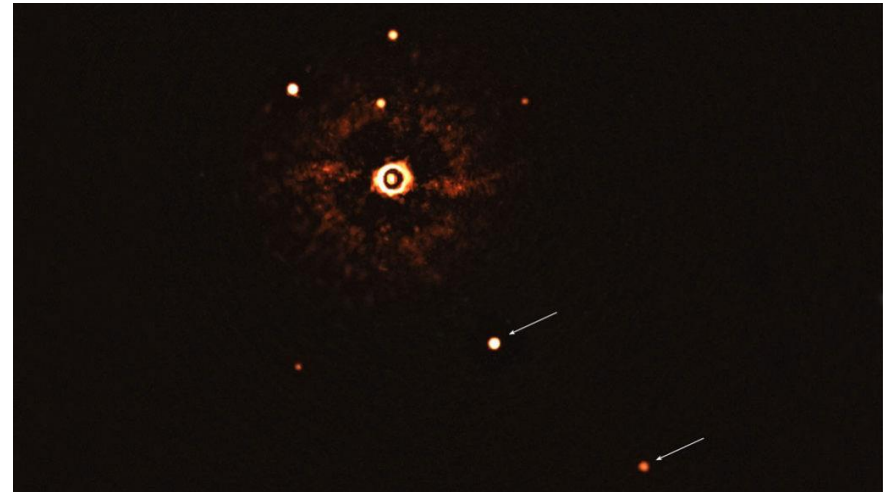
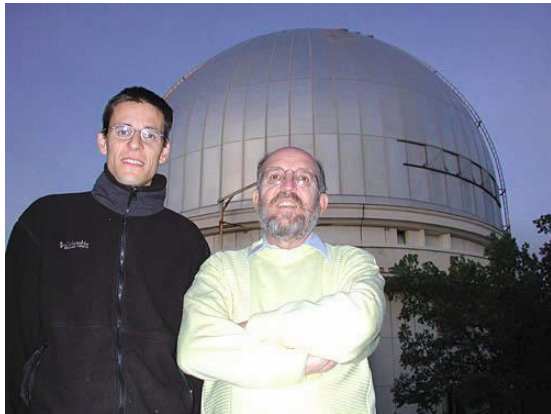
1995 - M. Mayor, D. Queloz - těleso u 51 Pegasi (od r. 2016 planeta Dimidium)

2021 (17.11.) – 4870 exoplanet!, 3599 pl. soustav (např. HD 10180 - 7 planet+2  
kandidáti; TRAPPIST-1 - 7+1 planet ...) – zdroj: <http://exoplanet.eu/catalog/>

NASA: 4569 exoplanet, 7932 kandidátů, 3387 soustav (17.11.2021)

<https://exoplanets.nasa.gov/discovery/exoplanet-catalog/>

2019 Nobelova cena Mayor & Queloz & Peebles



# Rozmanité exoplanety

„**horcí jupiteři**“ - exoplaneta Dimidium u hvězdy 51 Pegasi – velmi malá vzdálenost od hvězdy -> povrch (nejspíš plynná atmosféra) až 1000 °C;  
*problém: zatím není plně v souladu s teorií vzniku planet*

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

**exozemě** (terran) – planeta o hmotnosti 0,5 - 5  $M_Z$  nebo poloměru 0,8 - 1,5  $R_Z$   
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

**superzemě** – planeta velikosti Země, maximálně do desetinásobku průměru

**megazemě** – planeta velikosti Země, ale mnohem hmotnější – Kepler 10c (průměr má 2,3x větší než Země, ale je 17x hmotnější!!)

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

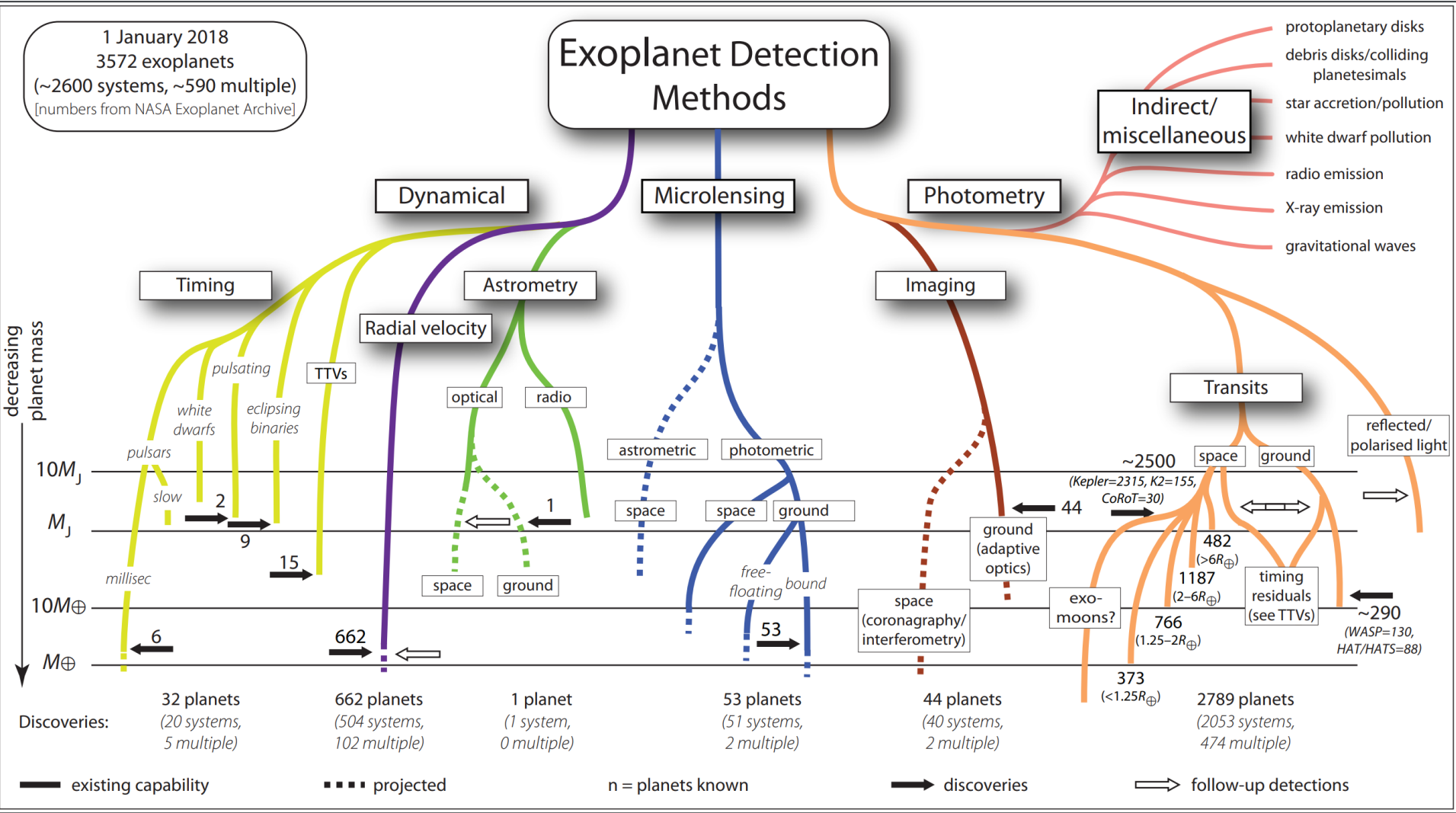
**bludné planety** (*rogue planet*, interstellar planet, nomad planet, free-floating planet, orphan planet) - 22 objektů, z toho 2 potvrzené (prosinec 2020); SDSS J111010.01+011613.1 (10-12  $M_J$ , vzdál. 63 ly) a PSO J318.5-22, (5,5-8  $M_J$ , vzdál. 80 ly)

**exoměsíce exoplanet** – 10 kandidátů



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

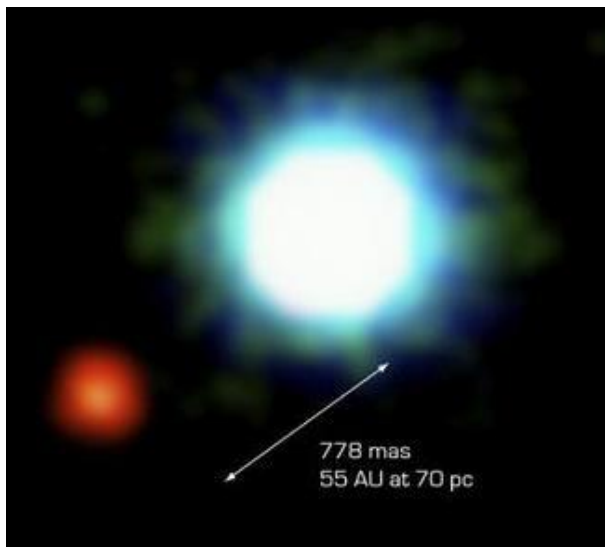
# Exoplanet Detection Methods



# Na stopě cizích planet

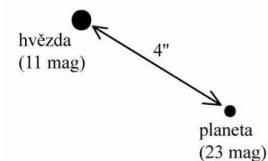
**Přímé pozorování** planet jiných hvězd není zatím možné.  
velký rozdíl jasností,  
malá vzdálenost.

od 2004 už NEPLATÍ – Very Large Telescope  
planeta u hnědého trpaslíka 2M1207  
k 17.11. 2021 – 155 exoplanet, 112 soustav

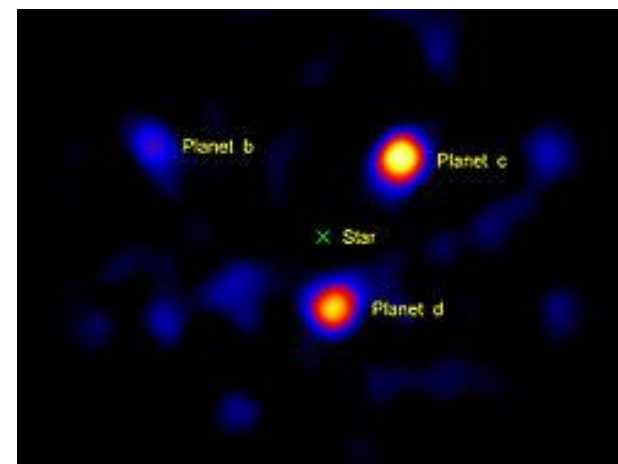


hnědý trpaslík 2M1207 (modrý objekt) a jeho planeta (červeně) VLT – září 2006

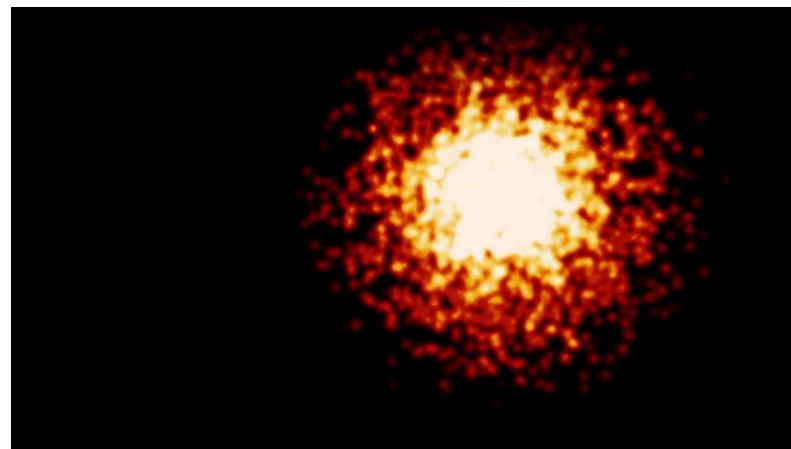
Přímé pozorování:



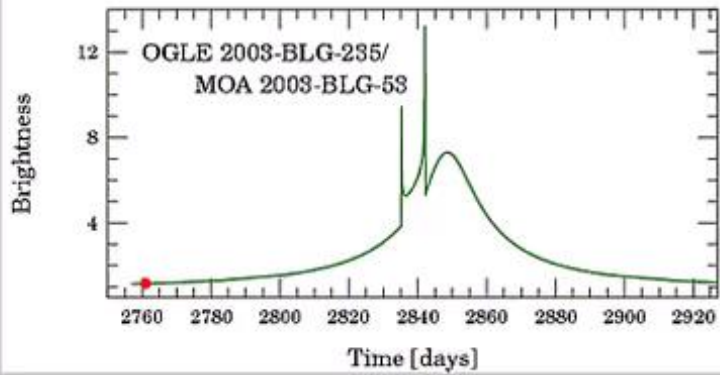
Jupiter u hvězdy Proxima Centauri obíhající ve vzdálenosti 780 milionů km



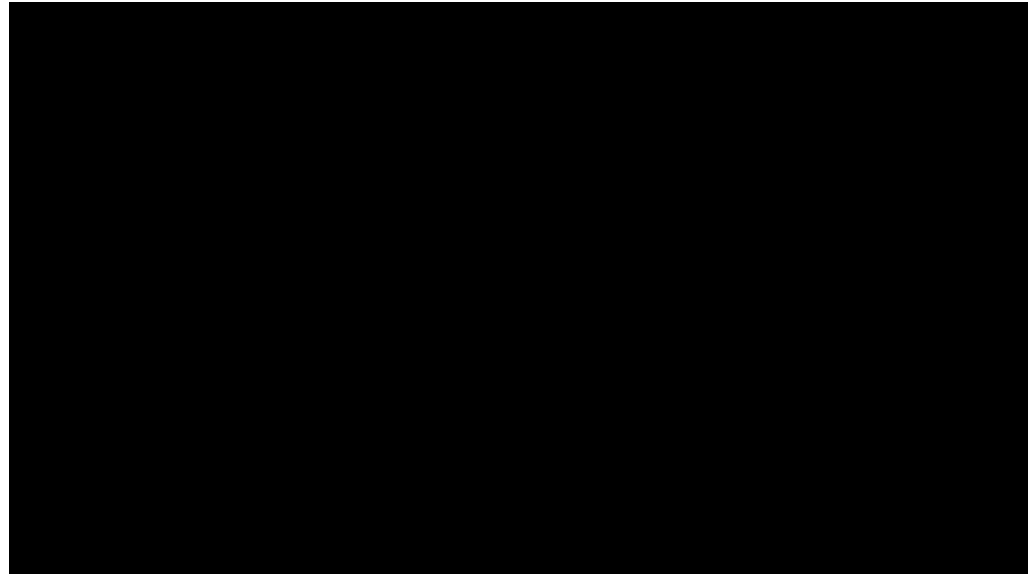
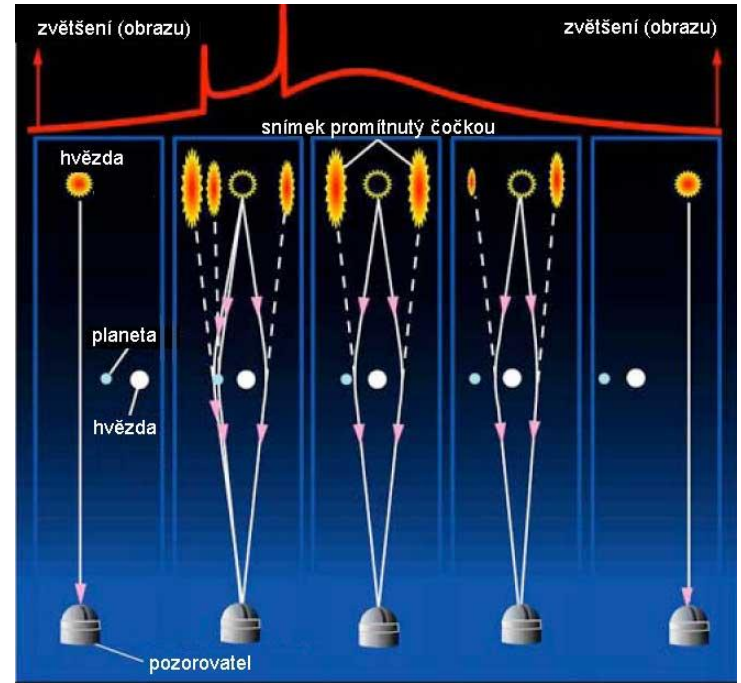
exoplanety u hvězdy HR8799 (1.5m Haleův dalekohled, Palomar)



# Gravitační mikročochky



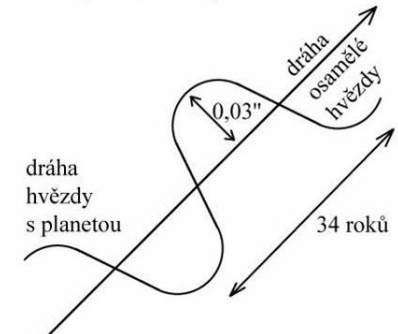
162 exoplanet, 145 soustav  
(k 17. 11. 2021)



## Astrometrie - sledování pohybu vytypované hvězdy na hvězdné obloze 16 planet (17. 11. 2021)

Jupiter u hvězdy Proxima Centauri obíhající ve vzdálenosti 780 milionů kilometrů

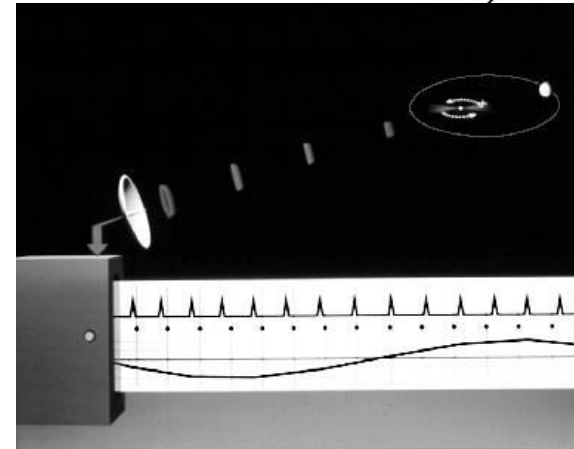
Změna polohy hvězdy:



## Timing - 45 exoplanet (17. 11. 2021)

Pulsar - anomálie v pulzech pulzarů (19)

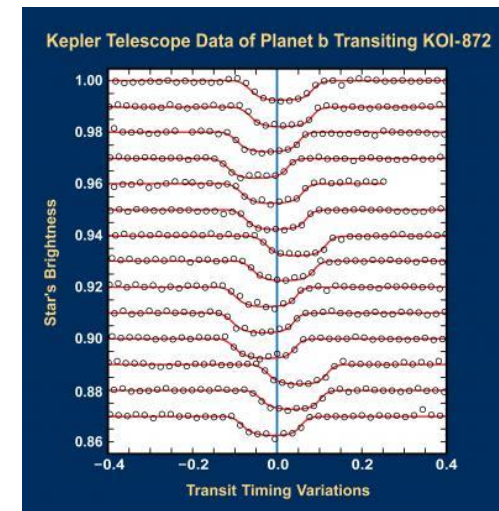
Proměnné hvězdy – odchylky pravidelných změn periodicky proměnné hvězdy (26)



## Transit timing variation method (TTV)

= změny okamžiků středů transitů;

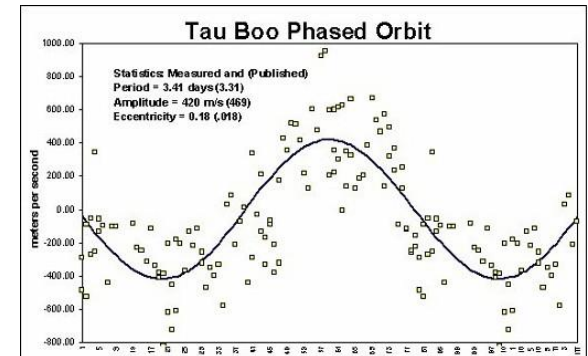
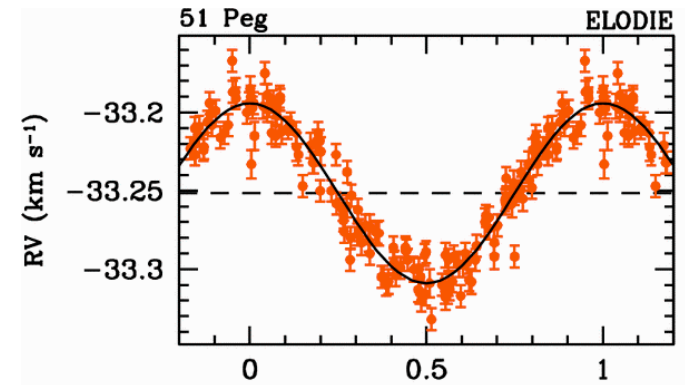
- u transitující exoplanety umožňuje objevit další členy planetární soustavy, případně další hvězdu v systému
- velmi citlivá a použitelná i na velké vzdálenosti, kde RV nestačí
- umožňuje určit max. hmotnost objektu => odlišit hvězdy, hnědé trpaslíky a planety
- poprvé u dat z Keplera: Kepler 19b TTV s amplitudou 5 min a periodou ~ 300 dní => další planeta Kepler 19c
- k 17.11. 2021 24 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 (17. 11. 2021) – 969 planet, 716 planetárních soustav, 173 víceplanetárních soustav



amatérský projekt, 40cm dalekohled

# Transity

- pozorování přechodu exoplanety před mateřskou hvězdou;
- nyní nejúspěšnější metoda - 3471 exoplanet, 2608 soustav, 562 soustav s více planetami (17. 11. 2021)
- program se zapojením amatérů a menších dalekohledů
- KEPLER, COROT, TESS

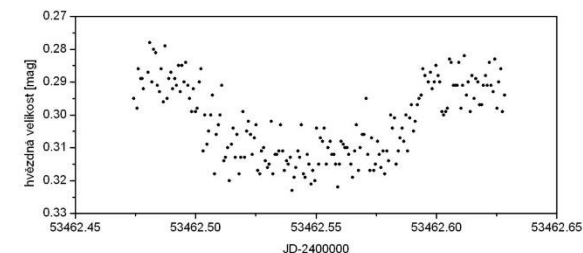
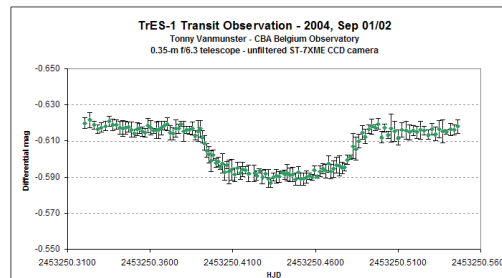
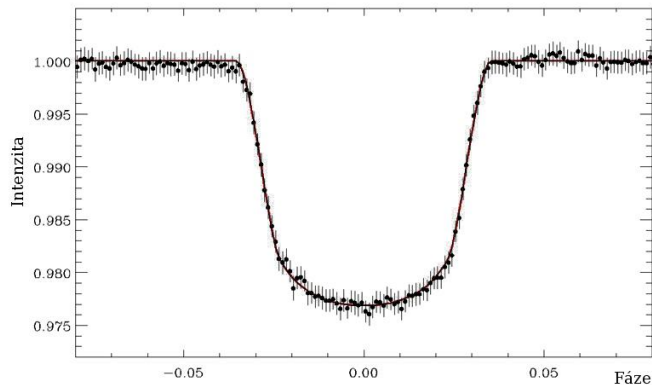
HAT = *Hungarian-made Automated Telescope*

TrES = *The Transatlantic Exoplanet Survey*

WASP = *The Wide Area Search for Planets*

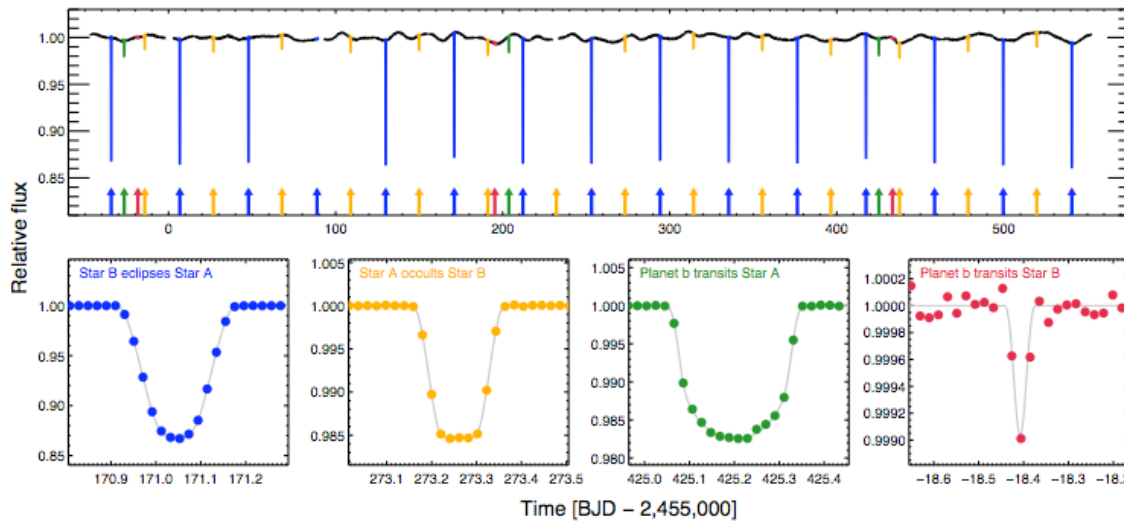
NGTS = *Next-Generation Transit Survey*

XO, TRAPPIST, MASCARA aj.

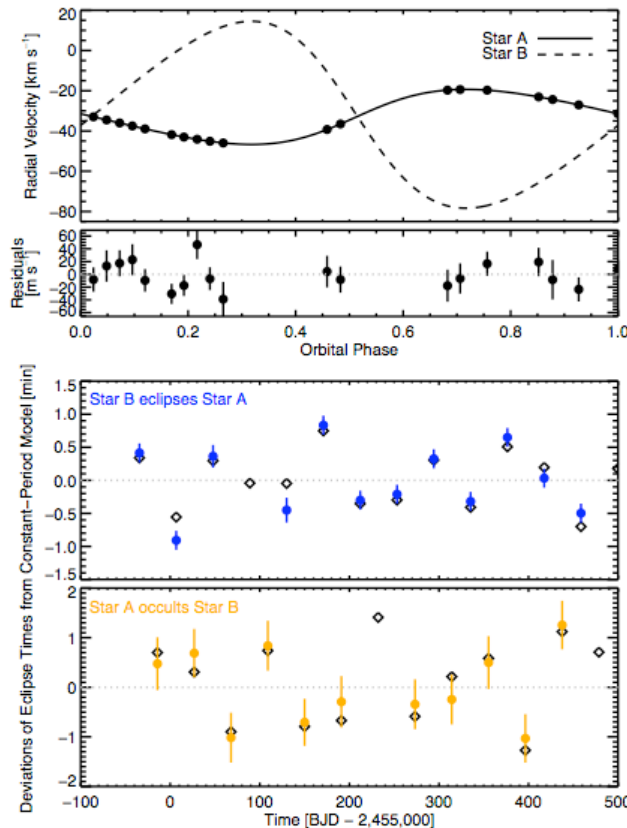
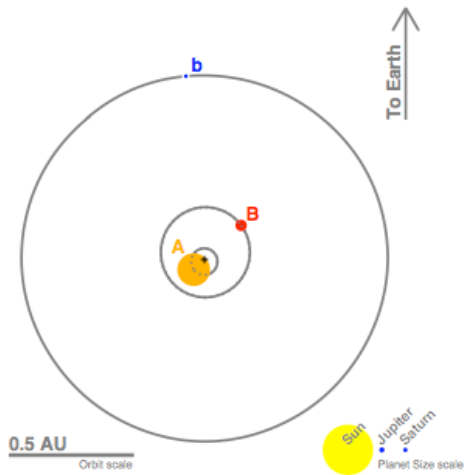


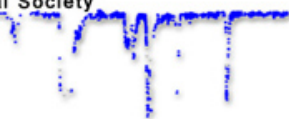
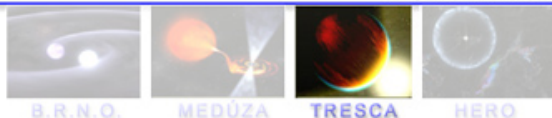
# Transit duration variation method (TDV)

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: transituující circumbinární planeta





## ETD Exoplanet Transit Database

... complete ... worldwide ... continuously growing ...

<http://var.astro.cz/ETD>

### Known transitters:

- 55 Cnc e
- CoRoT-1 b
- CoRoT-10 b
- CoRoT-11 b
- CoRoT-12 b
- CoRoT-13 b
- CoRoT-17 b
- CoRoT-18 b
- CoRoT-19 b
- CoRoT-2 b
- CoRoT-20 b
- CoRoT-3 b
- CoRoT-4 b
- CoRoT-5 b
- CoRoT-6 b
- CoRoT-7 b
- CoRoT-8 b
- CoRoT-9 b
- GJ1214 b
- GJ3470 b
- GJ436 b
- HAT-P-1 b
- HAT-P-10/WASP-11 b
- HAT-P-11 b
- HAT-P-12 b
- HAT-P-13 b
- HAT-P-14 b
- HAT-P-15 b
- HAT-P-16 b
- HAT-P-17 b
- HAT-P-18 b
- HAT-P-19 b
- HAT-P-2 b

### ETD - Exoplanet Transit Database

[Observers community](#) | [How to contribute to ETD](#) | [Model-fit your data](#) | [Transit predictions](#) | [KEPLER Transit predictions](#) | [KEPLER Candidates](#) | [CoRoT Transit predictions](#) | [CoRoT Candidates](#)

ETD is here to supply quickly and easily the **list of all ever observed transits of transiting exoplanets** to observers and researchers.

Our database administrators are periodically checking for new transits - both in literature and in on-line internet sources. Each transit is stored with complete citations, link to the paper / on-line source URL.

For each exoplanet, there is available graphical output of relations:

- transit **TIMINGS** vs. EPOCH
- transit **DURATION** vs. EPOCH
- transit **DEPTH** vs. EPOCH and
- **list of available transits**.

**Data quality is rated** for each observation and the DQ index is taken into account while plotting graphs.

#### Tools for observers :

- Observers can plot their own observations in diagrams.
- Model-fitting of transit observation and finding out parameters HJDmid, Depth, Duration.
- Global transit predictions.

	OBJECT	CONST	# OF DATA	TIME SPAN FROM - TILL		LAST CHANGES (DAYS) <i>Red if less than 1 week ago</i>
1	<a href="#">55 Cnc e</a>	Cnc	1	2011-02	2011-02	04. May 2011 (586)
2	<a href="#">CoRoT-1 b</a>	Mon	60	2007-02	2012-03	05. Mar 2012 (280)
3	<a href="#">CoRoT-10 b</a>	Aql	1	2007-06	2007-06	16. Jun 2010 (908)
4	<a href="#">CoRoT-11 b</a>	Ser	4	2008-05	2012-06	28. Jun 2012 (165)
5	<a href="#">CoRoT-12 b</a>	Mon	2	2007-10	2012-01	26. Jan 2012 (319)
6	<a href="#">CoRoT-13 b</a>	Mon	1	2008-11	2008-11	16. Jun 2010 (908)
7	<a href="#">CoRoT-17 b</a>	Sct	1	2009-04	2009-04	29. Jun 2011 (531)

### What's new: [Archive](#)

**2012-11-16** : nová tranzitující exoplaneta nedávno publikovaná byla přidána do ETD: WASP-71b

**2012-11-12** : 5 tranzitujících exoplanet nedávno publikovaných bylo přidáno do ETD: WASP-52b, WASP-58b, WASP-59b, WASP-60b a KELT-3b

#### Přihlásit se

Chcete-li používat pluginy pro sociální síť, musíte se přihlásit

k Facebooku.



ETD - Exoplanet Transit Database

[To se mi líbí](#)



# Družicový výzkum



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

2009-2014 - družice Kepler – 4496 kandidátů (2337 potvrzených, 30 exozemí v obyv. zóně)

Mise K2 (do 4.12.2017) – 892 kandidátů (425 potvrzených)

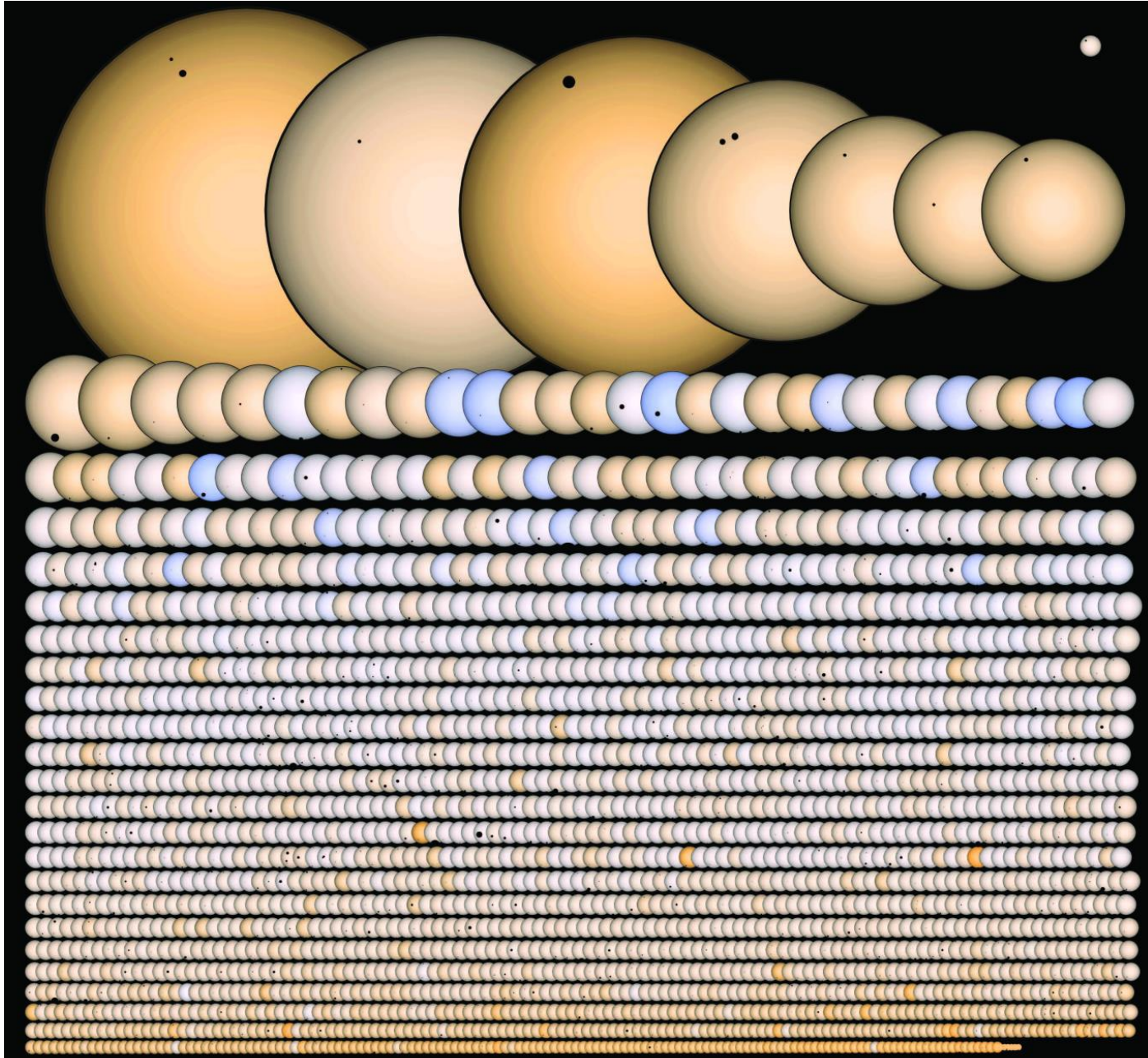
Obě prováděly nezávisle přesnou fotometrii vybraných hvězd a hledaly exoplanety pomocí jejich tranzitů přes disk mateřské hvězdy. Očekávalo se, že u 100 000 pozorovaných hvězd bude nalezeno 500 až 1 000 „exozemí“.

TESS (od 2018) – 171 potvrzených exoplanet, 4682 kandidátů (17.11.2021)

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

Další projekty: CHEOPS (2019), PLATO (2026), Twinkle (2024), ARIEL (2028), RST (2025) ...

# 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 (9 k 16.12.2020)

<http://dx.doi.org/10.1038/nature10768>

2013 – 1. odhad počtu exoplanet z pozorování

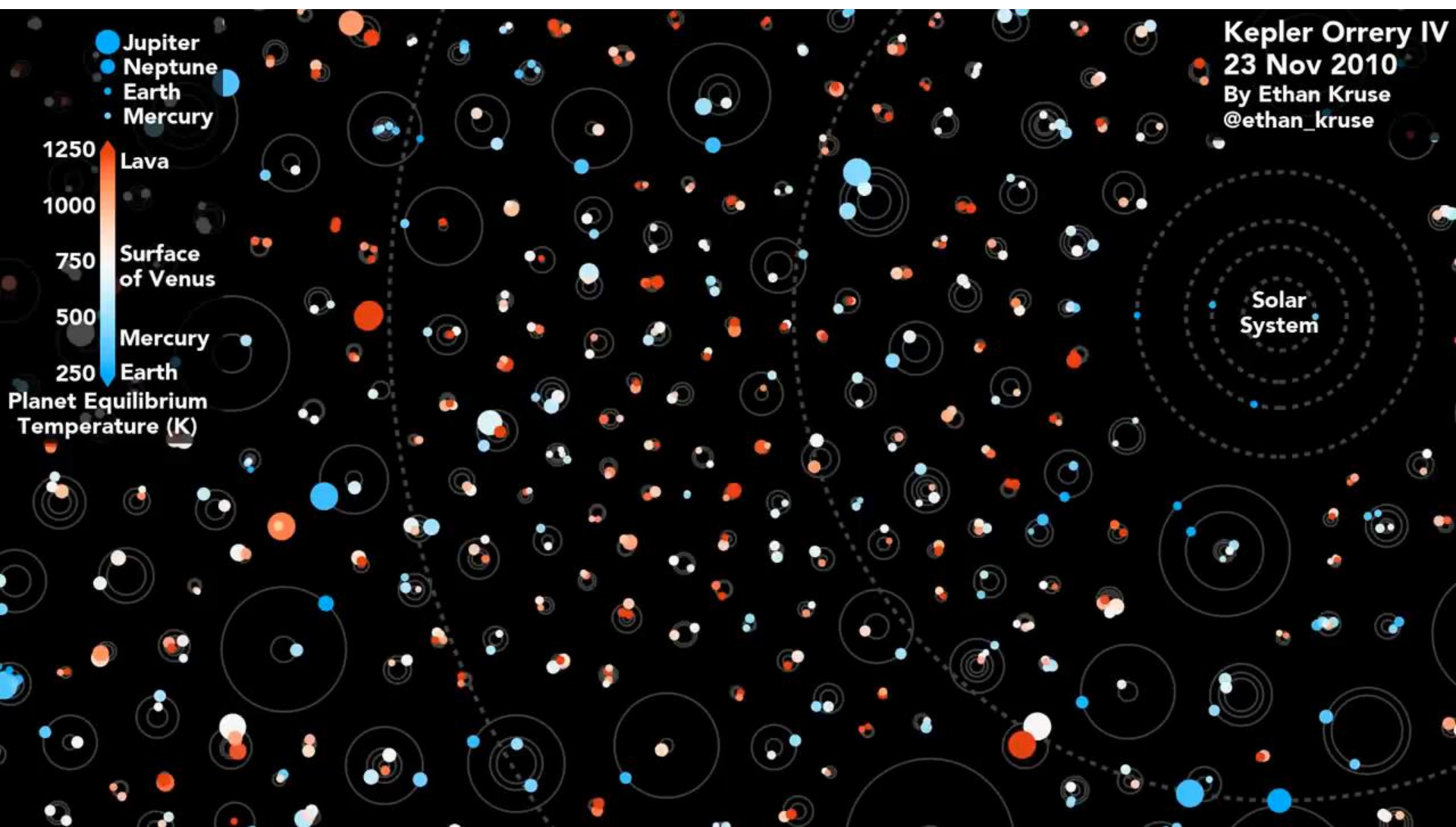
- 40 mld. exozemí kolem sluncí zónách života v Galaxii!

2015 - KIC 8462852 (Tabbyina nebo Boyajianové hvězda)

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

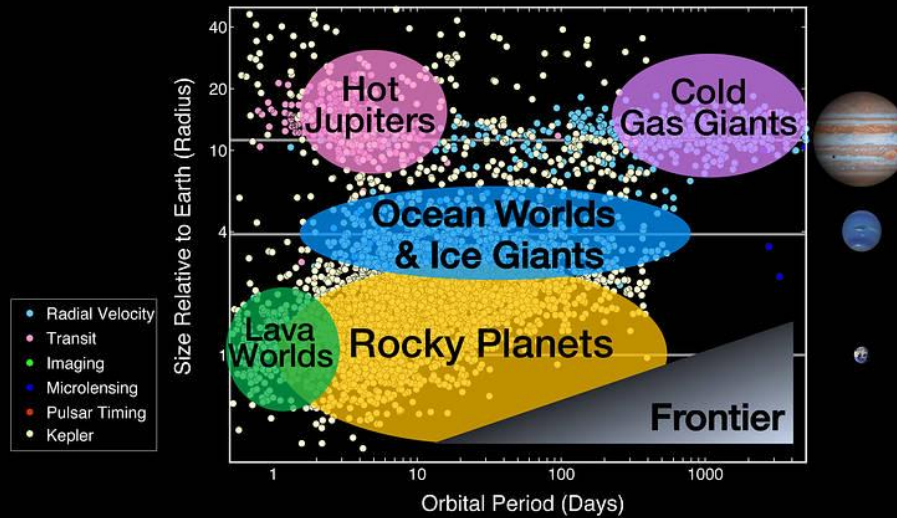


# Keplerův orloj IV



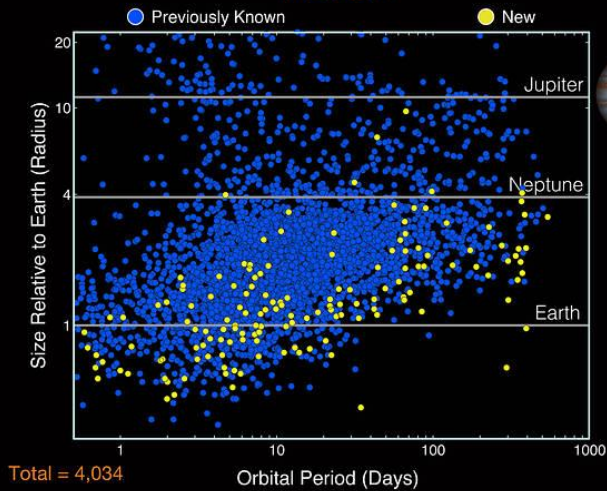


# Exoplanet Populations



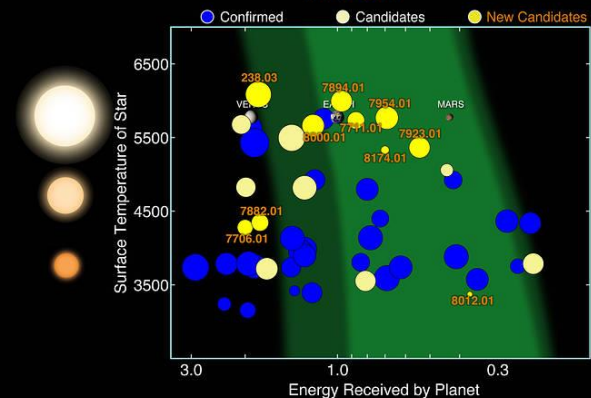
## New Kepler Planet Candidates

As of June 2017



## Kepler Habitable Zone Planets

As of June 2017



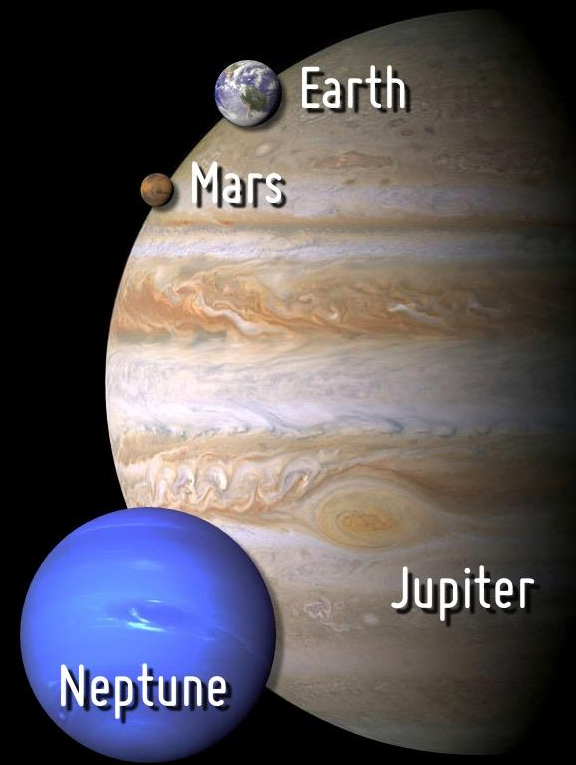
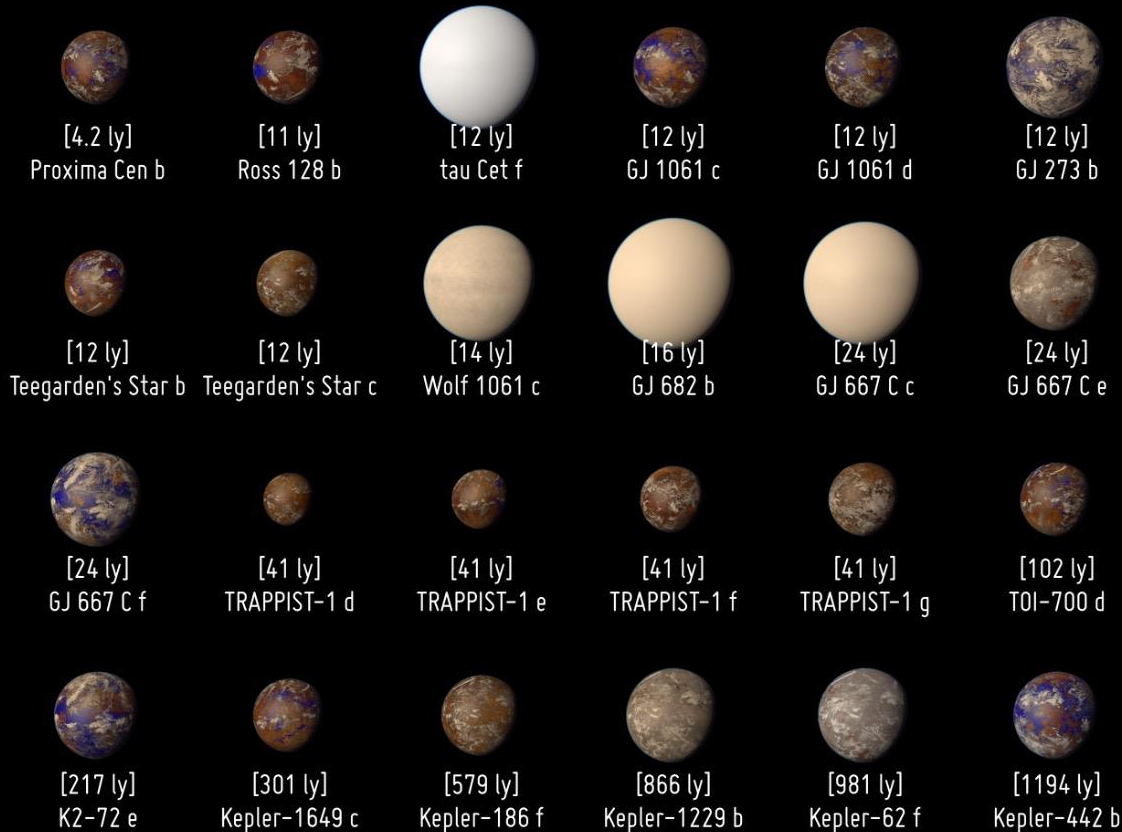
60 exoplanet v zónách života (17.11.2021)

1 exomars, 23 exozemí, 36 superzemí



# Potentially Habitable Exoplanets

Ranked by Distance from Earth (light years)



Artistic representations. Earth, Mars, Jupiter, and Neptune for scale. Distance from Earth is between brackets.

CREDIT: PHL @ UPR Arcibo (phl.upr.edu) Oct 5, 2020

<https://phl.upr.edu/the-habitable-exoplanets-catalog>

# Hledání další Země

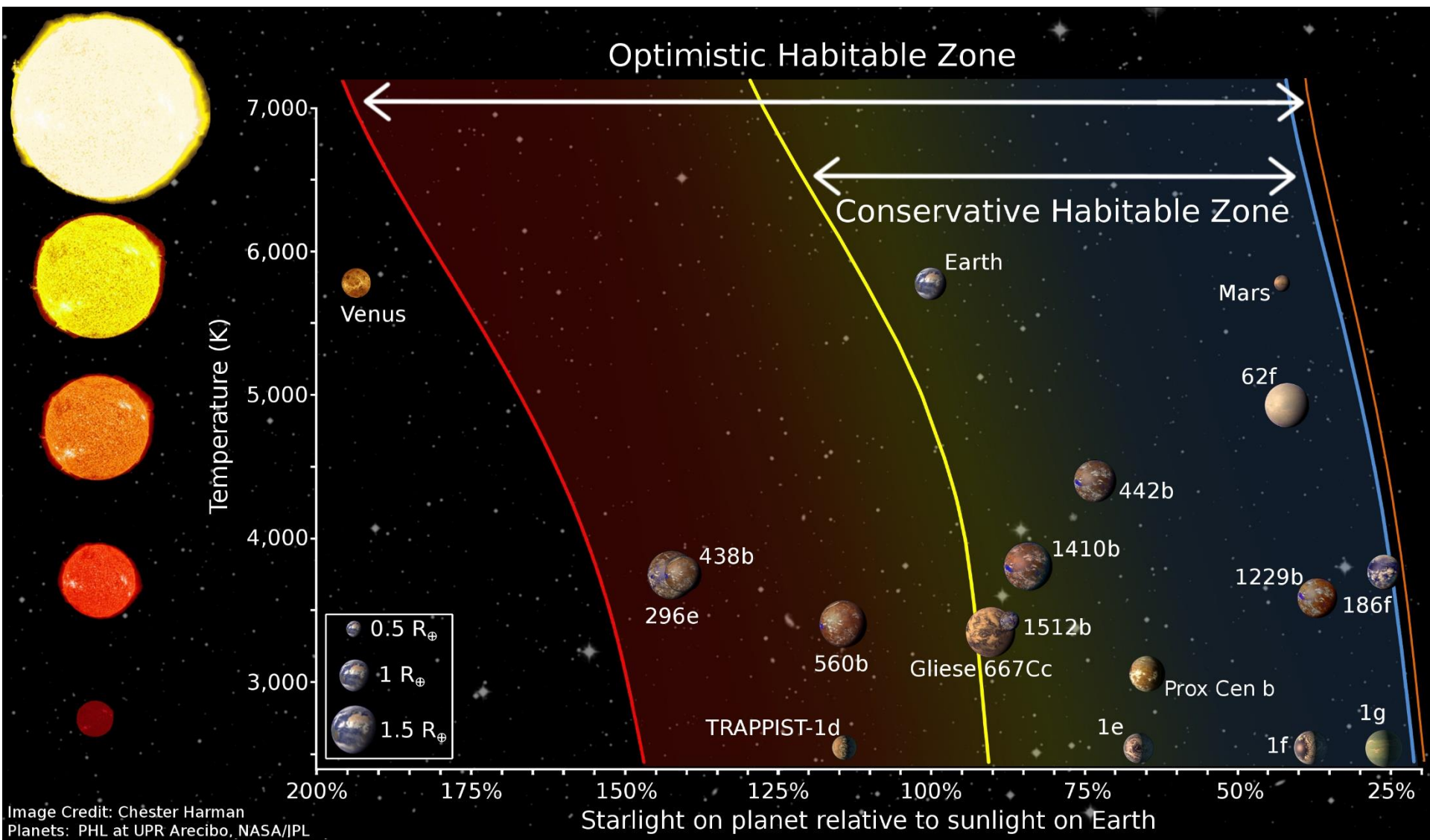
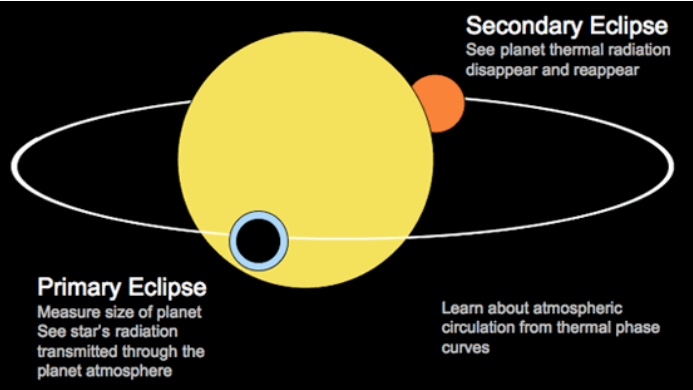
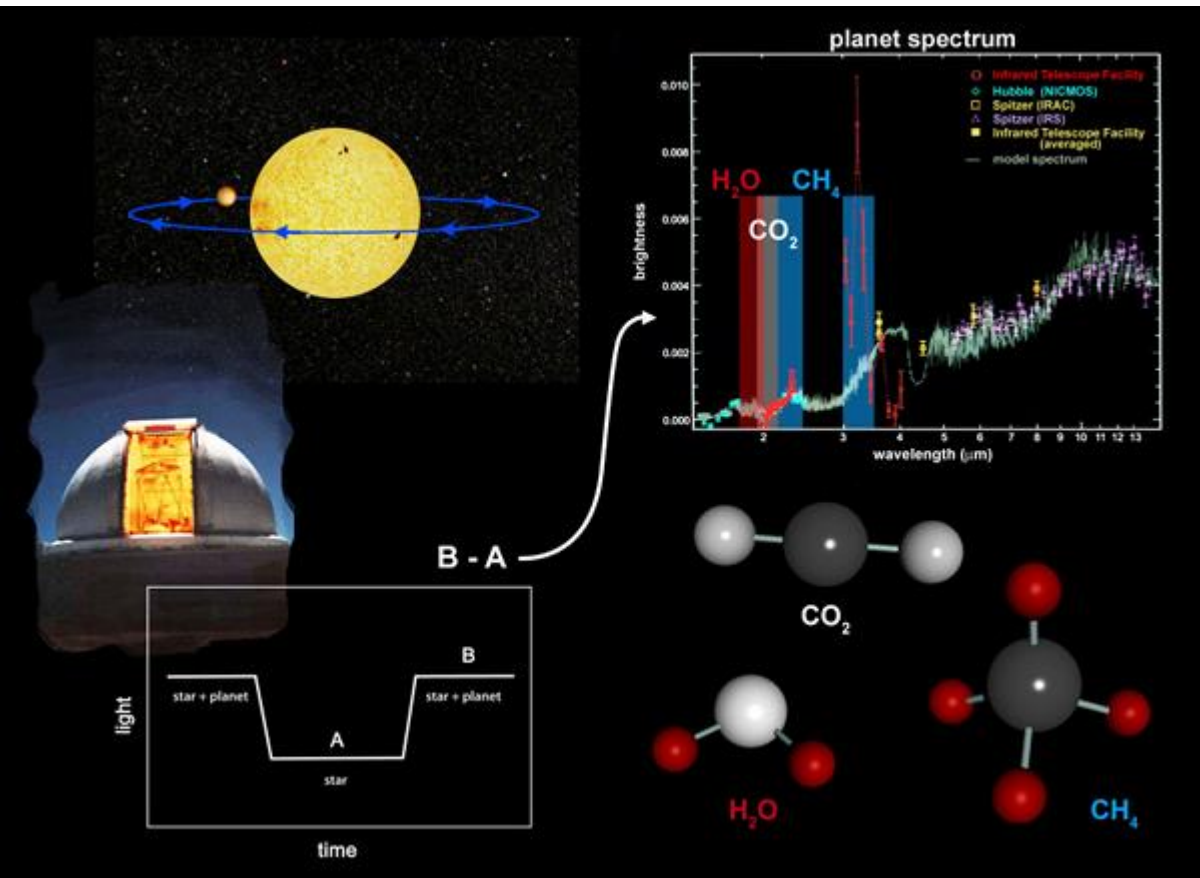


Image Credit: Chester Harman  
Planets: PHL at UPR Arcibo, NASA/IPL



# Atmosféry exoplanet

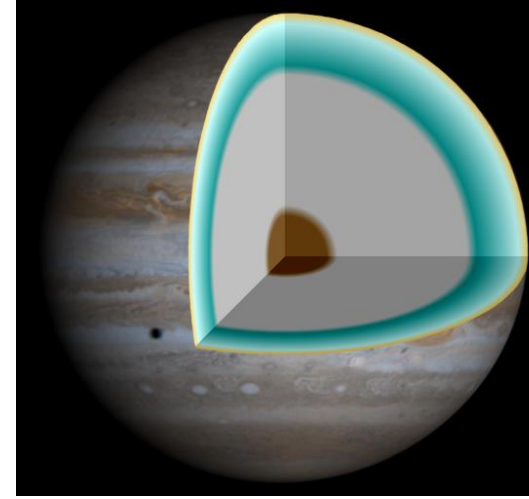




# Planety na počátku vývoje

Všechny planety a velké družice:

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

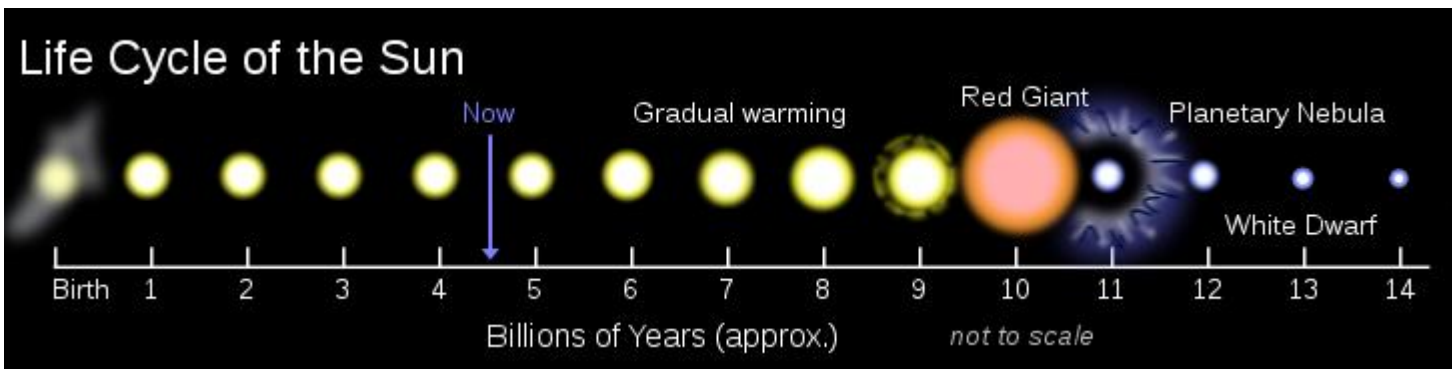


zárodečná látka v místě vzniku planety

víceméně stejnorodá -> smršťování -> zahřátí -> rozčlenění látky dle hustot (*diferenciaci 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.





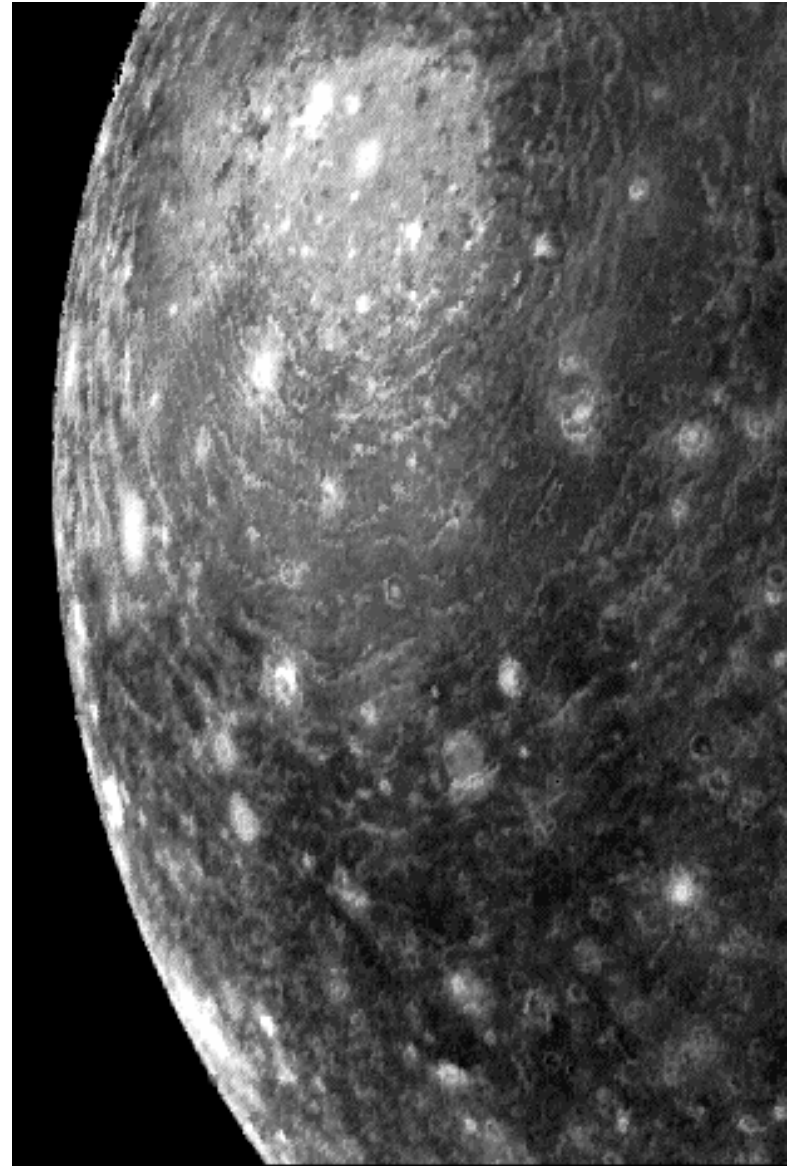


Mare Imbrium na Měsíci



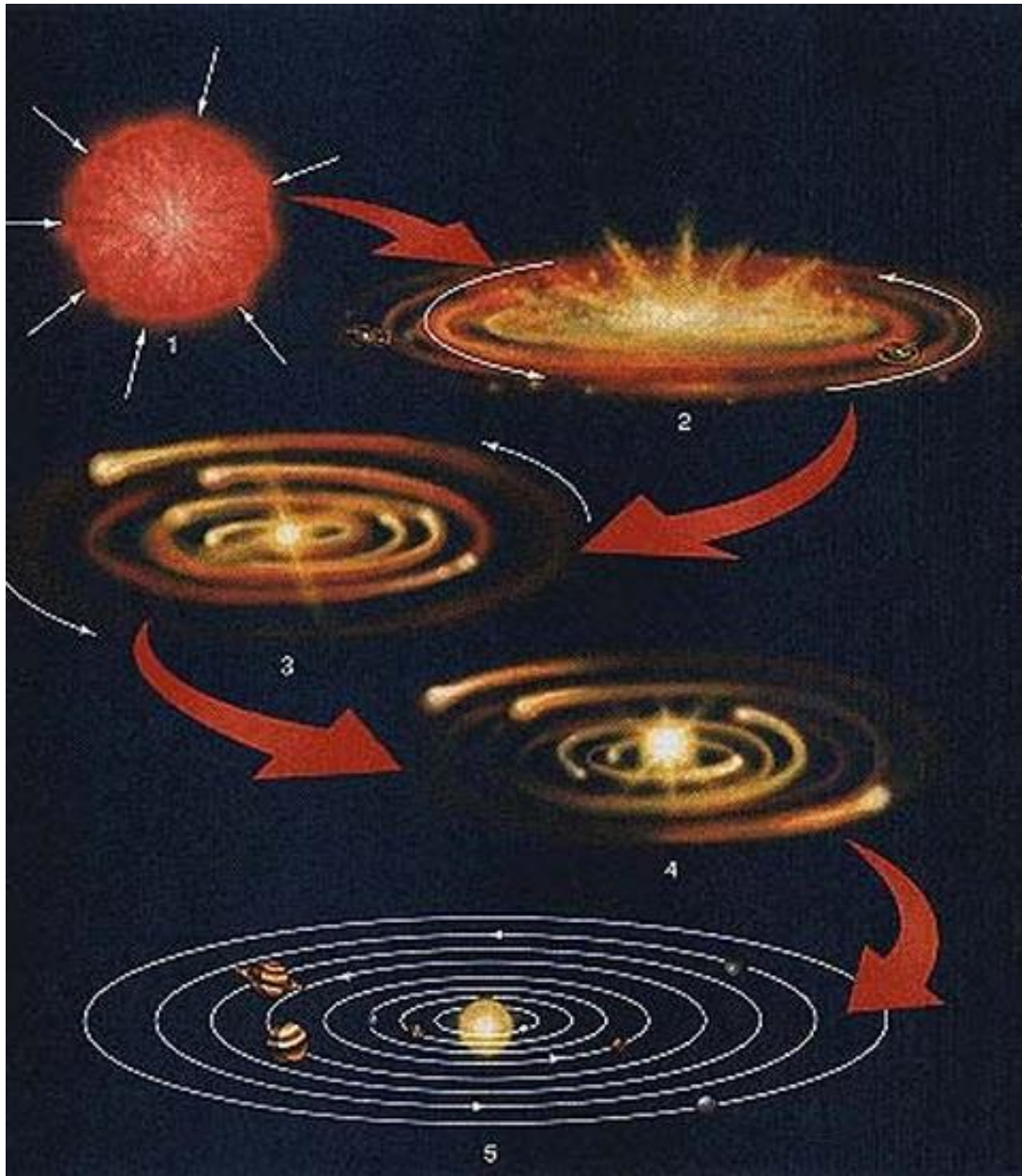


Caloris Planitia na Merkuru.



Pánev Valhalla (Jupiterova družice Kallistó).

# Vývojový scénář sluneční soustavy



1 protoslunce

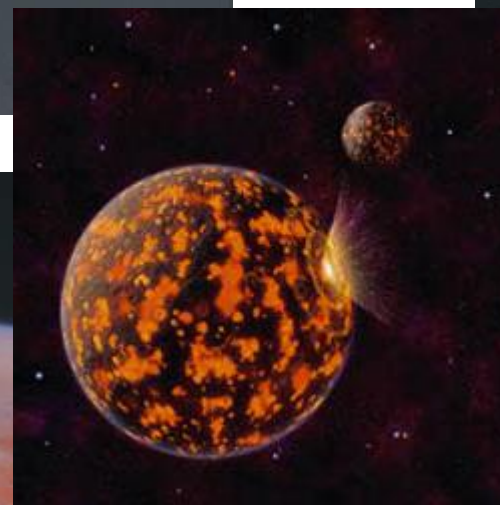
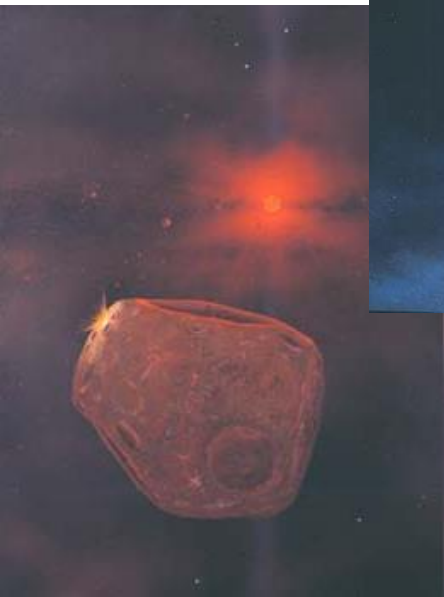
2 zárodečná mlhovina,  
vznik vrstvy pevných  
částic v rovině rotace  
rovníku mlhoviny

3,4 akrece látky na  
zárodky planet

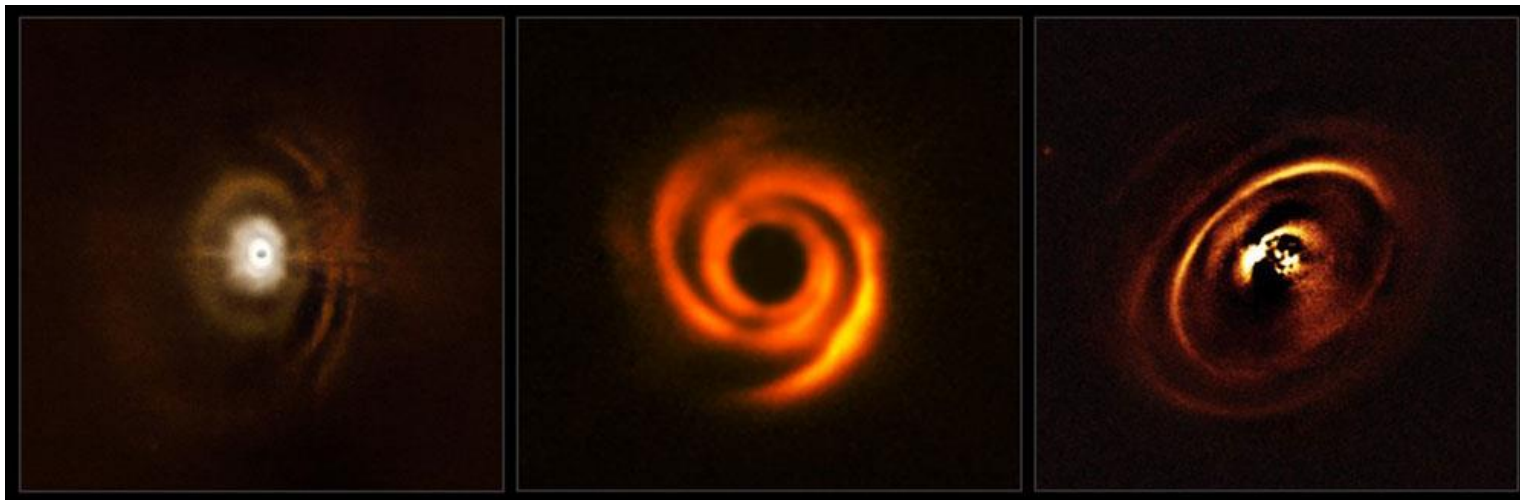
5 vymetení zbytků plynu  
ze soustavy  
intenzivním slunečním  
větrem



# Představy ilustrátorů



# Realita (2016, 2017)



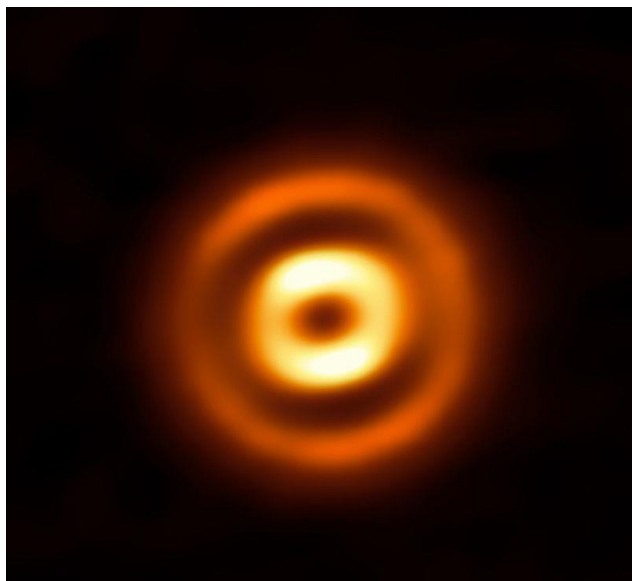
VLT,  
SPHERE

HD 97048

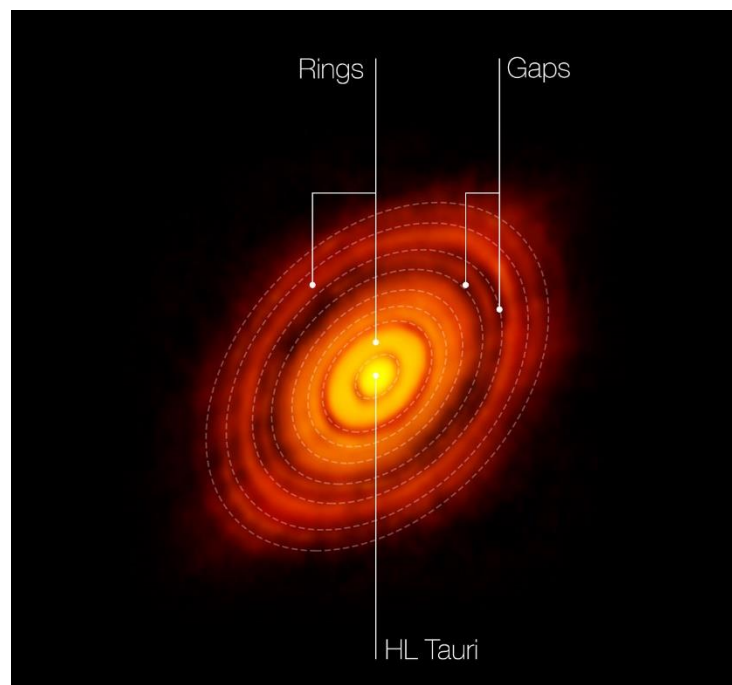
HD 135344B

RX J1615

HD 169142



ALMA



Rings | Gaps

HL Tauri

# 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** – odvátl 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 stadiích Sl. soustavy - planety a jejich velké družice - diferenciací 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

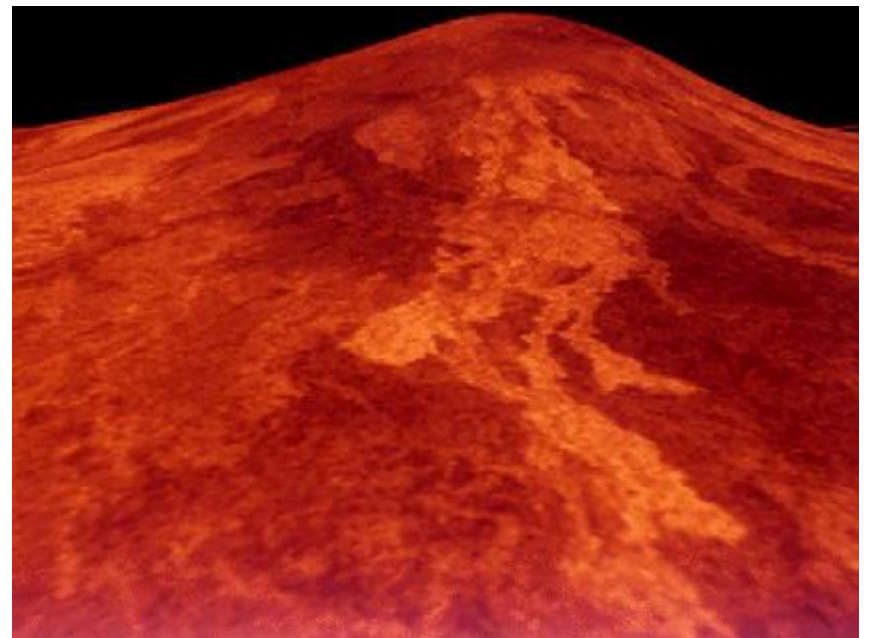
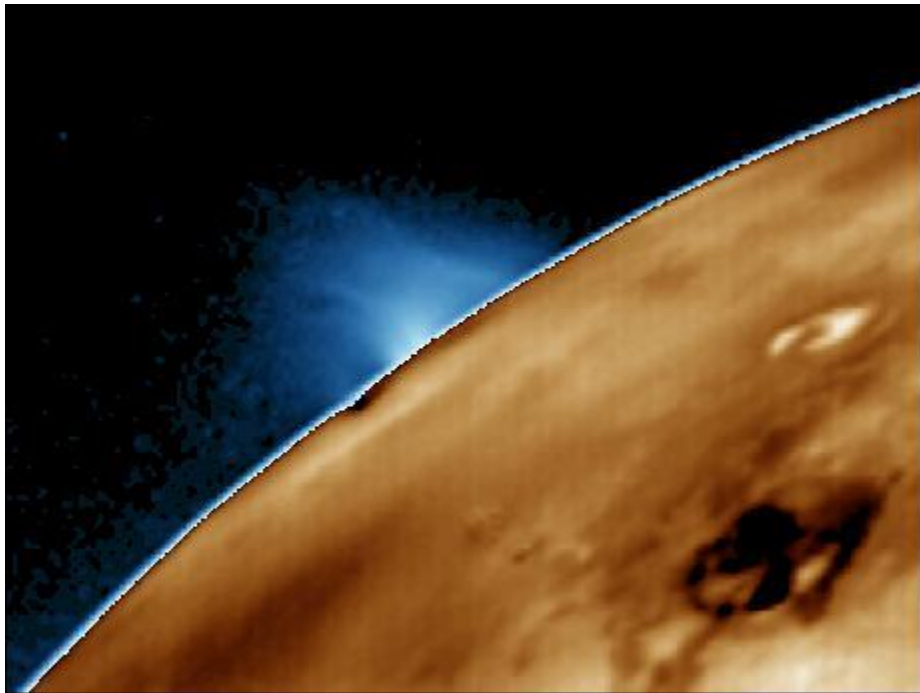
*vulkanismus* - sopečná (vulkanická) činnost na povrchu

- 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)

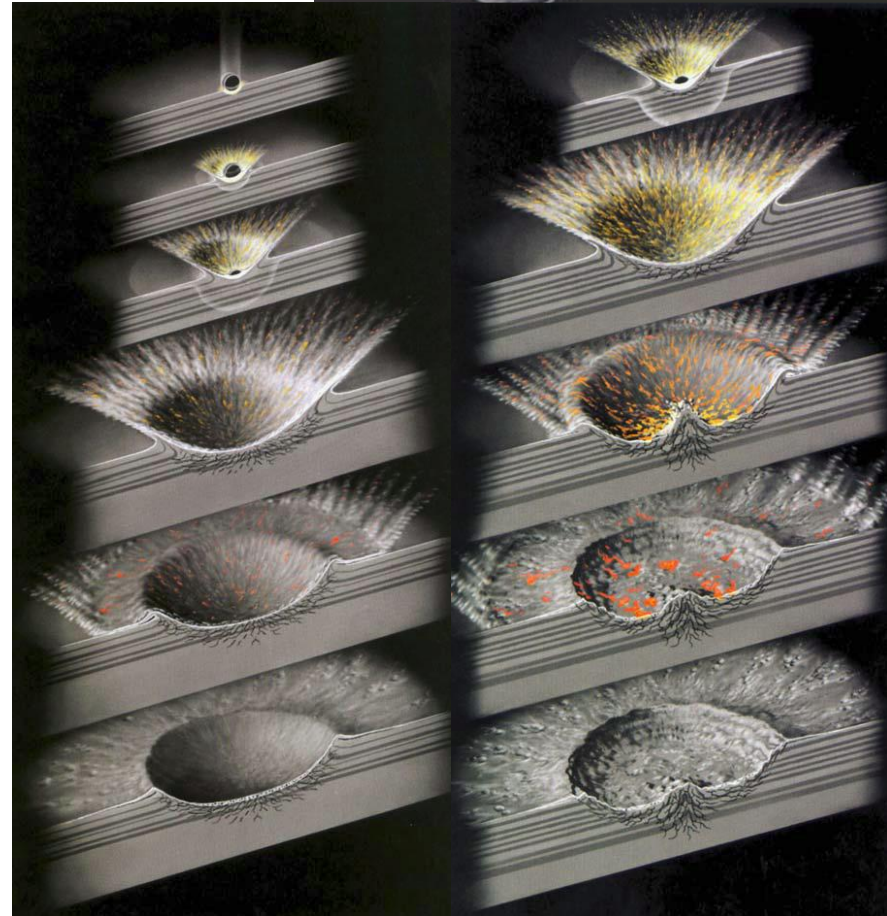
# Impakty

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

vznik zejména v době intenzivního bombardování, ale i dnes!

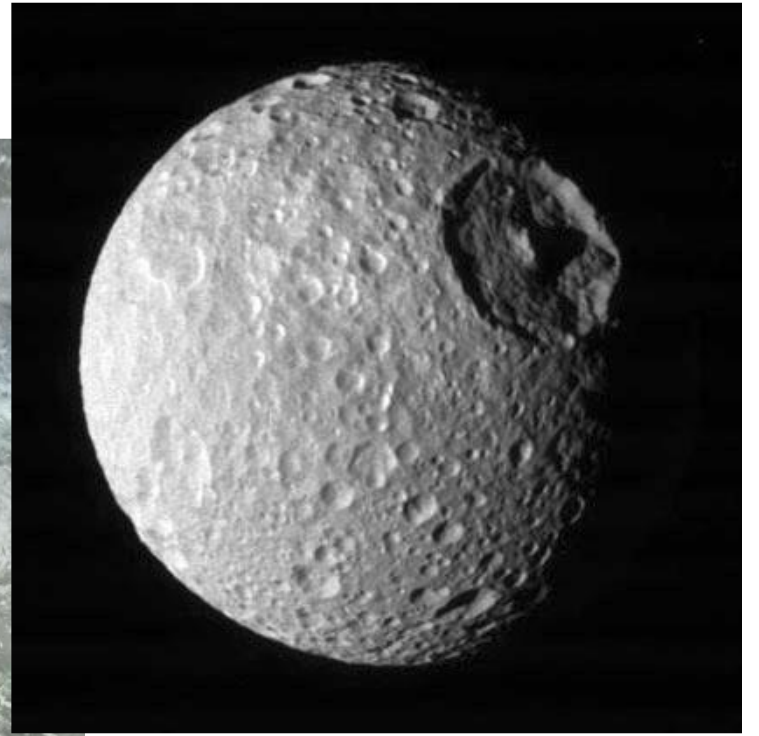
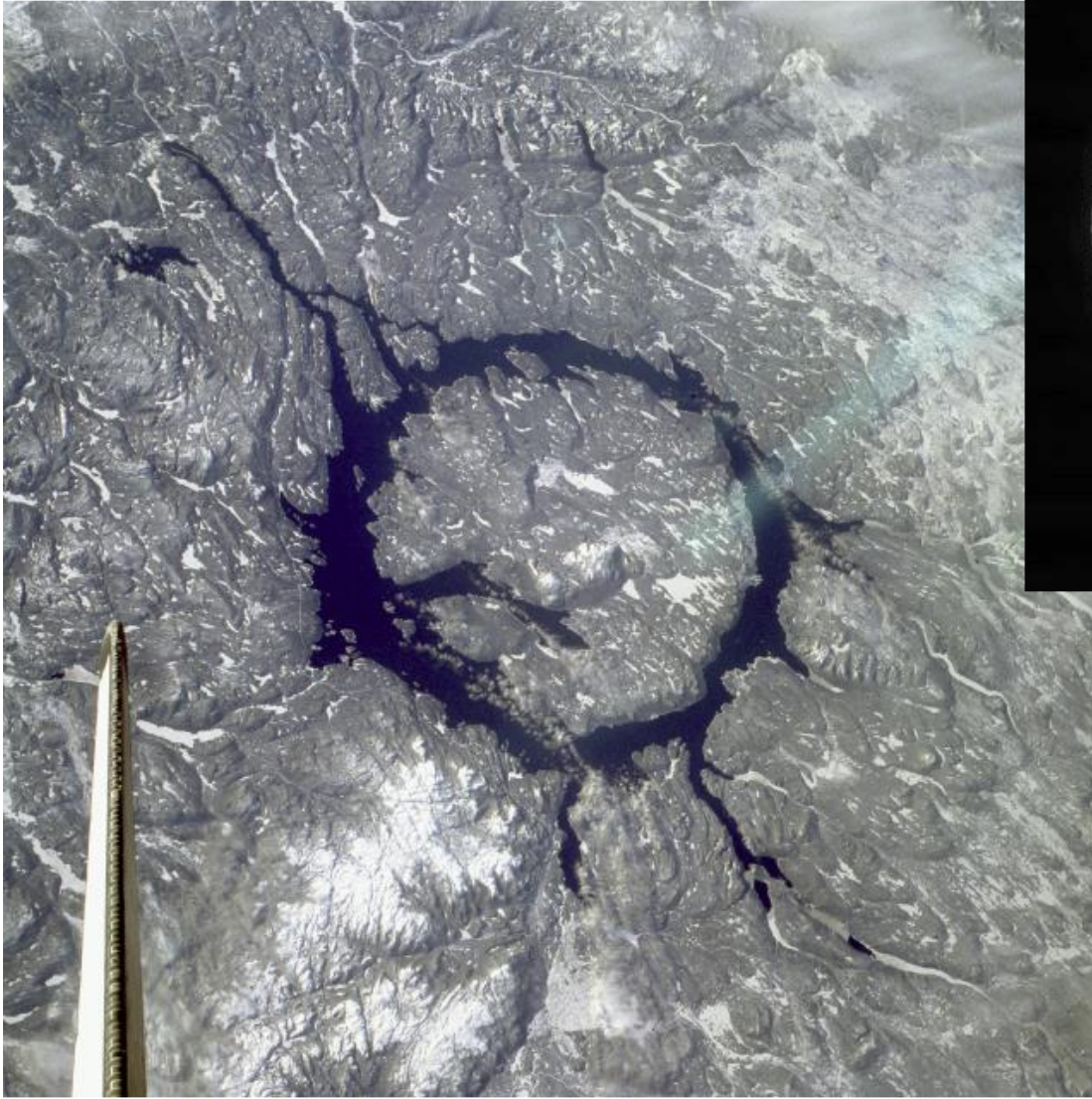
Země a další planety s intenzivním geologickým vývojem – stopy zahlazeny; „viditelné“ jen čerstvé krátery (cca  $10^6$  let nebo  $10^7$  let staré)

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 - poznamenaná především geologickou aktivitou,  
převládá oxid uhličitý

*čím je planeta aktivnější, tím je její atmosféra hustší*

**Země** – specifická atmosféra, vysoký obsah N, O; CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> => 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 CO<sub>2</sub> -> 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:

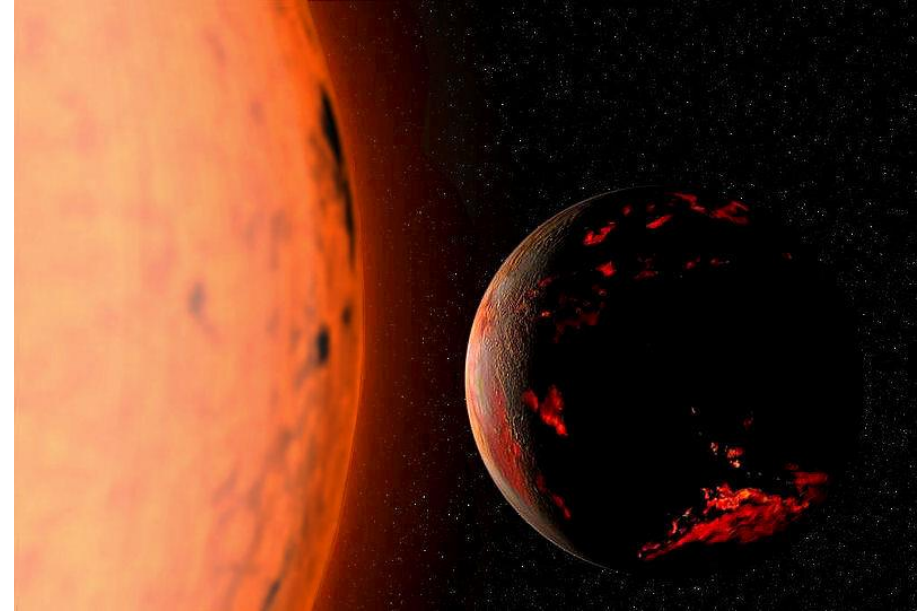
poloměr 1 au,

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!

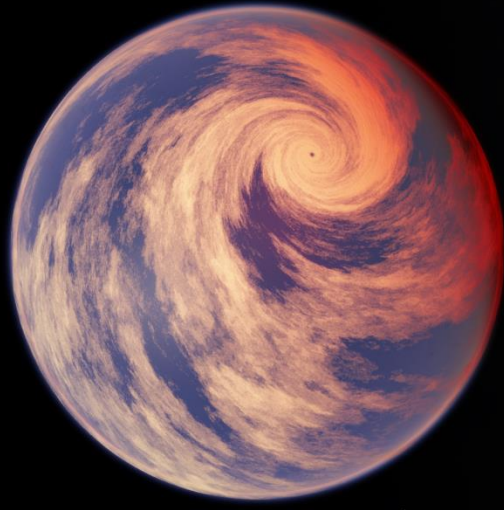




Země v současnosti





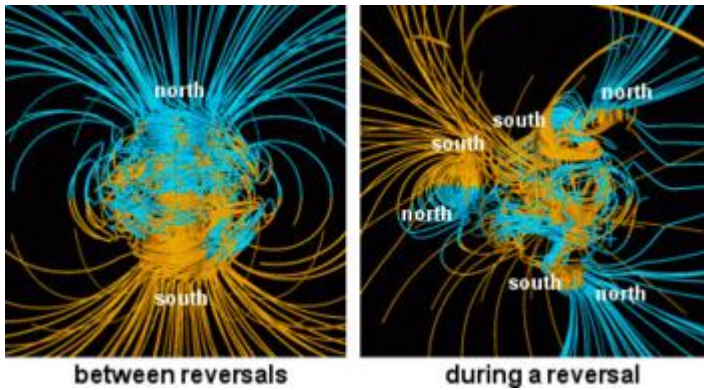


obří cyklón

dopad asteroidu



supervulkán

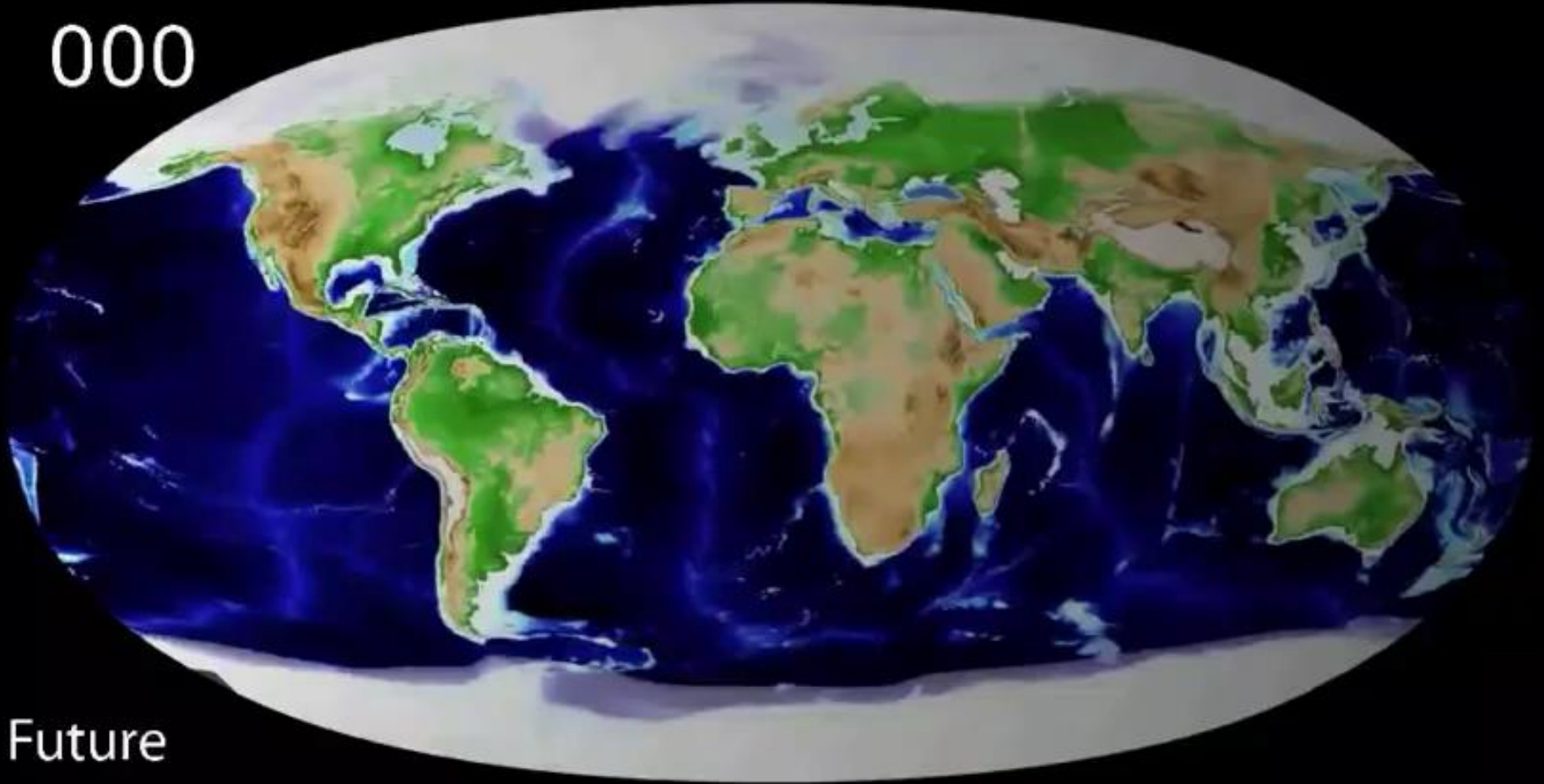


rychlá změna mg. pole





000



Future

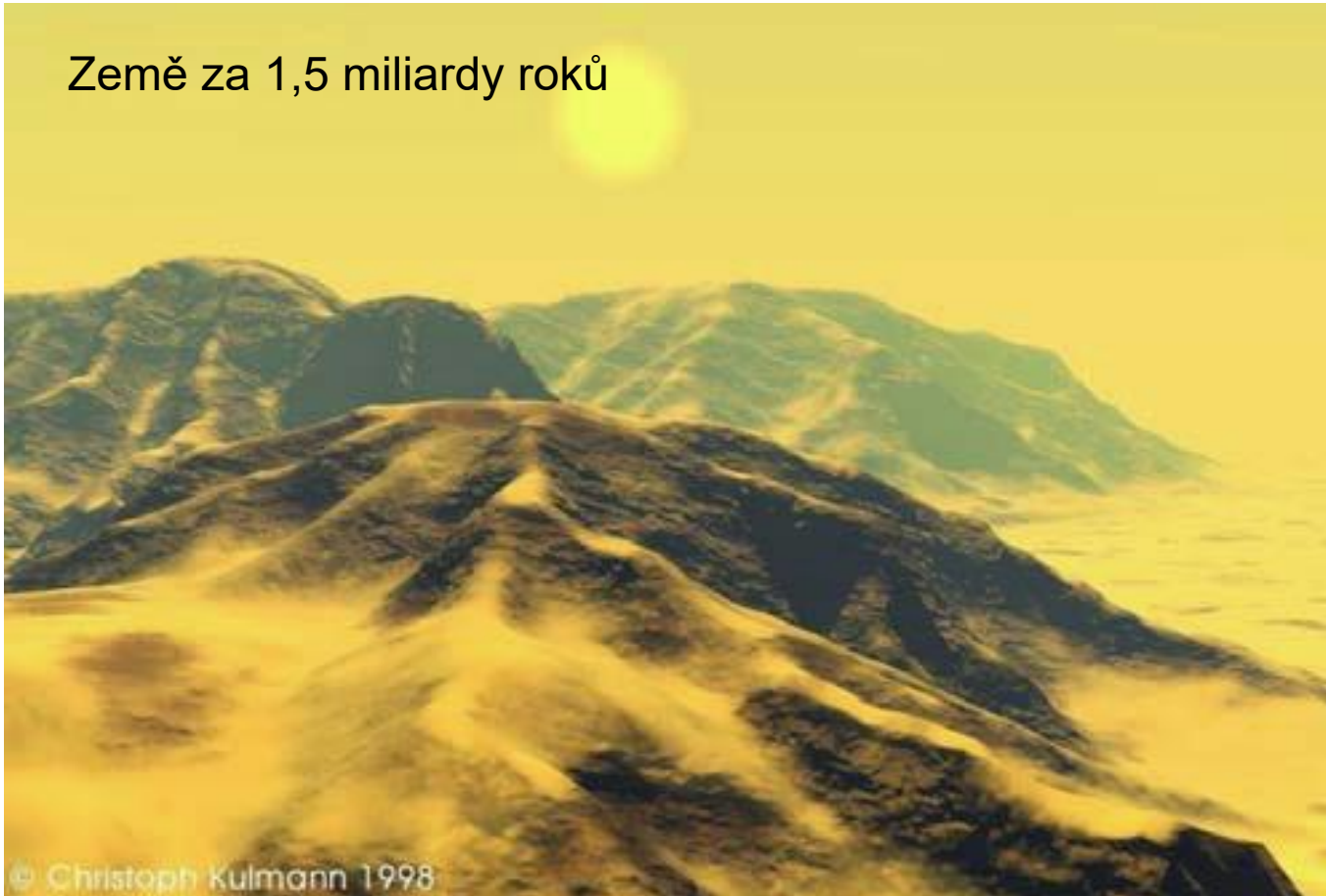
za 250 mil. let - vznik superkontinentu Pangea Ultima

Země za 700 milionů roků



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

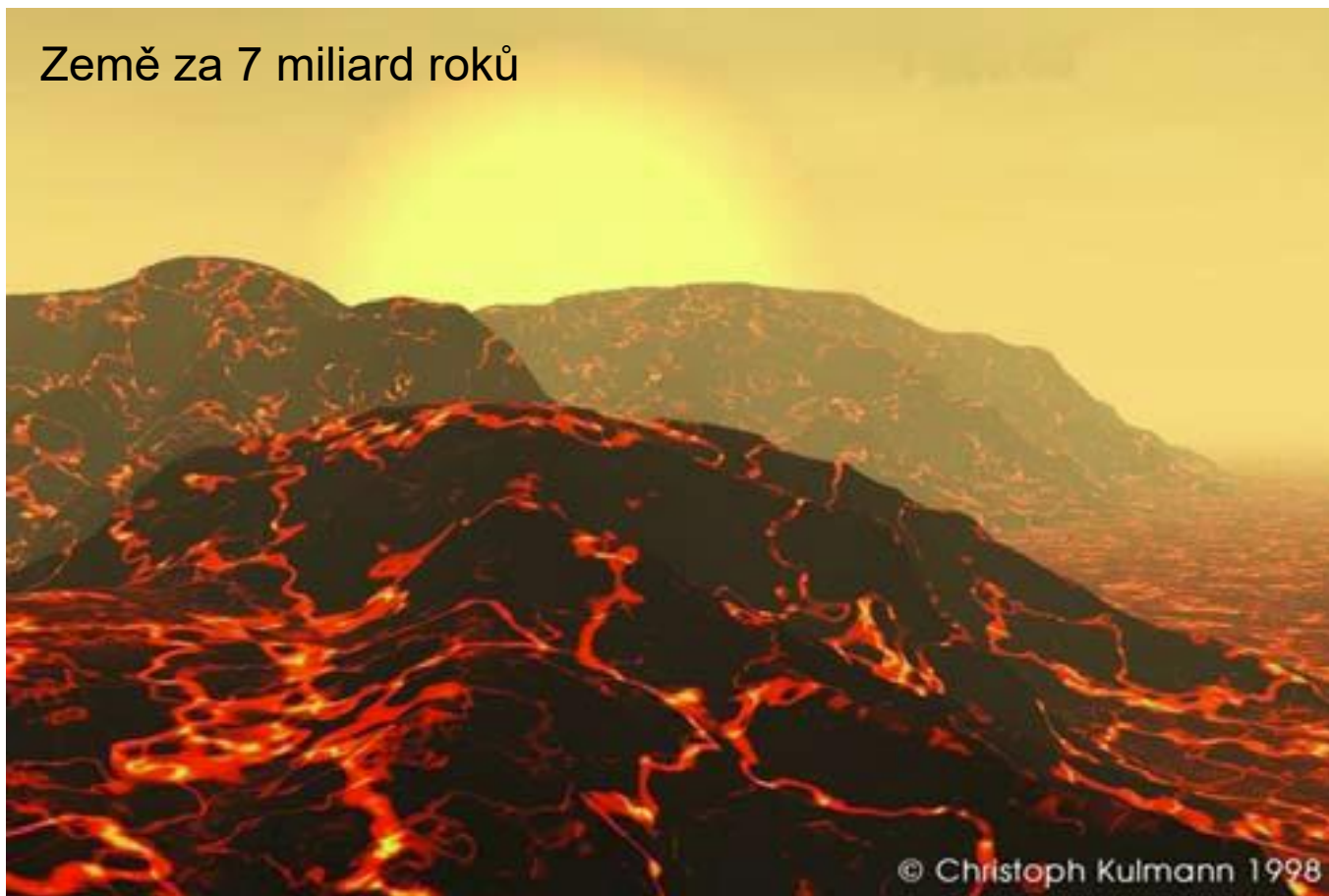
Země za 1,5 miliardy roků



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

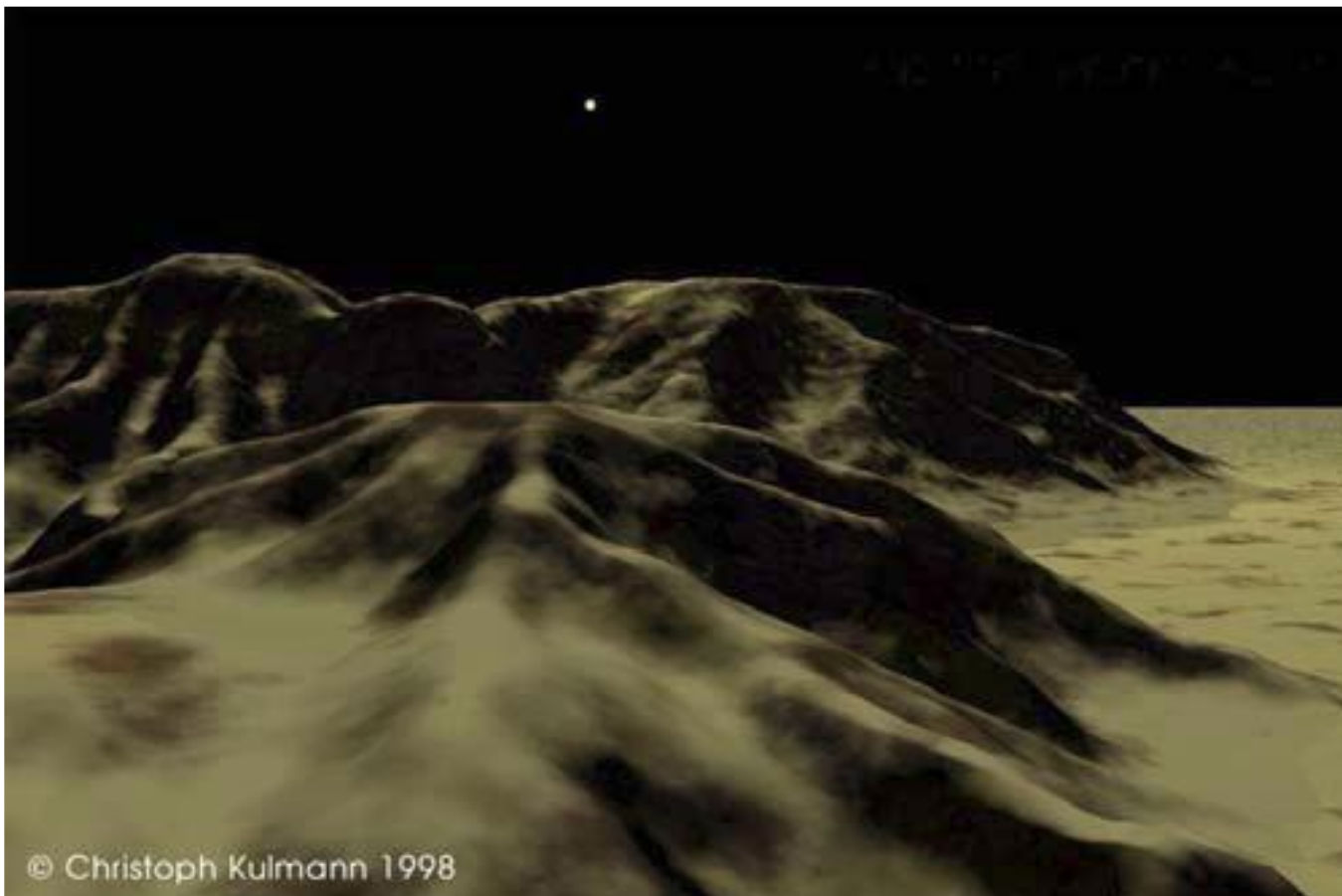


Země za 7 miliard roků



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!**