

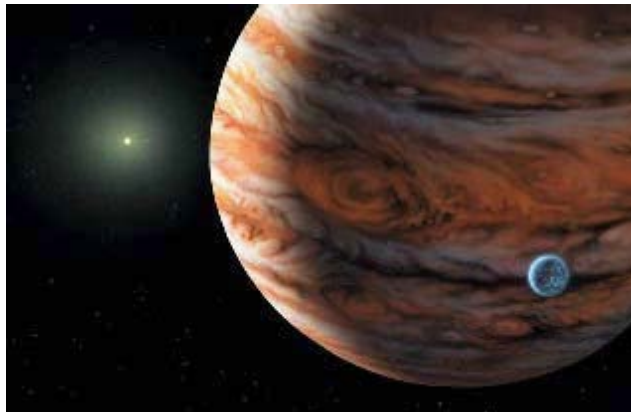
Exoplanety



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

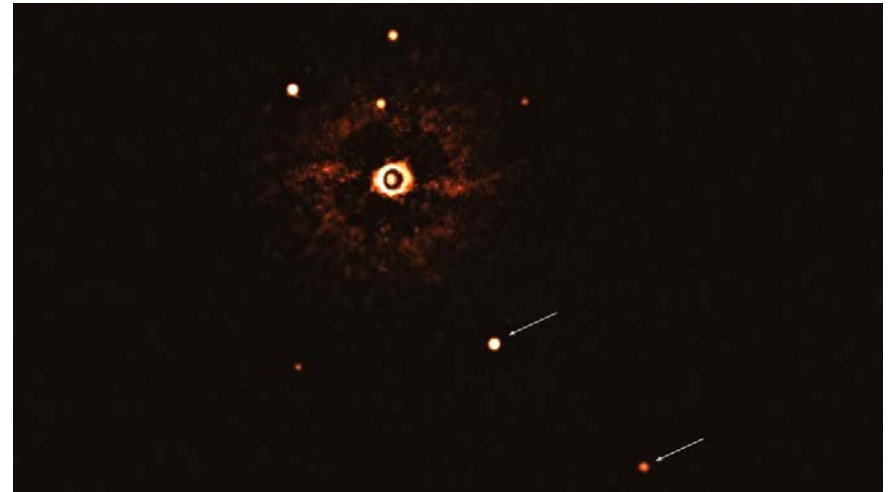
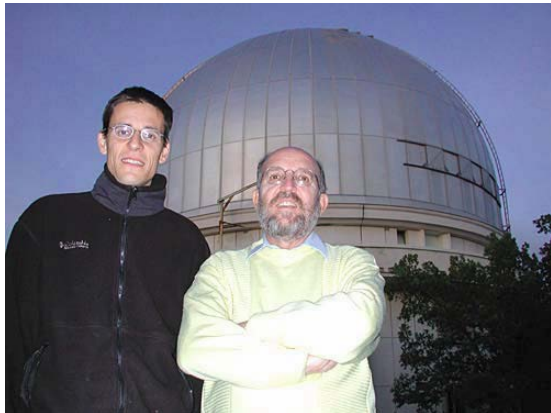
1995 - M. Mayor, D. Queloz - těleso u 51 Pegasi (od r. 2016 Dimidium)

2020 (17.12.) – 4389 exoplanet!, 3241 pl. soustav (např. HD 10180 - 9 planet;
GJ 667C – 7 planet) – zdroj: <http://exoplanet.eu/catalog/>

NASA: 4307 exoplanet, 5683 kandidátů, 3197 soustav (17.12.2020)

<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

Indirect/miscellaneous

- protoplanetary disks
- debris disks/colliding planetesimals
- star accretion/pollution
- white dwarf pollution
- radio emission
- X-ray emission
- gravitational waves

Photometry

Imaging

Transits

reflected/polarised light

Dynamical

Microlensing

Astrometry

Radial velocity

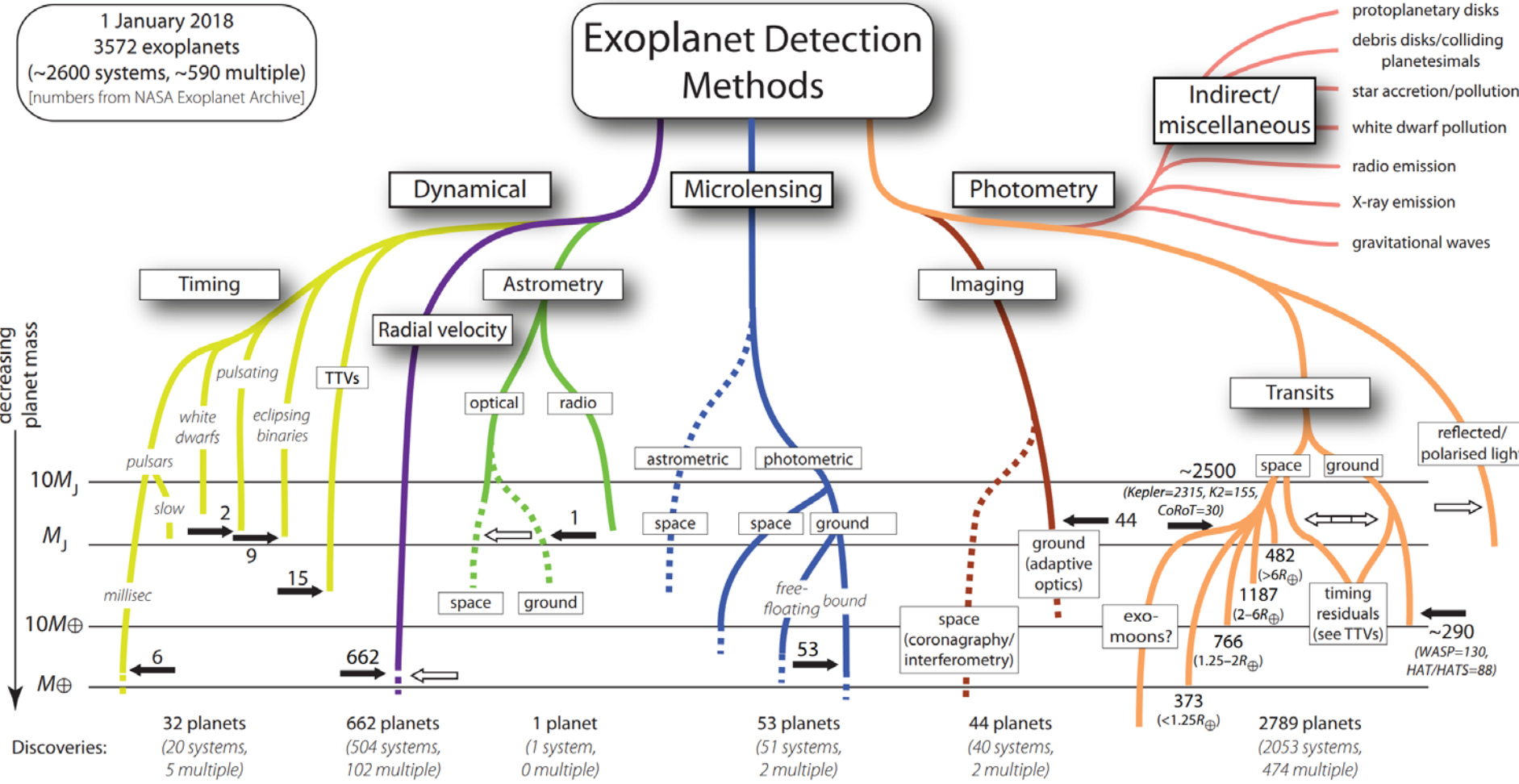
Timing

decreasing planet mass

$10M_J$
 M_J
 $10M_{\oplus}$
 M_{\oplus}

Discoveries: 32 planets (20 systems, 5 multiple) 662 planets (504 systems, 102 multiple) 1 planet (1 system, 0 multiple) 53 planets (51 systems, 2 multiple) 44 planets (40 systems, 2 multiple) 373 ($1.25-2R_{\oplus}$) 2789 planets (2053 systems, 474 multiple)

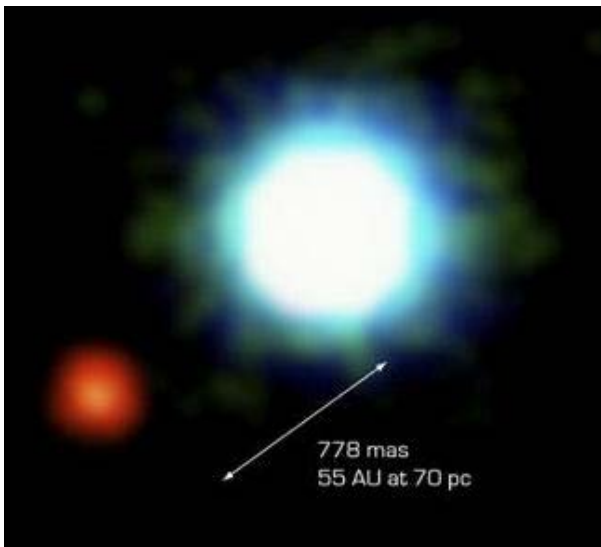
— existing capability projected n = planets known — discoveries ⇨ follow-up detections



Na stopě cizích planet

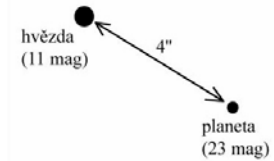
Přímé pozorování planet jiných hvězd není zatím možné.
velký rozdíl jasností,
malá vzdálenost.

od 2004 už NEPLATÍ – Very Large Telescope
planeta u hnědého trpaslíka 2M1207
k 16.12. 2020 – 143 exoplanet, 106 soustav

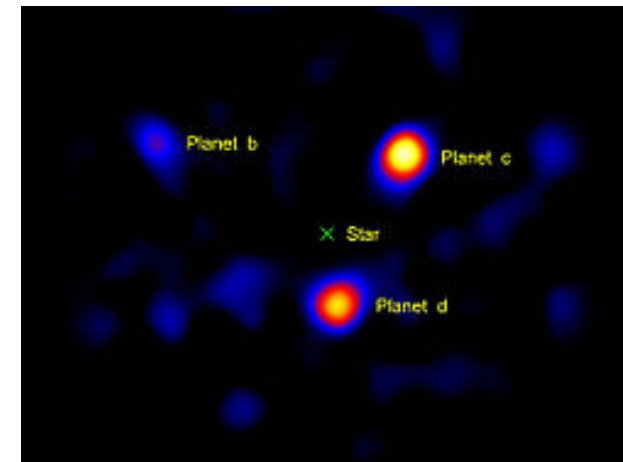


hnědý trpaslík 2M1207 (modrý objekt) a jeho planeta (červeně) VLT – září 2006

Přímé pozorování:



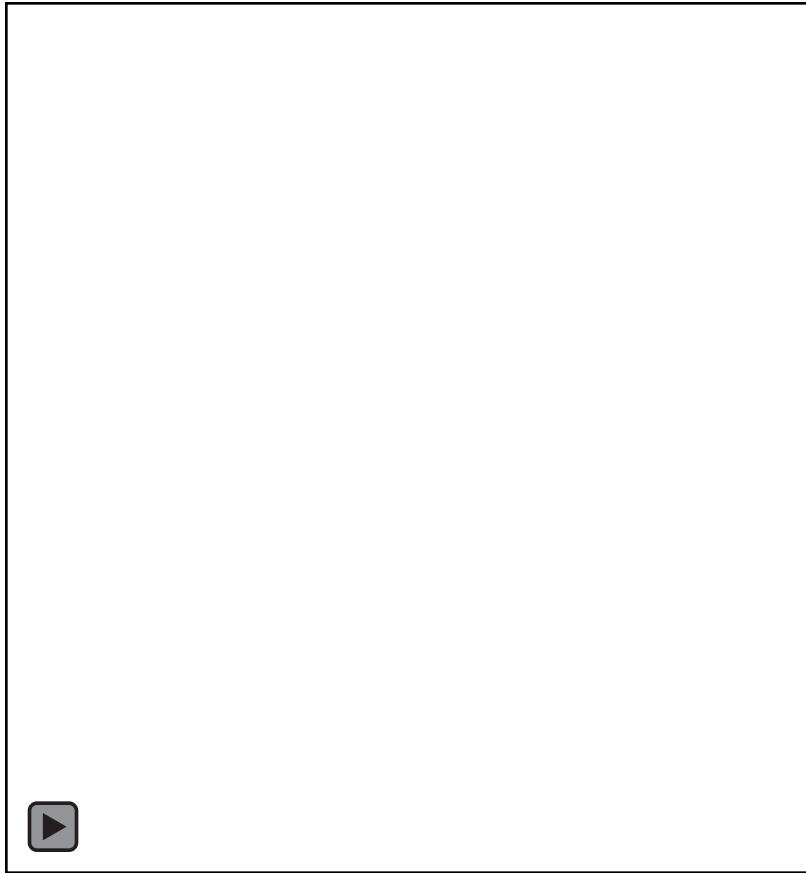
Jupiter u hvězdy Proxima Centauri obíhající ve vzdálenosti 780 milionů km



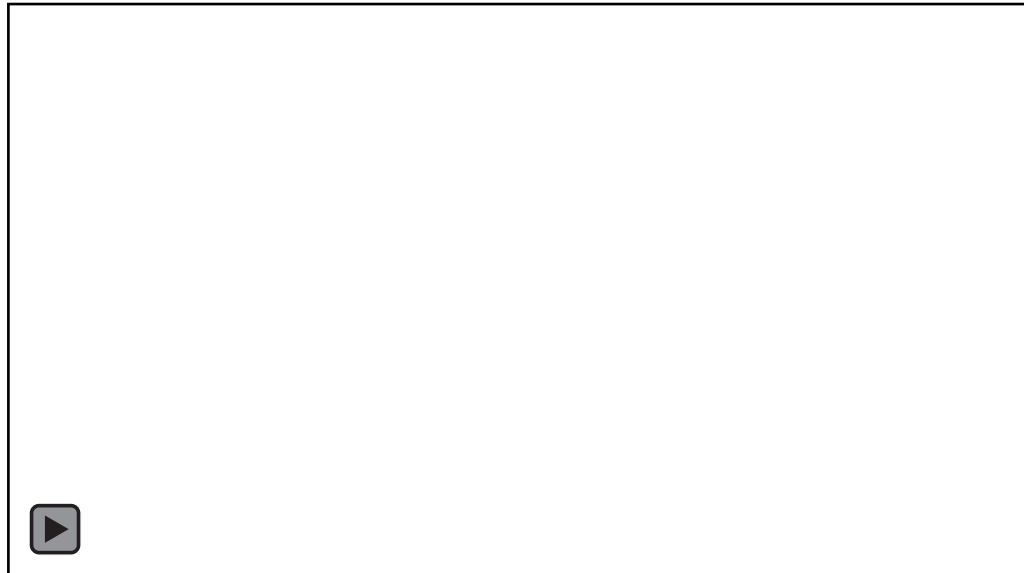
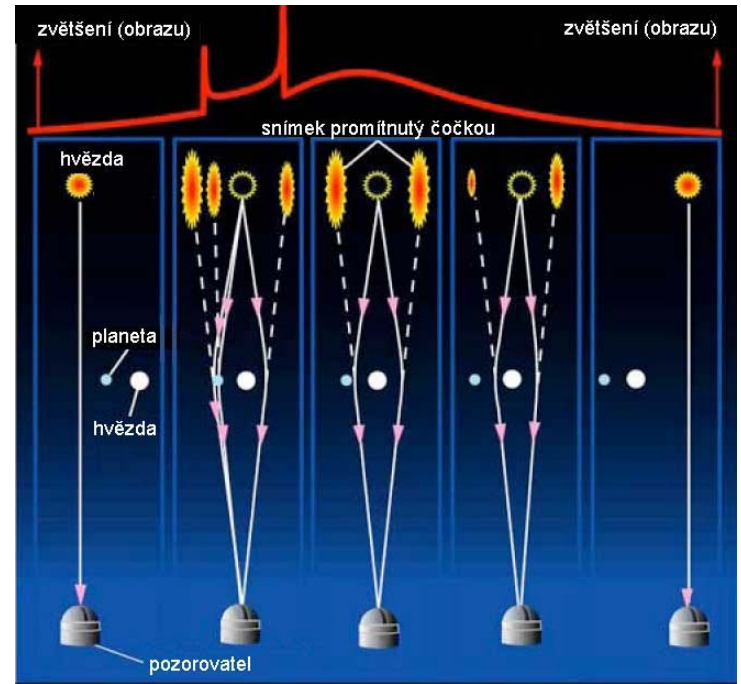
exoplanety u hvězdy HR8799 (1.5m Haleův dalekohled, Palomar)



Gravitační mikročochky



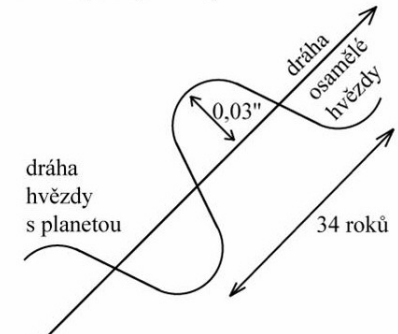
132 exoplanet, 117 soustav
(k 16. 12. 2020)



Astrometrie - sledování pohybu vytypované hvězdy na hvězdné obloze 12 planet (16. 12. 2020)

Jupiter u hvězdy Proxima Centauri obíhající ve vzdálenosti 780 milionů kilometrů

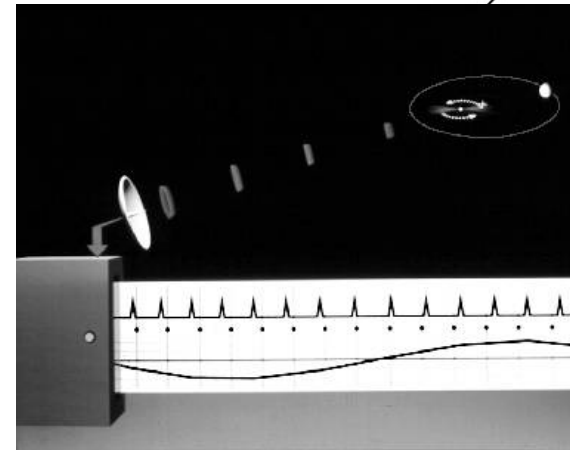
Změna polohy hvězdy:



Timing - 45 exoplanet (4. 12. 2017)

Pulsar - anomálie v pulzech pulzarů (19)

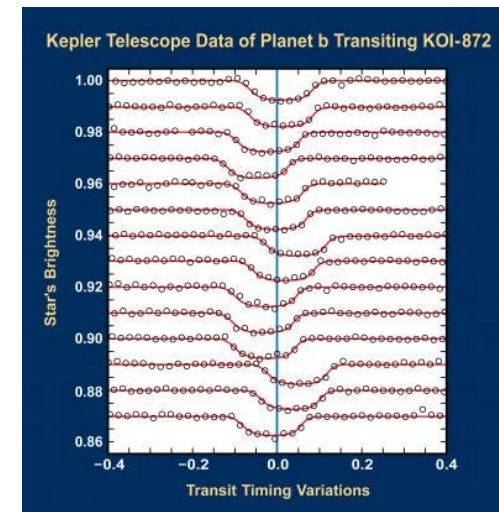
Proměnné hvězdy – odchylky pravidelných změn periodicky proměnné hvězdy (26)



Transit timing variation method (TTV)

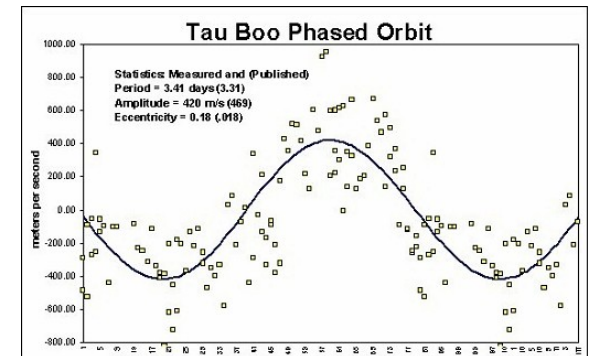
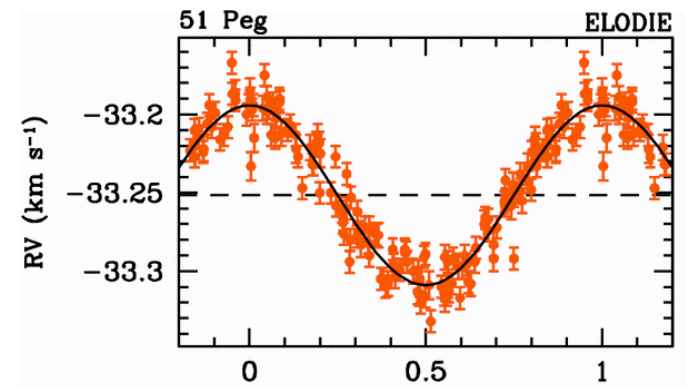
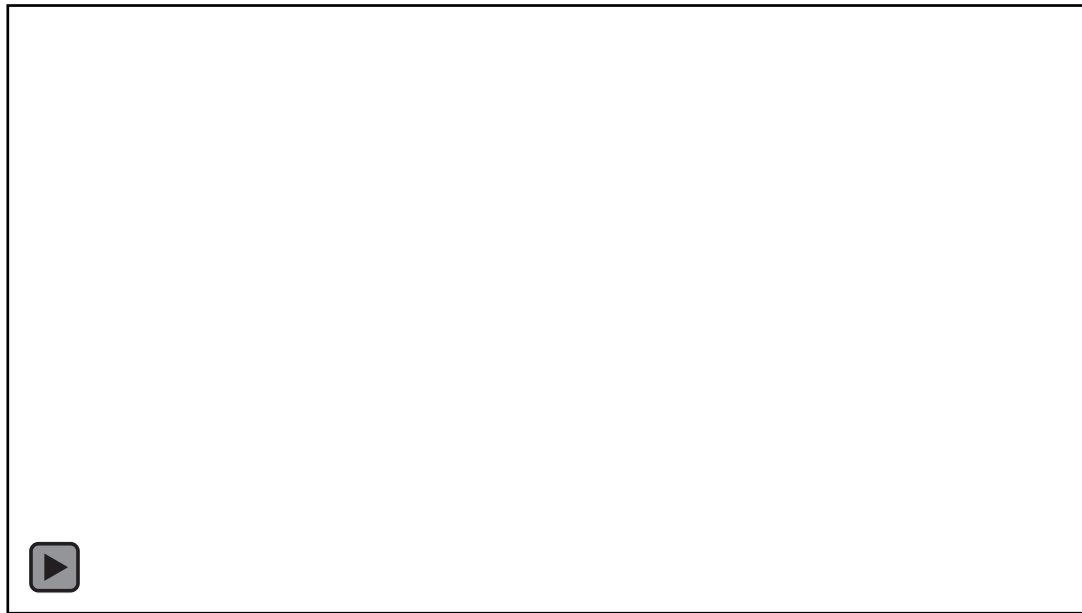
= změny okamžiků středů transitů;

- 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 16.12. 2020 20 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 (16. 12. 2020) – 912 planet, 670 planetárních soustav, 165 víceplanetárních soustav



amatérský projekt, 40cm dalekohled

Transity

- pozorování přechodu exoplanety před mateřskou hvězdou;
- nyní nejúspěšnější metoda - 3117 exoplanet, 2338 soustav, 505 soustav s více planetami (16. 12. 2020)
- program se zapojením amatérů a menších dalekohledů
- KEPLER, COROT, TESS

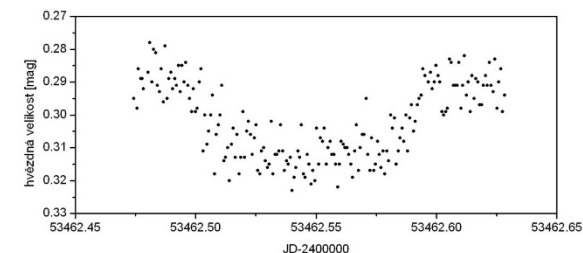
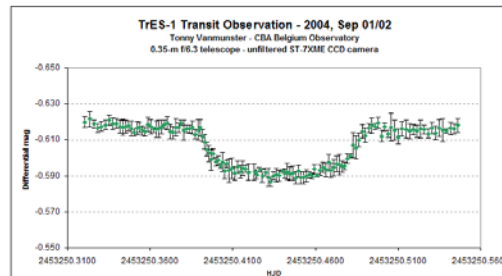
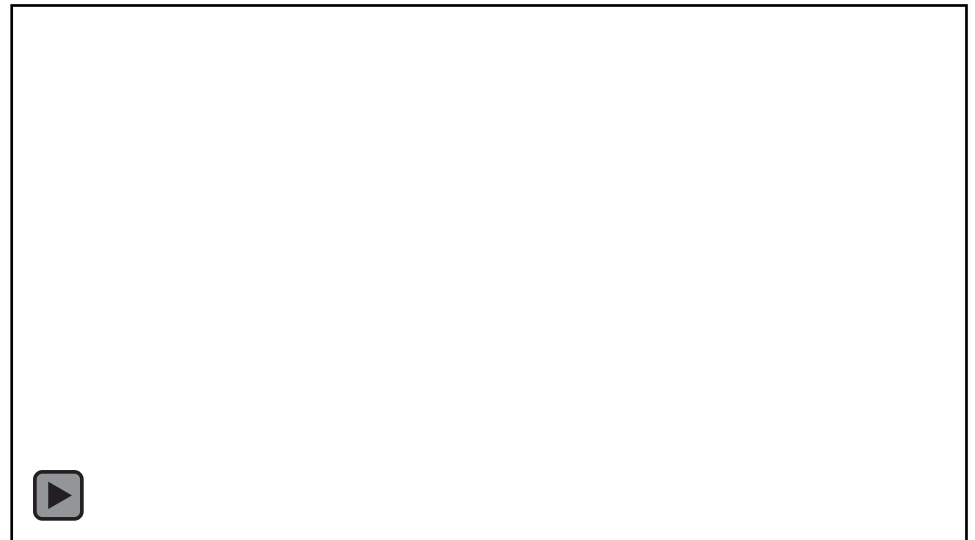
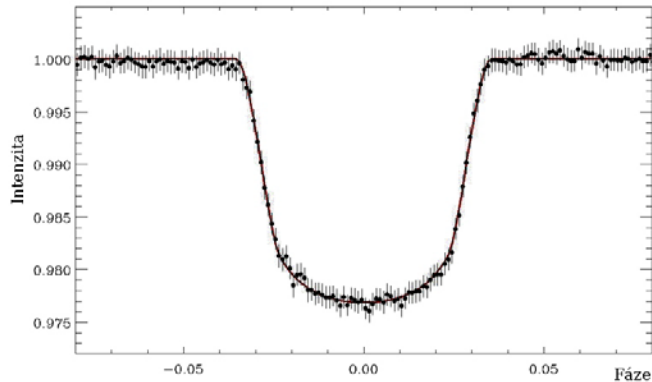
HAT = *Hungarian-made Automated Telescope*

TrES = *The Transatlantic Exoplanet Survey*

WASP = *The Wide Area Search for Planets*

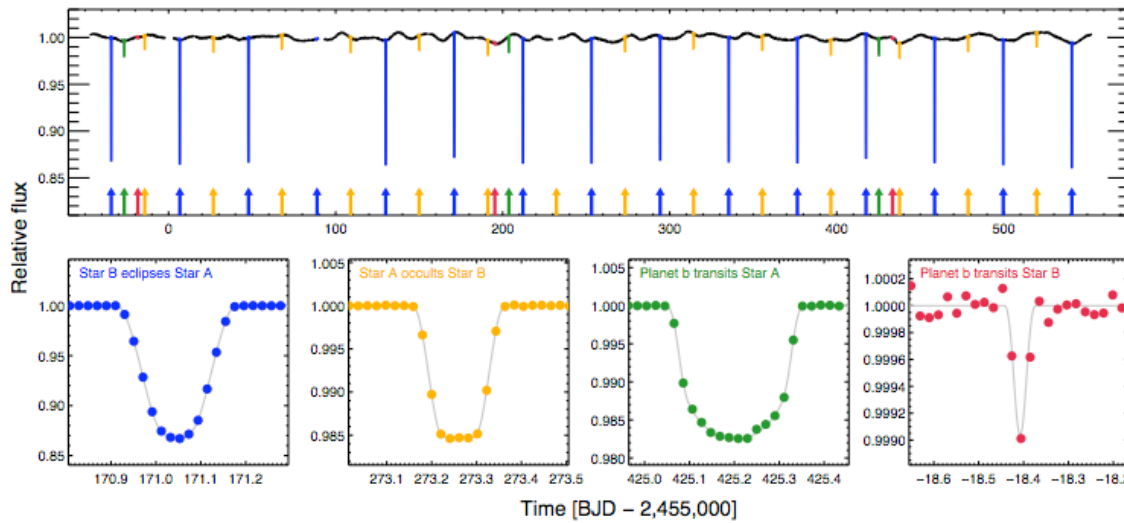
NGTS = *Next-Generation Transit Survey*

XO, TRAPIST, MASCARA aj.

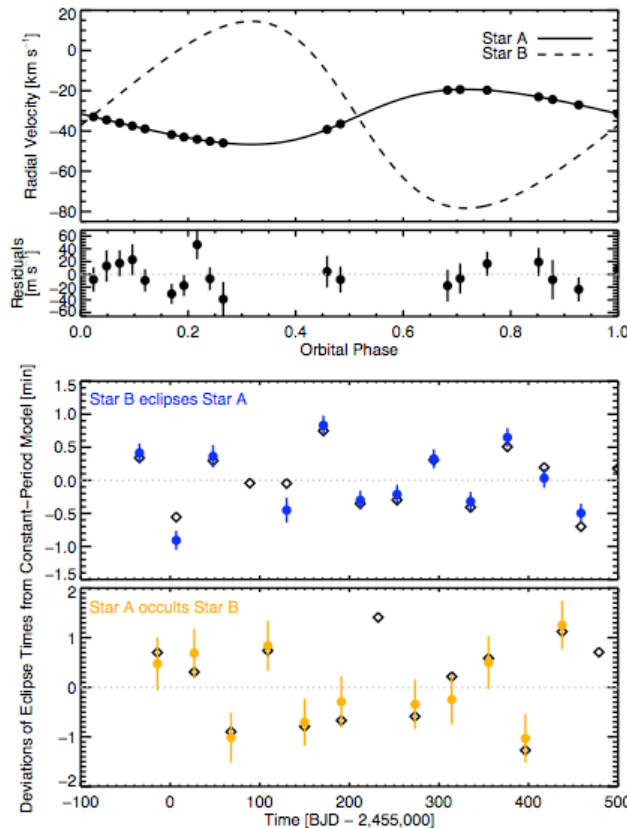
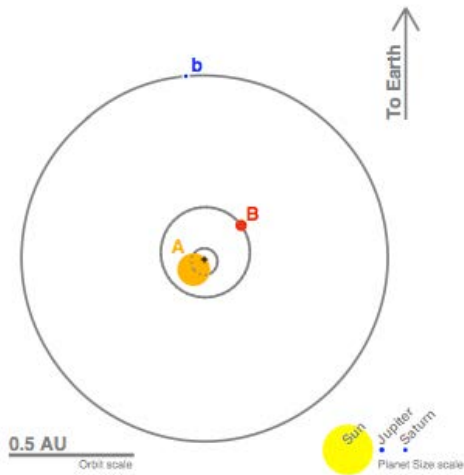


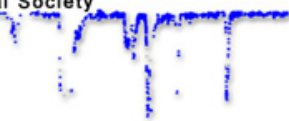
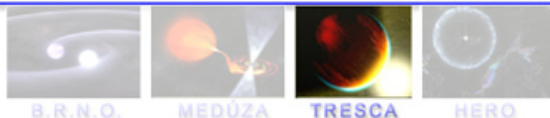
Transit duration variation method (TDV)

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	55 Cnc e	Cnc	1	2011-02	2011-02	04. May 2011 (586)
2	CoRoT-1 b	Mon	60	2007-02	2012-03	05. Mar 2012 (280)
3	CoRoT-10 b	Aql	1	2007-06	2007-06	16. Jun 2010 (908)
4	CoRoT-11 b	Ser	4	2008-05	2012-06	28. Jun 2012 (165)
5	CoRoT-12 b	Mon	2	2007-10	2012-01	26. Jan 2012 (319)
6	CoRoT-13 b	Mon	1	2008-11	2008-11	16. Jun 2010 (908)
7	CoRoT-17 b	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“.

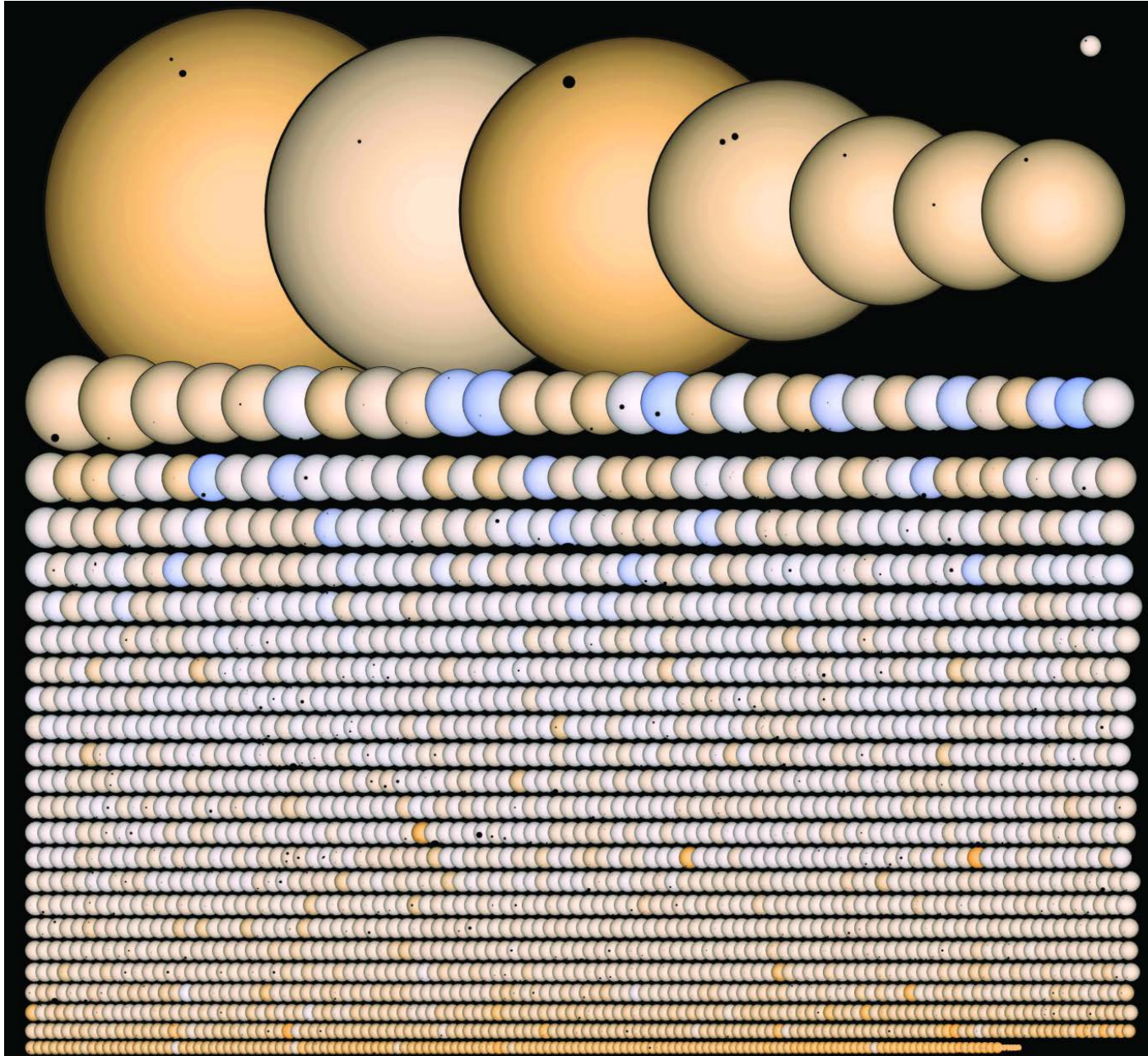


TESS (od 2018) – 82 potvrzených exoplanet, 2428 kandidátů (16.12.2020)

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

Další projekty: PLATO (2026), New Worlds Mission, Darwin, Space Interferometry Mission, Terrestrial Planet Finder, CHEOPS, PEGASE, ...

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)

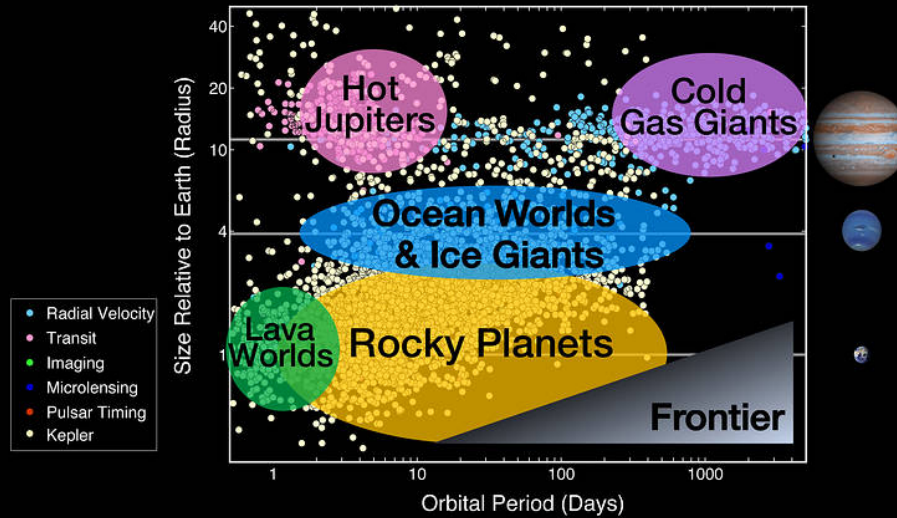
– nezvyklé změny jasnosti – zákryty kometami, stavbou cizí civilizace...



Keplerův orloj IV

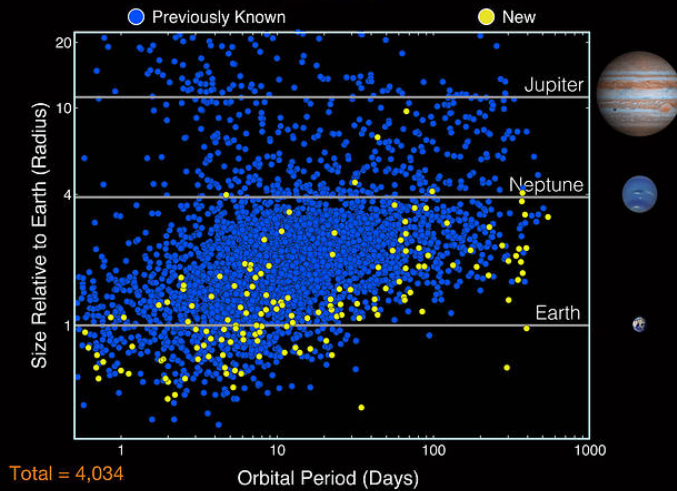


Exoplanet Populations



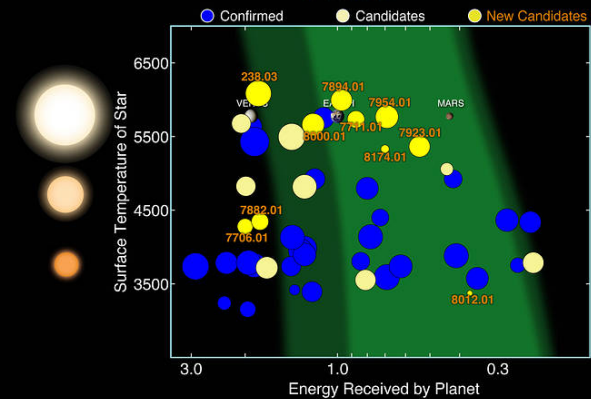
New Kepler Planet Candidates

As of June 2017



Kepler Habitable Zone Planets

As of June 2017

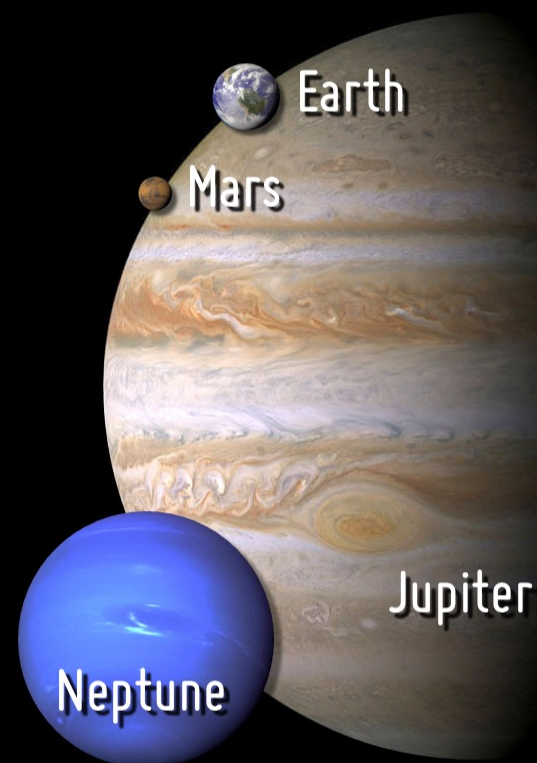
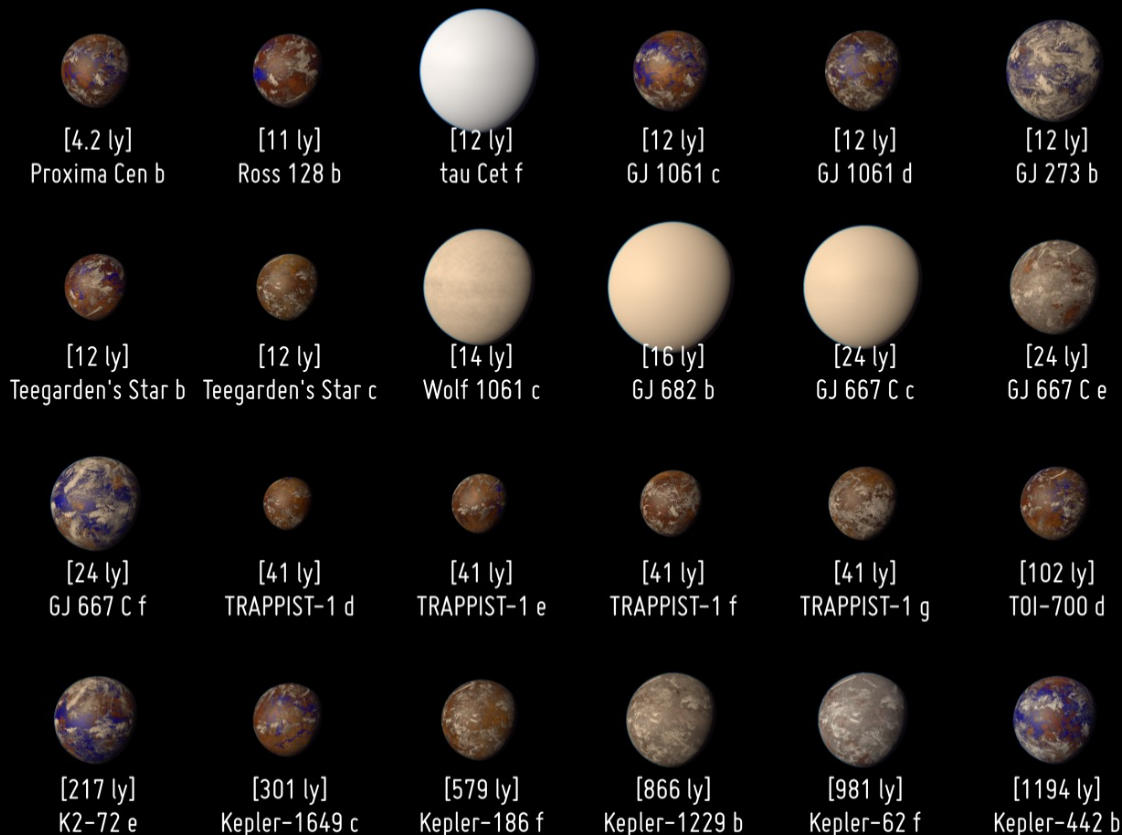


říjen 2020 – 60 exoplanet v zónách života
1 exomars, 23 exozemí, 36 superzemí



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

Hledání další Země

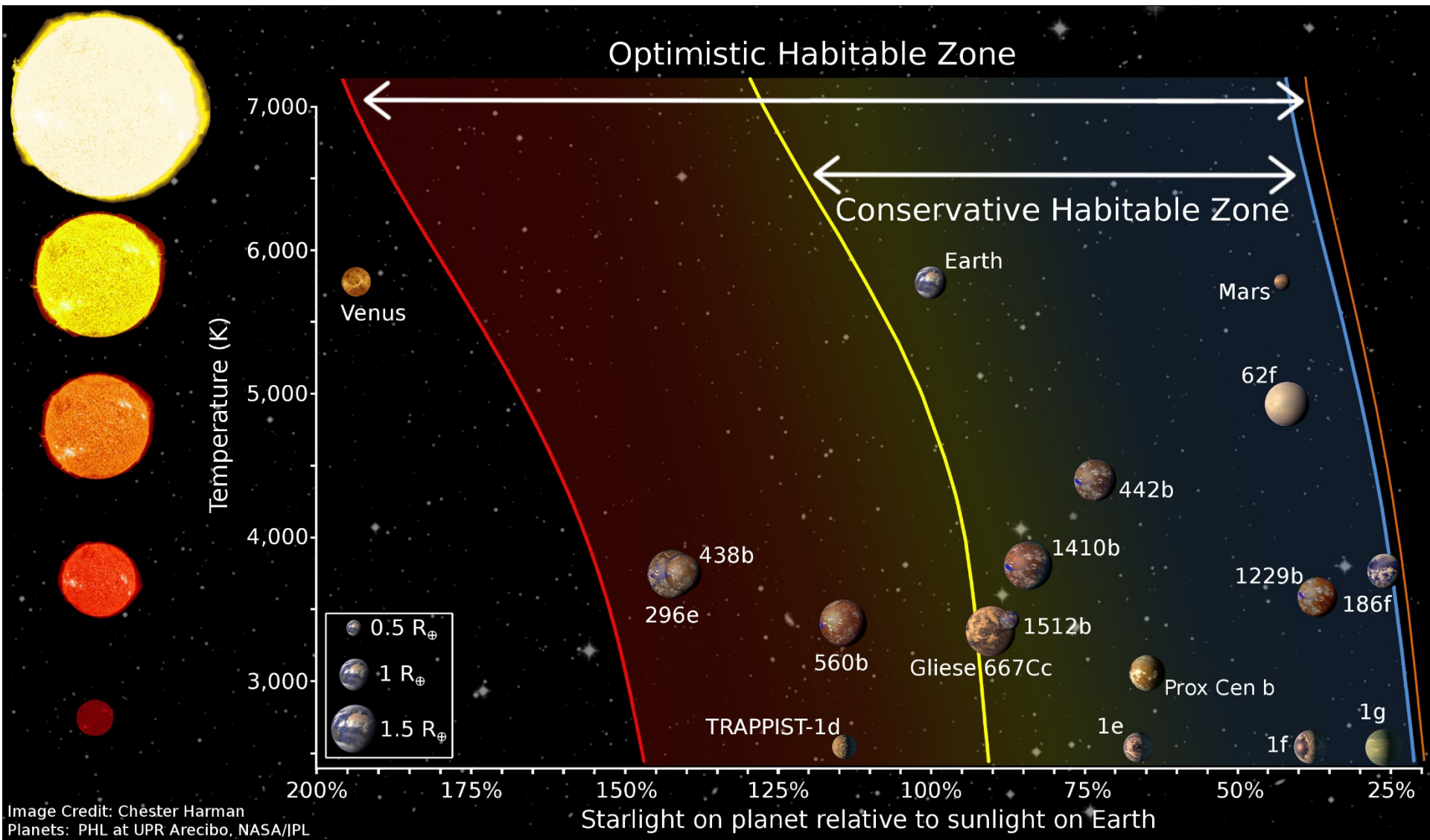
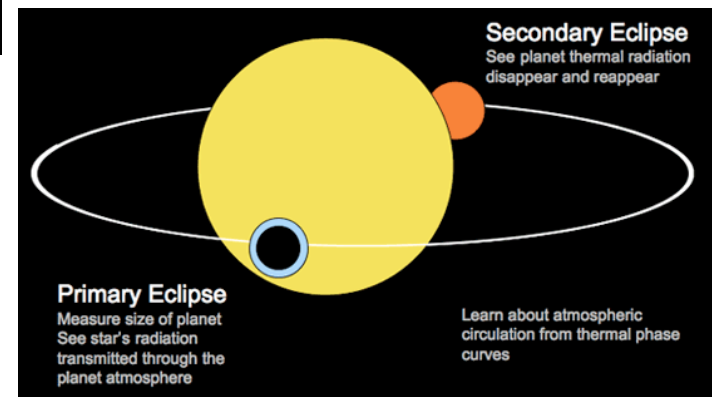
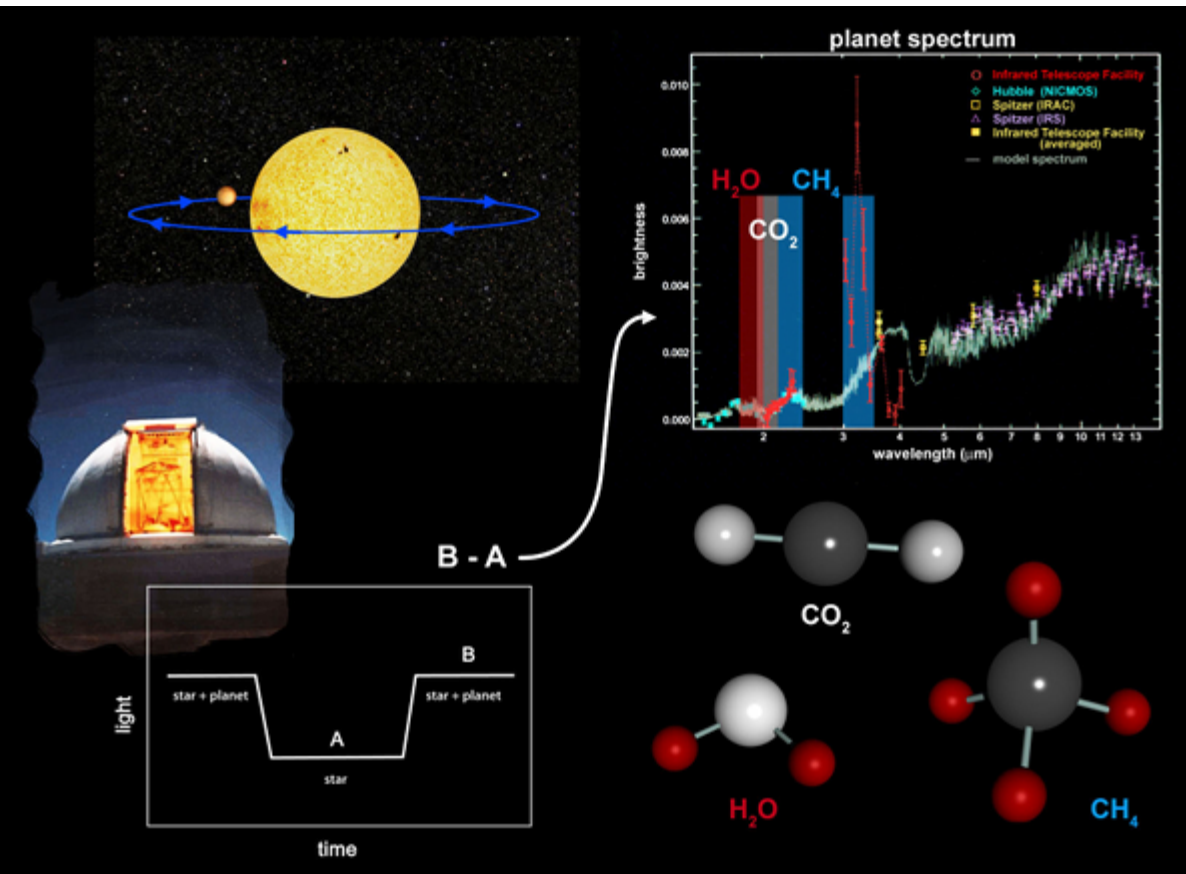


Image Credit: Chester Harman
Planets: PHL at UPR Arcibo, NASA/IPL

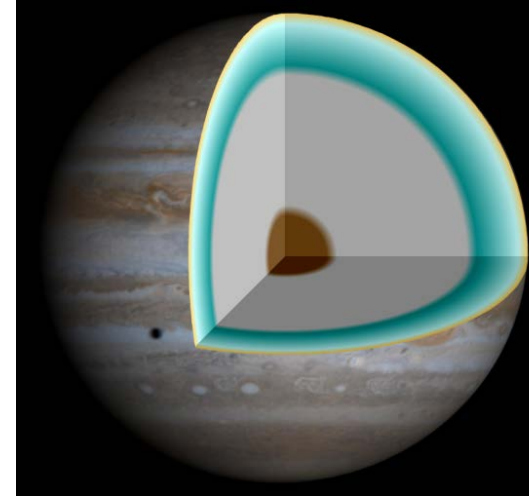
Atmosféry exoplanet



Planety na počátku vývoje

Všechny planety a velké družice:

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

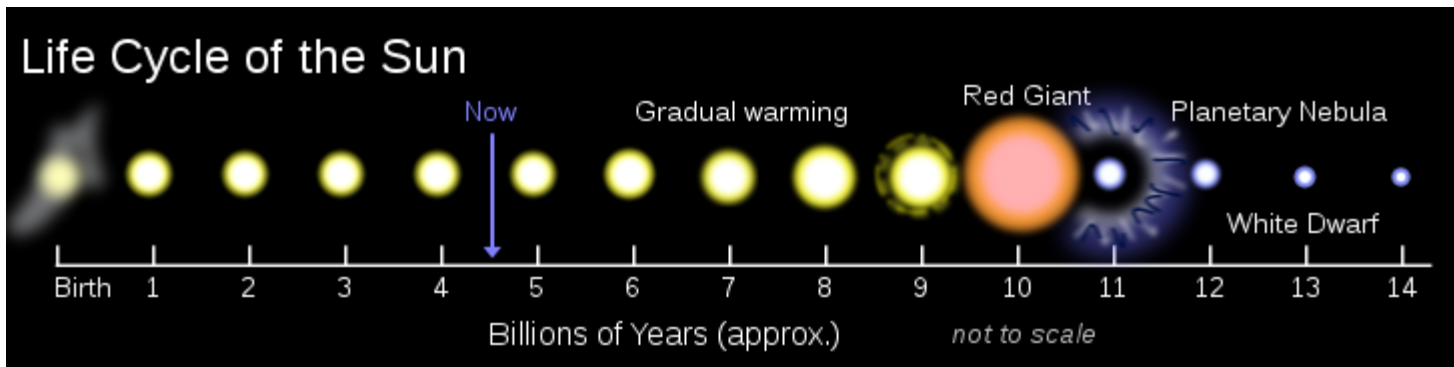


zárodečná látka v místě vzniku planety

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:

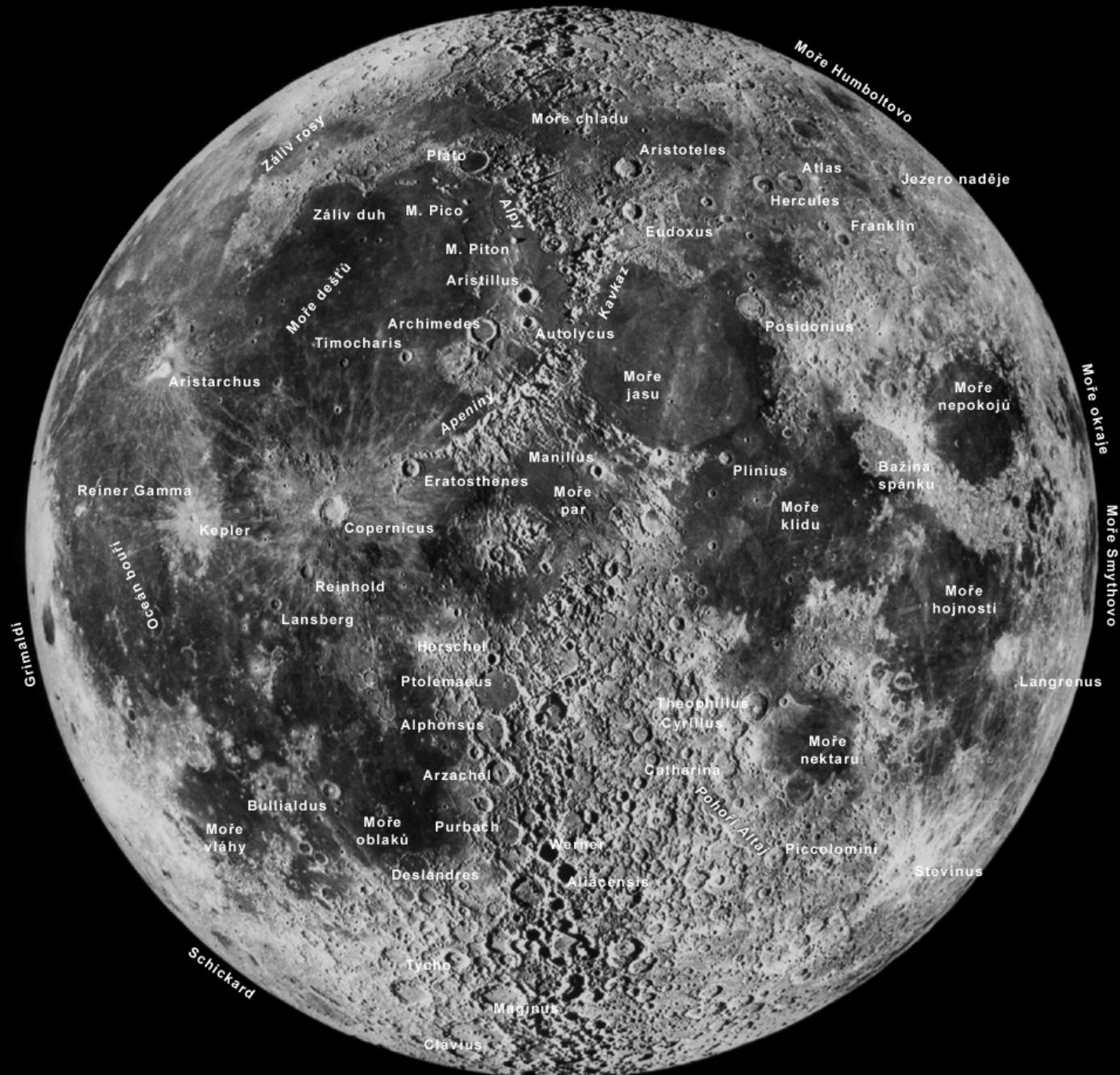
Měsíc - Mare Serenitatis, Mare Imbrium;

Merkur - Caloris Planitia;

Mars – Hellas;

Kallistó (u Jupitera) – Valhalla.



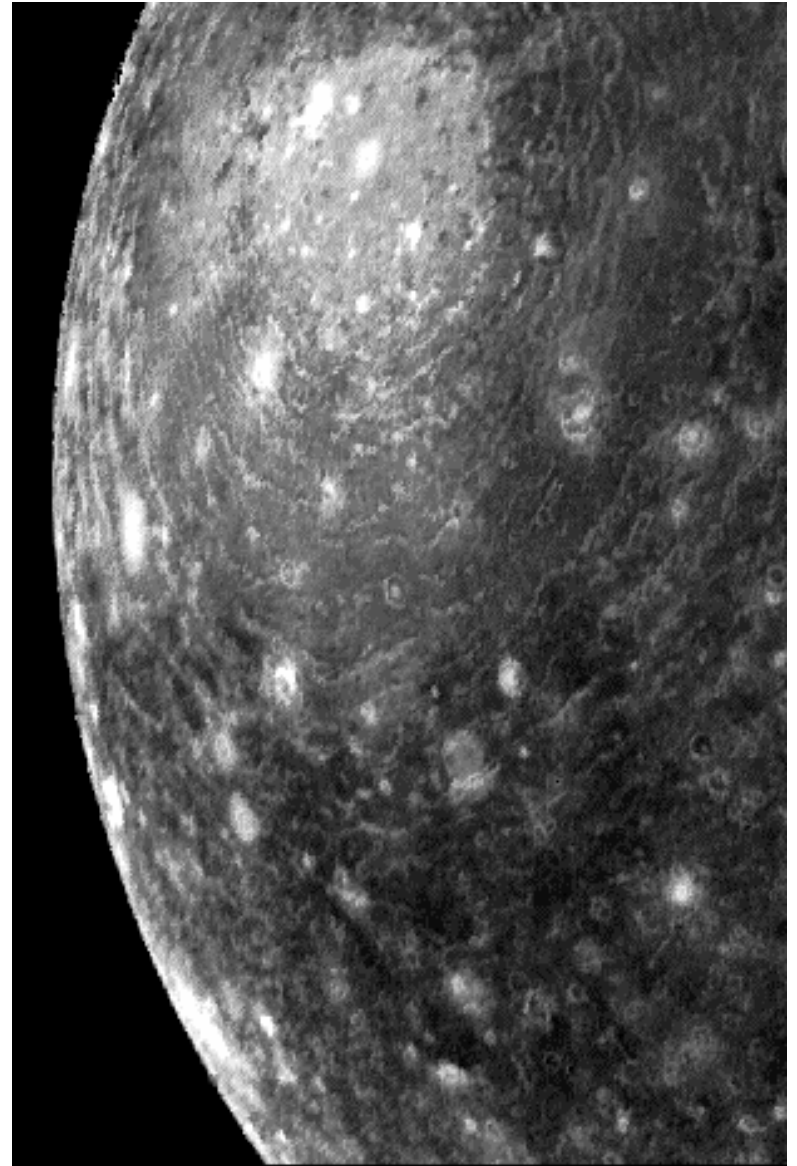




Mare Imbrium na Měsíci

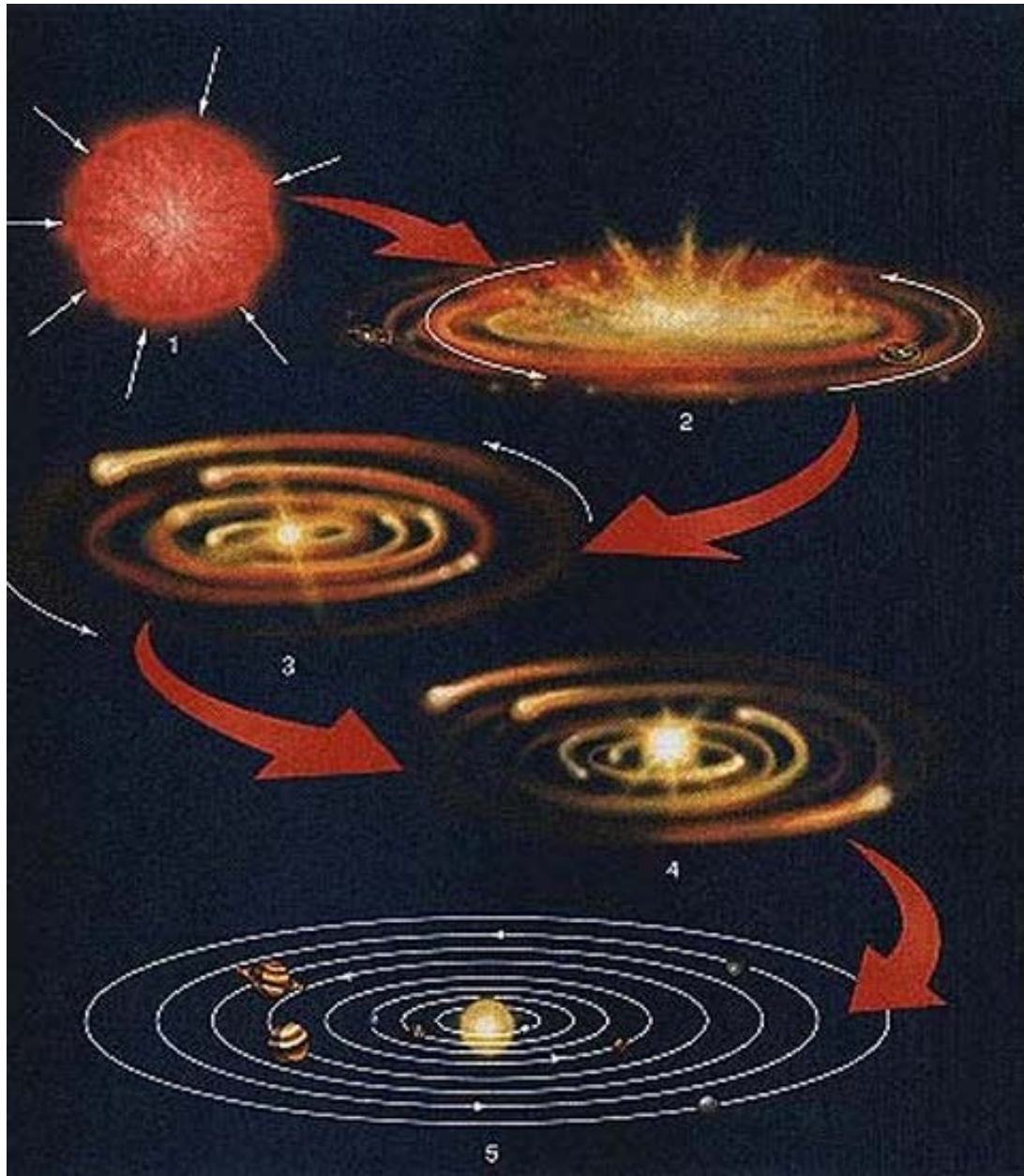


Caloris Planitia na Merkuru.



Pánev Valhalla (Jupiterova družice Kallistó).

Vývojový scénář sluneční soustavy



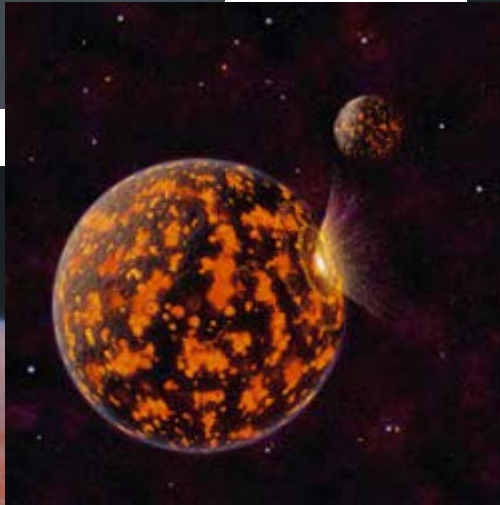
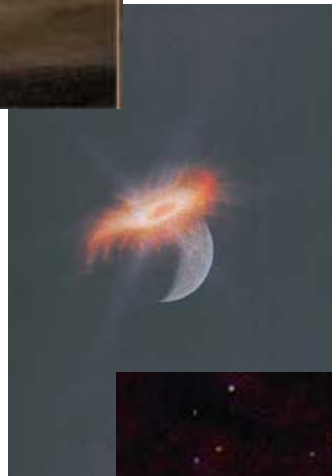
1 protoslunce

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)



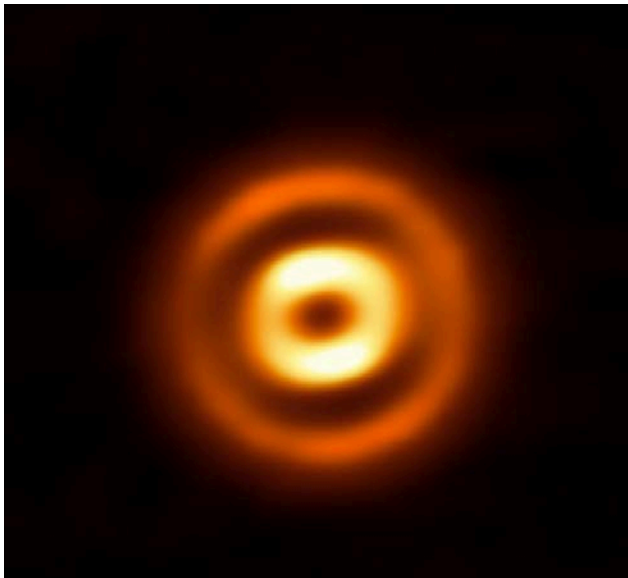
VLT,
SPHERE

HD 97048

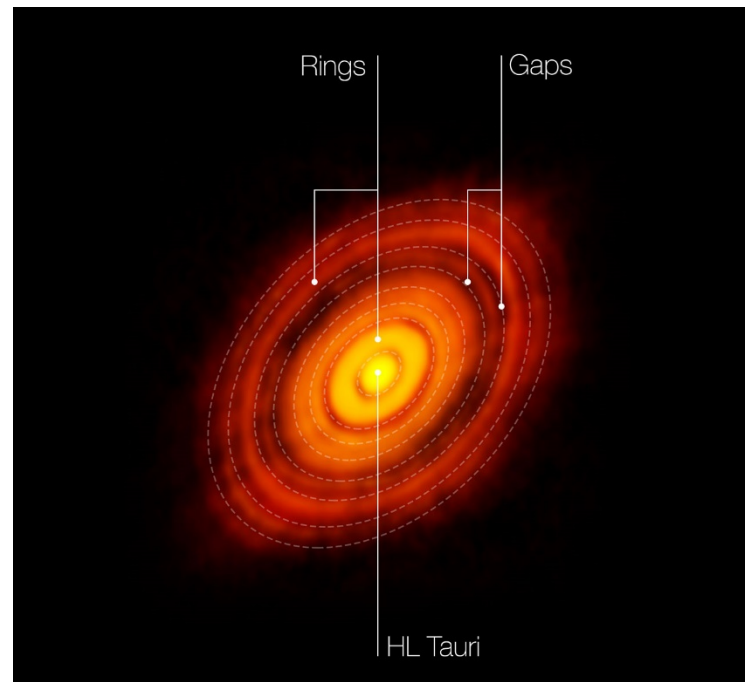
HD 135344B

RX J1615

HD 169142



ALMA



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 stádiích 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

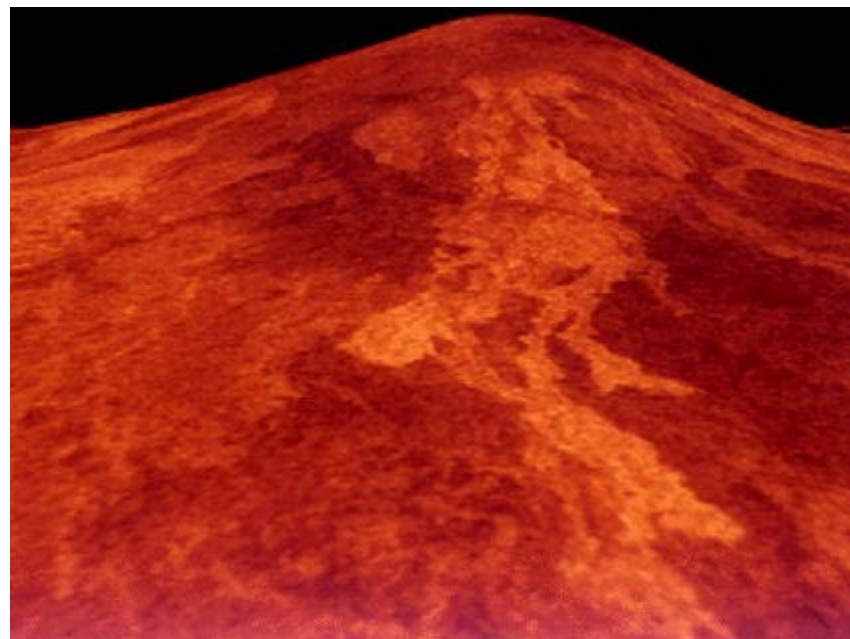
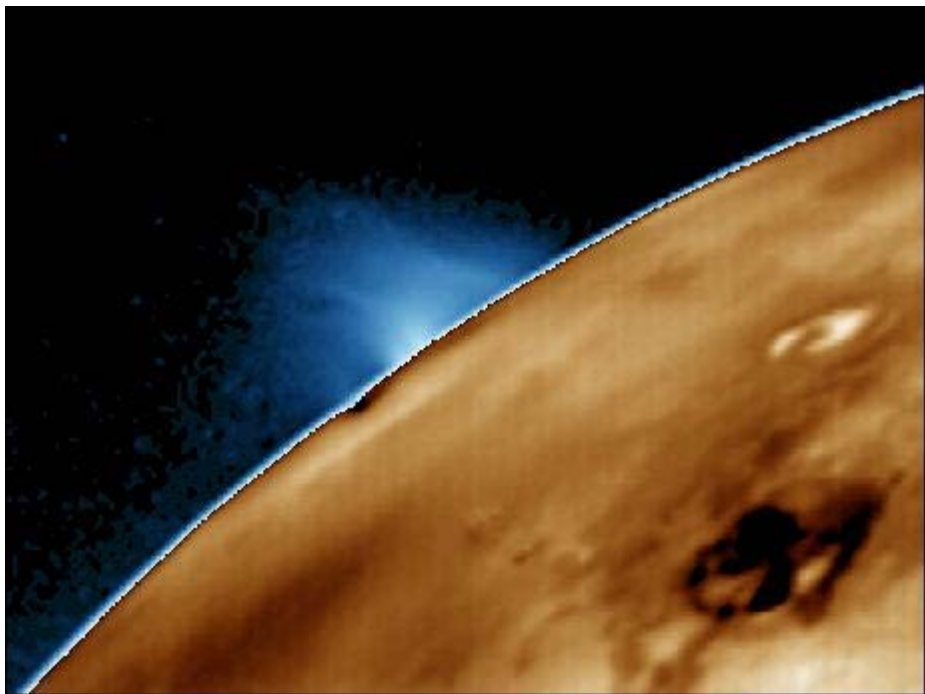
magmatismus - působení magmatu v hloubce

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)

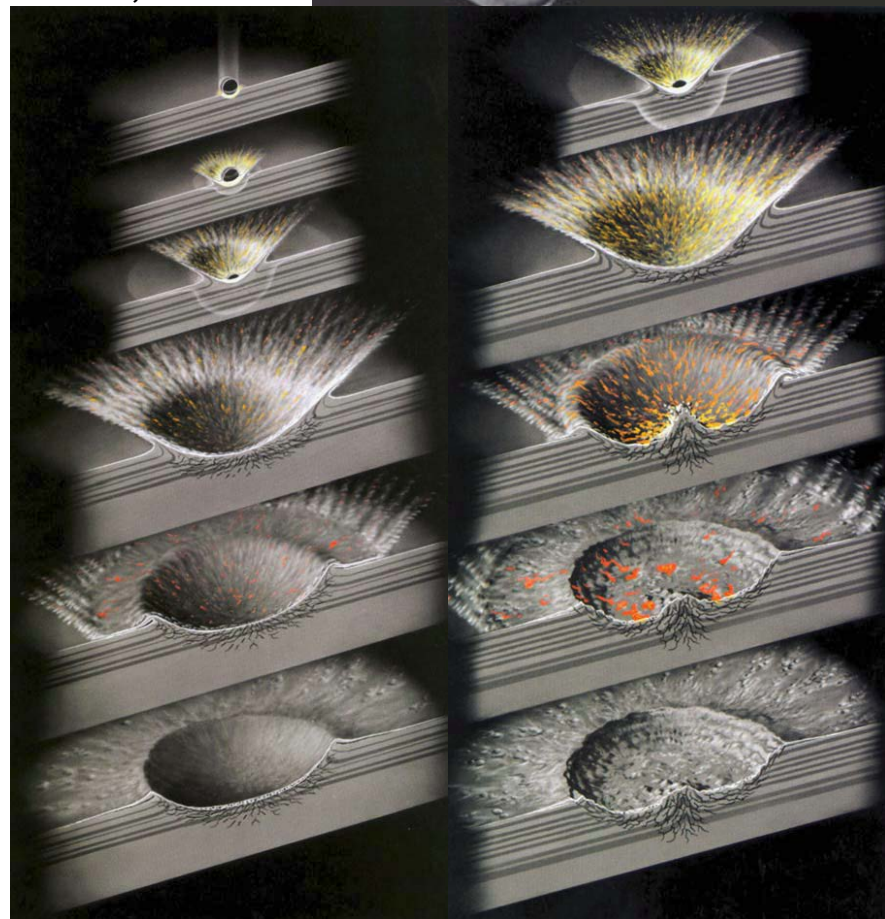
Impakty

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

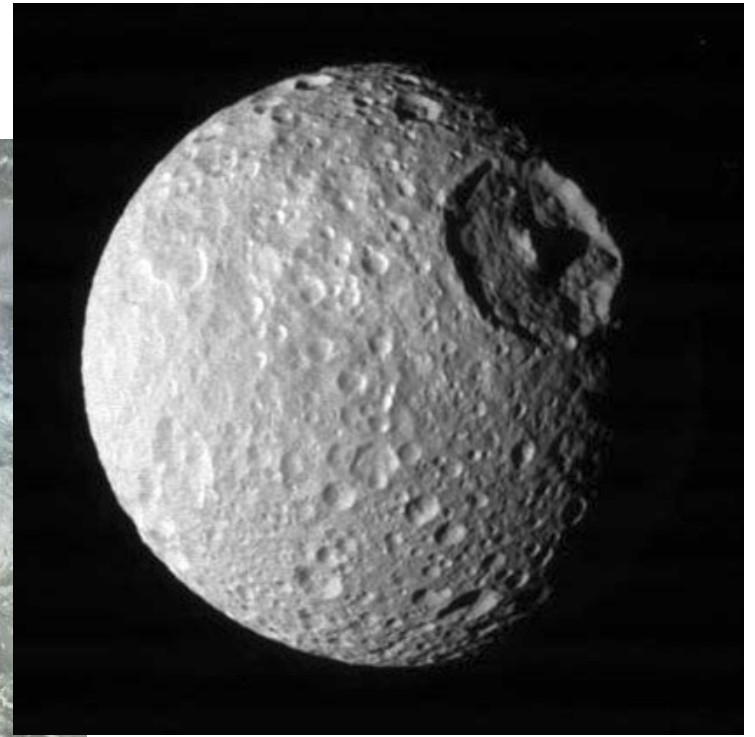
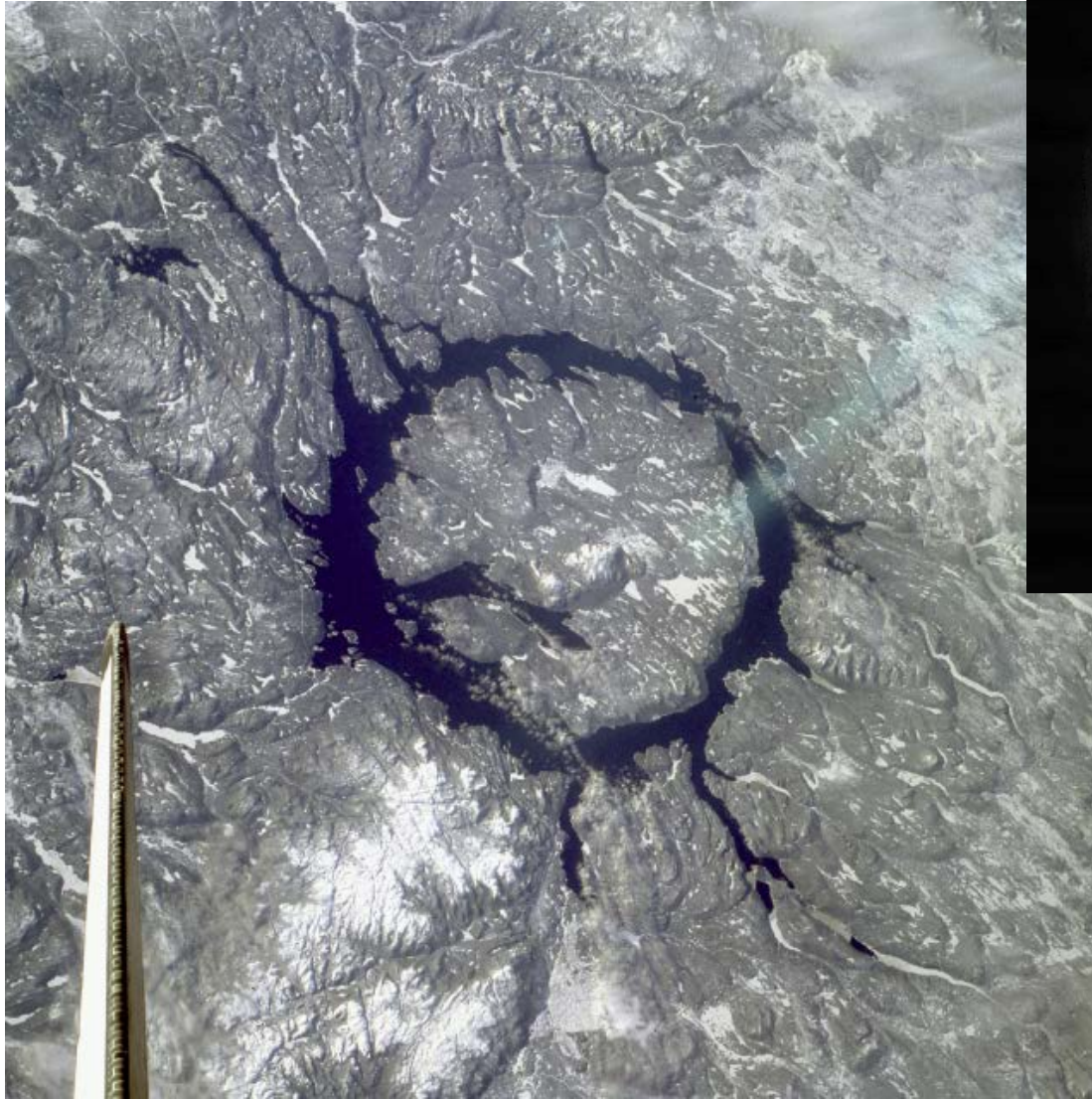
vznik zejména v době intenzivního bombardování, ale i dnes!

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; 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 -> řidnutí 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:

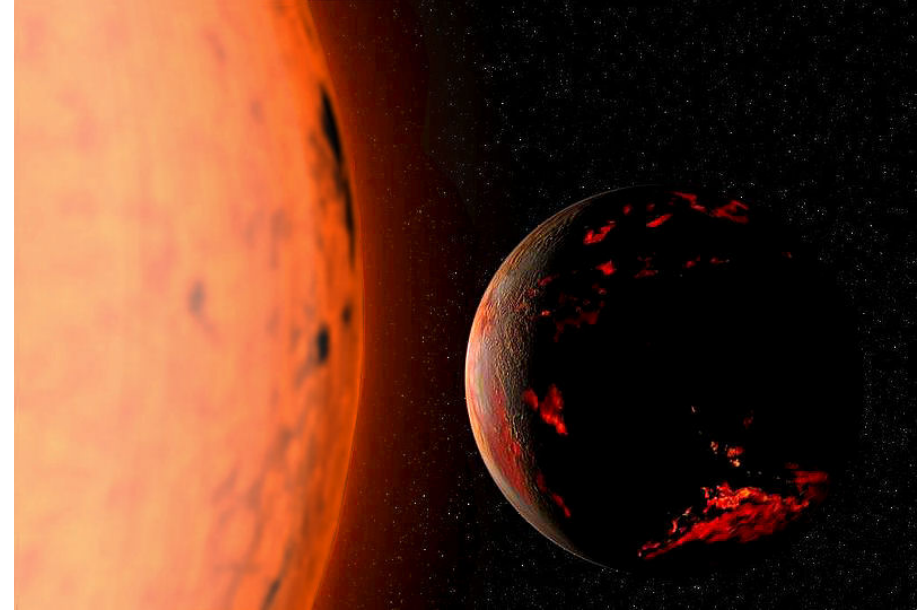
poloměr 1 au,

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)

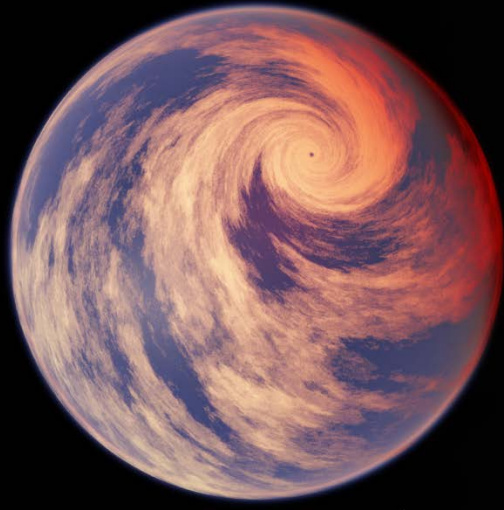
teplota Země výrazně vzroste => rozhodně neobyvatelná!





Země v současnosti



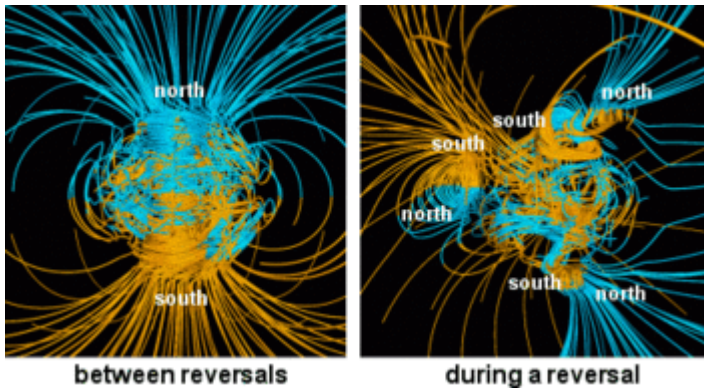


obří cyklón

dopad asteroidu



supervulkán



rychlá změna mg. pole





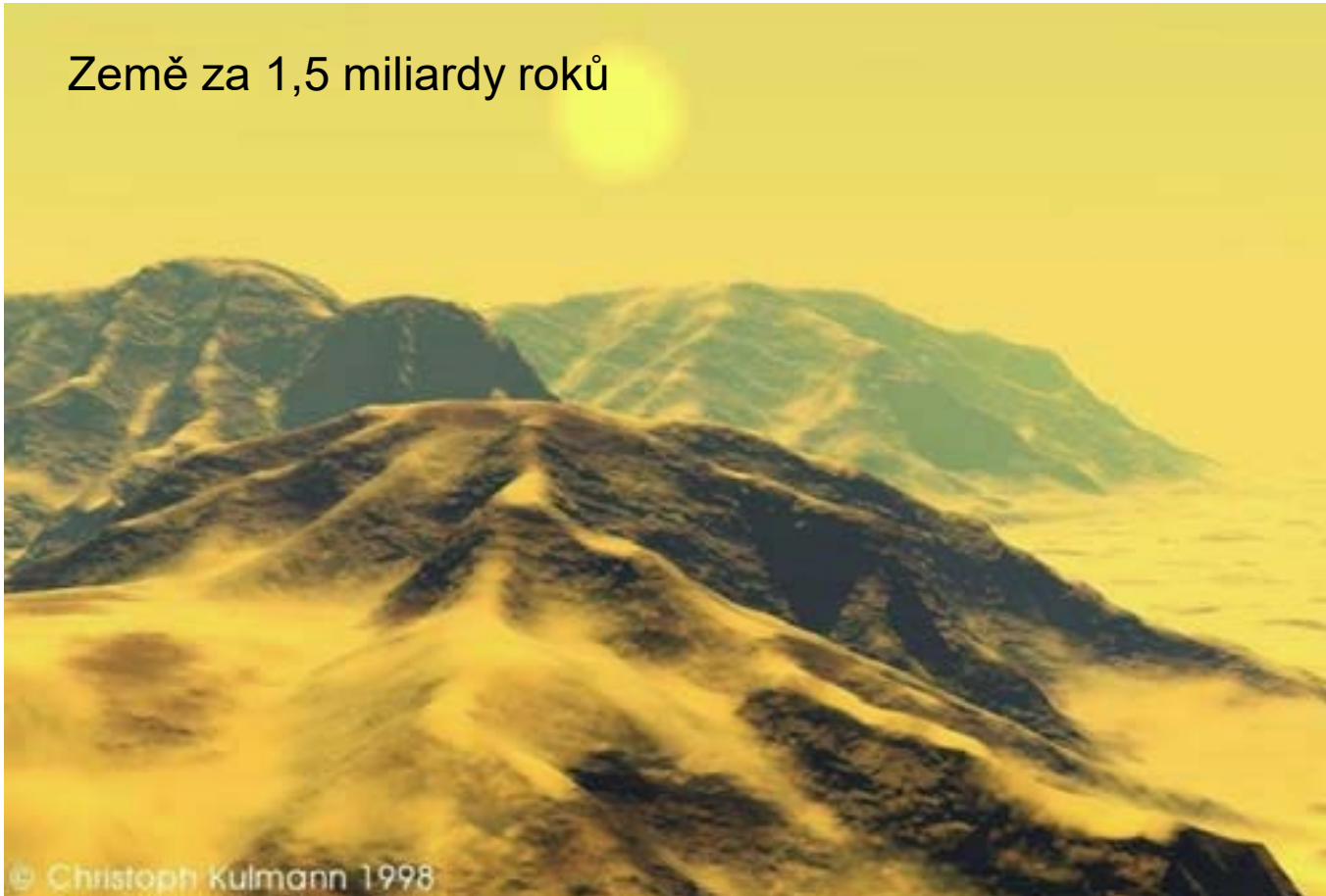
za 250 mil. let - vznik superkontinentu Pangea Ultima

Země za 700 milionů roků



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

Země za 1,5 miliardy roků



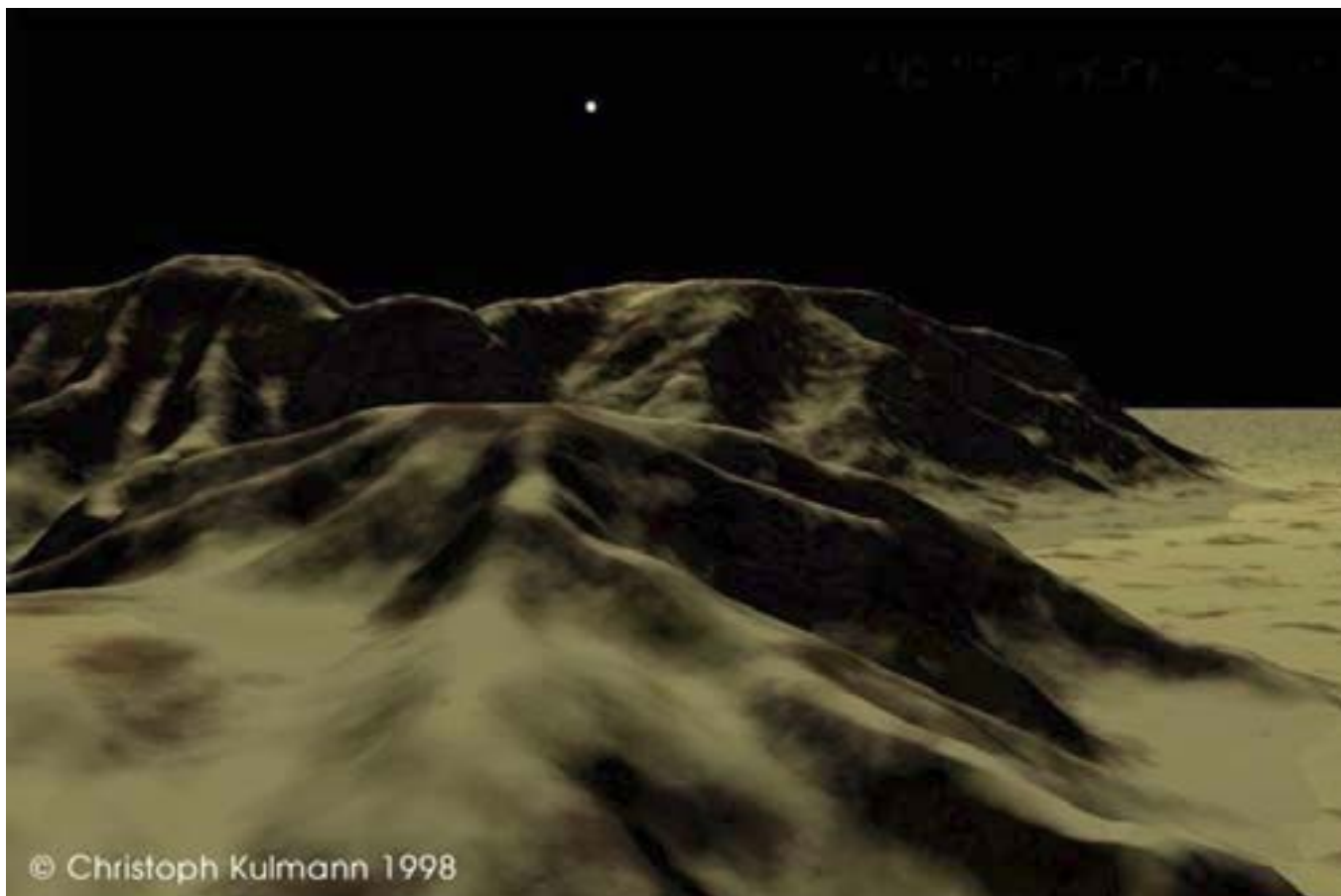
oceány se vypařily; překotný skleníkový jev, teplota $> 200^{\circ}\text{C}$
mrtvá planeta

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!