

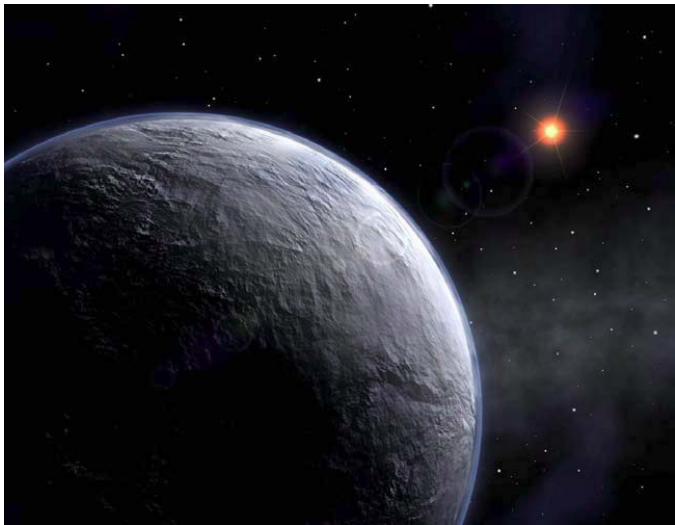
Exoplanety



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

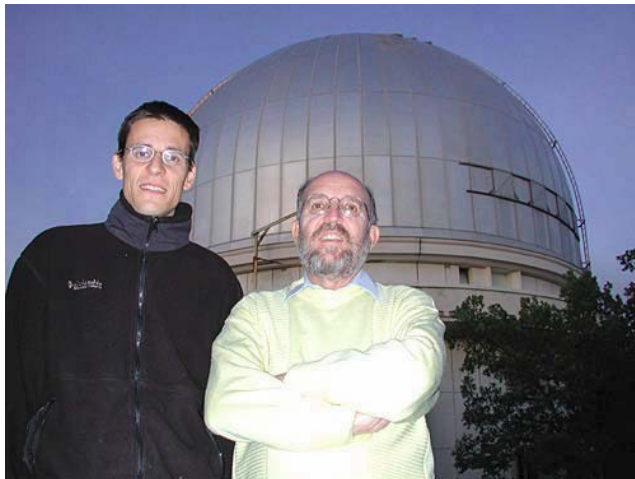
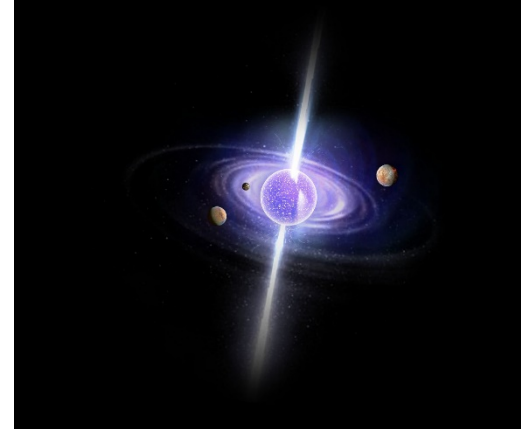
1995 - M. Mayor, D. Queloz - těleso u 51 Pegasi (od r. 2016 planeta Dimidium)

2023 (12.12.) – 5558 exoplanet!, 4095 pl. soustav (např. Kepler 90 – 8 planet, HD 10180 - 7 planet+2 kandidáti; TRAPPIST-1 - 7+1 planet ...) – zdroj: <http://exoplanet.eu/catalog/>

NASA: 5557 exoplanet, 10028 kandidátů, 4270 soustav (12.12.2023)

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

2019 Nobelova cena Mayor & Queloz & Peebles



Exoměsíce, exokomety, ...

Rozmanité exoplanety

Podle velikosti a vlastností

- **Plynní obři (exojupiter)** – 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 jupiteři**“ - 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 exojupiteři - 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*) - desítky objektů, z toho 2 potvrzené (prosinec 2022); 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

Indirect/miscellaneous

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

Dynamical

Microlensing

Photometry

Timing

Astrometry

Imaging

Radial velocity

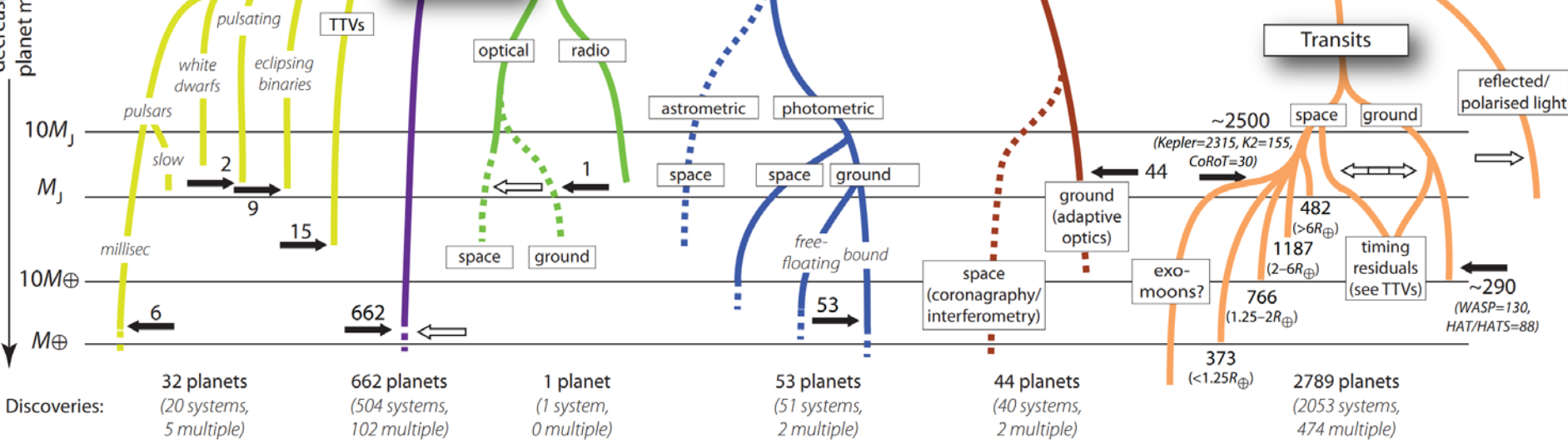
Transits

decreasing planet mass

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



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



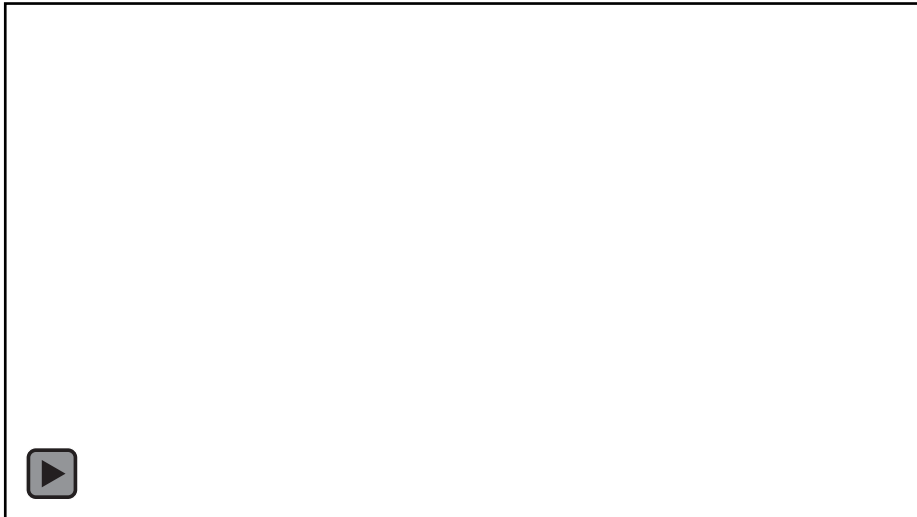
Na stopě cizích planet

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

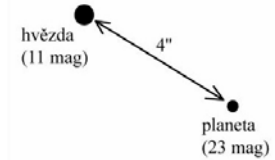
velký rozdíl jasností,
malá vzdálenost.

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

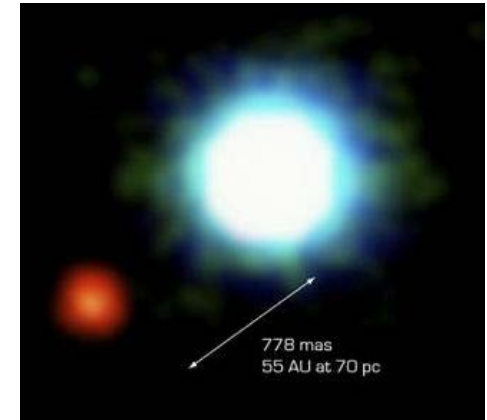
k 12.12. 2023 – 234 exoplanet, 138 soustav



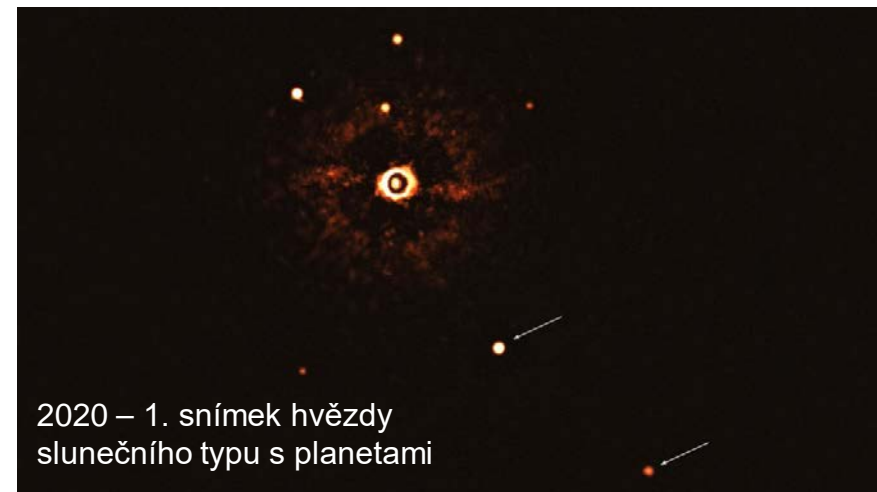
Přímé pozorování:



Jupiter u hvězdy Proxima Centauri obíhající ve vzdálenosti 780 milionů km



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



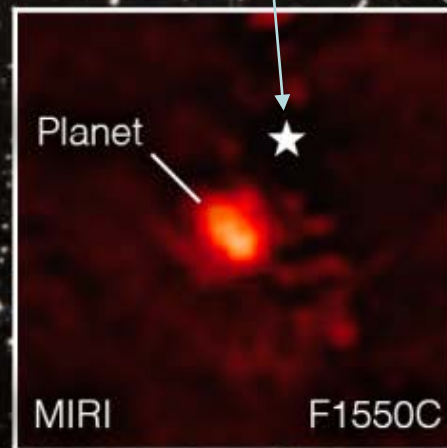
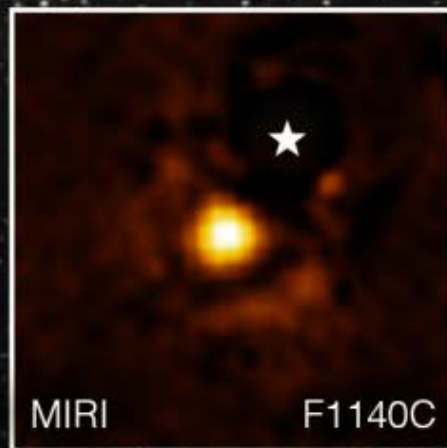
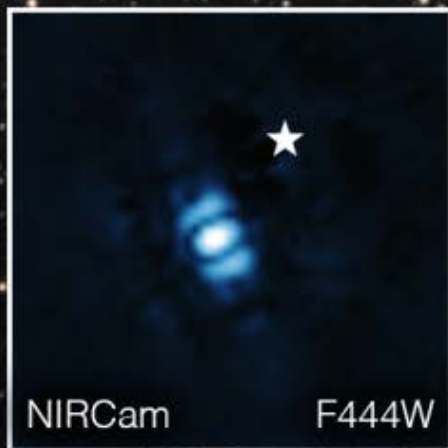
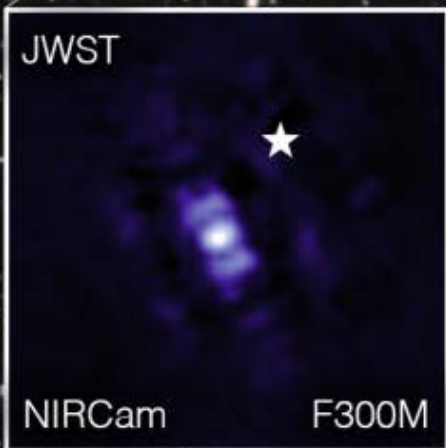
2020 – 1. snímek hvězdy
slunečního typu s planetami

JWST

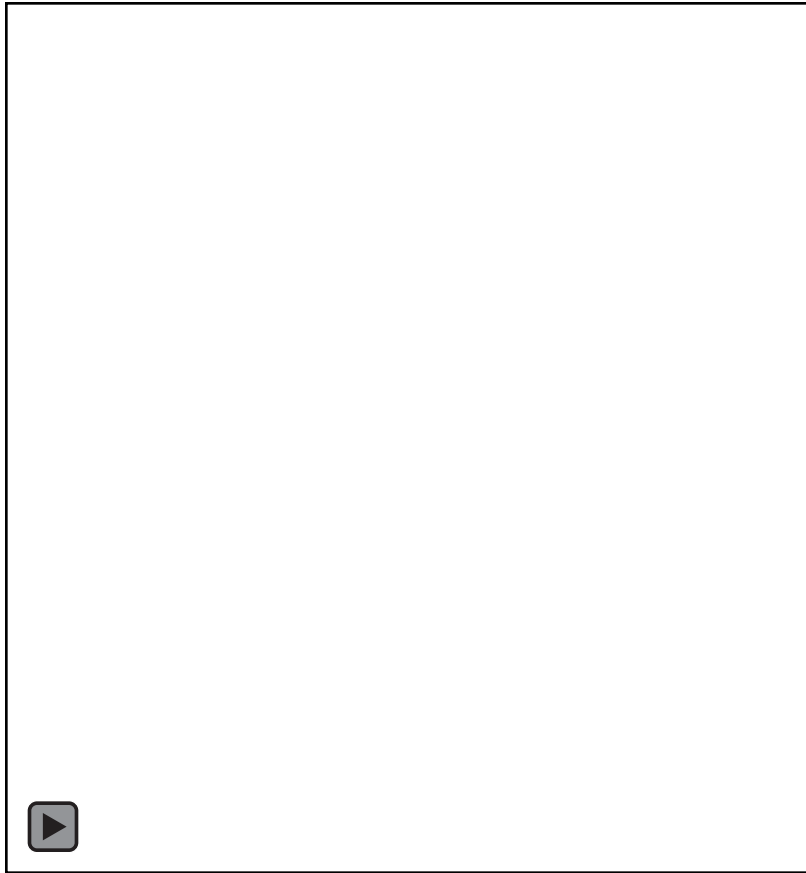
Star
HIP 65426

zakrytá
mateřská
hvězda

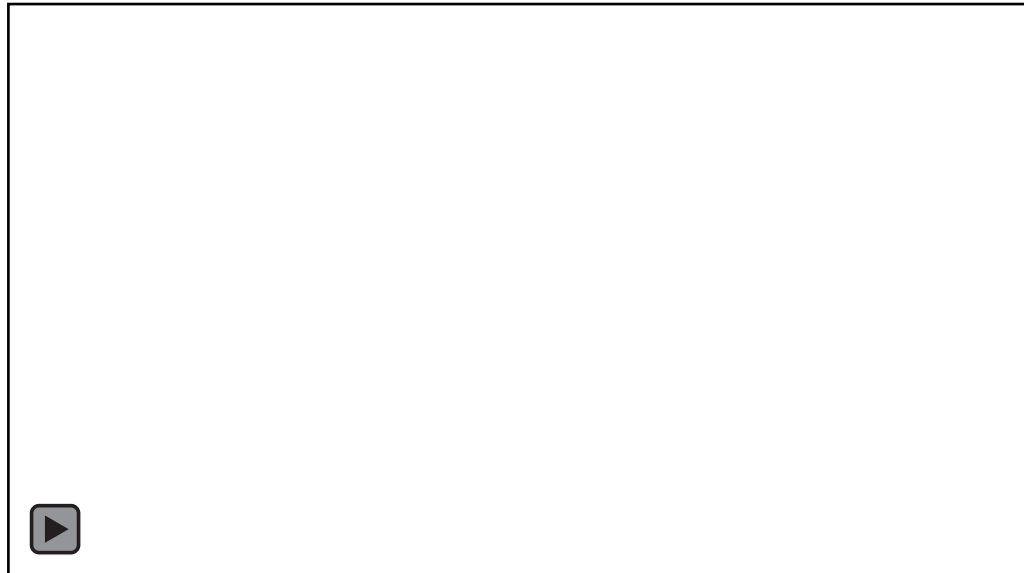
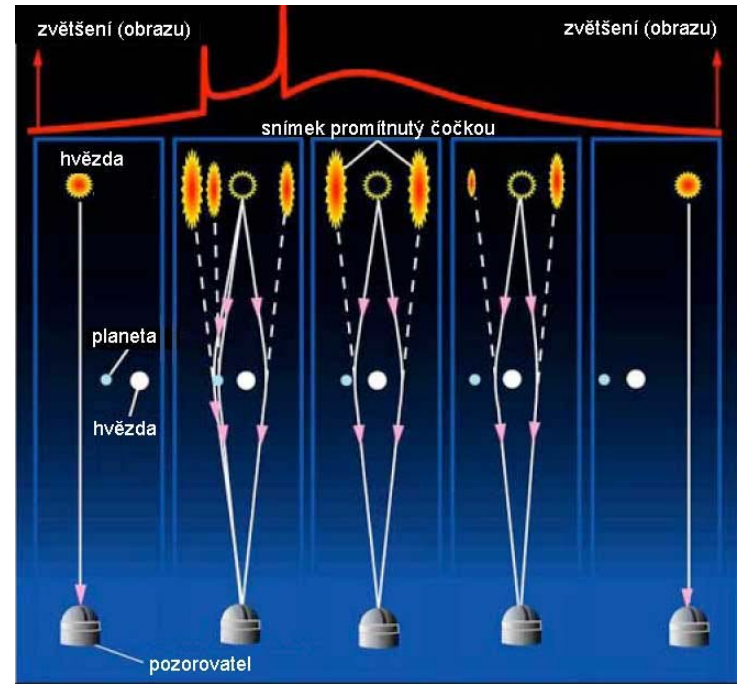
Exoplanet
HIP 65426 b



Gravitační mikročochky



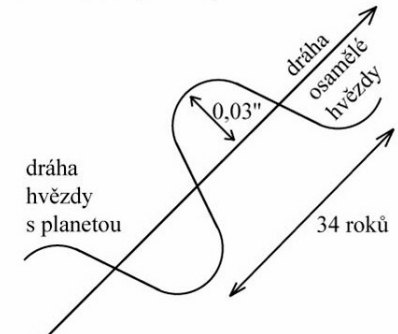
266 exoplanet, 244 soustav
(k 12. 12. 2023)



Astrometrie - sledování pohybu vytypované hvězdy na hvězdné obloze: 22 planet (12. 12. 2023)

Jupiter u hvězdy Proxima Centauri obíhající ve vzdálenosti 780 milionů kilometrů

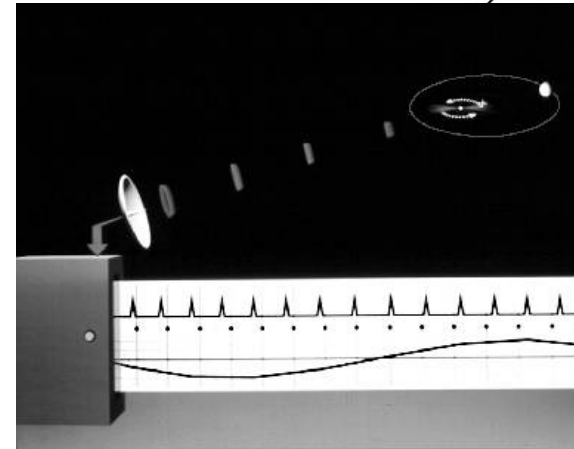
Změna polohy hvězdy:



Timing - 49 exoplanet (12. 12. 2023)

Pulsar - anomálie v pulzech pulzarů

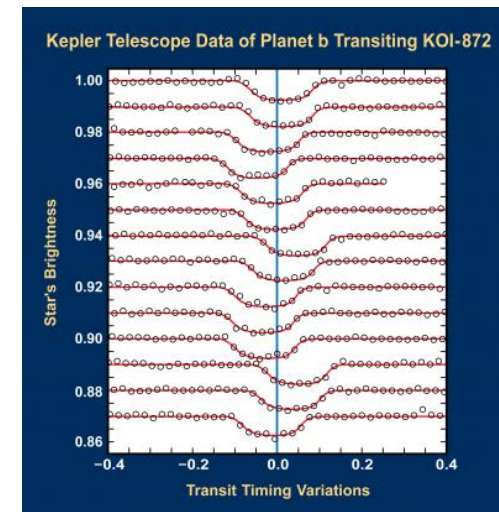
Proměnné hvězdy – odchylky pravidelných změn periodicky proměnné hvězdy



Transit timing variation method (TTV)

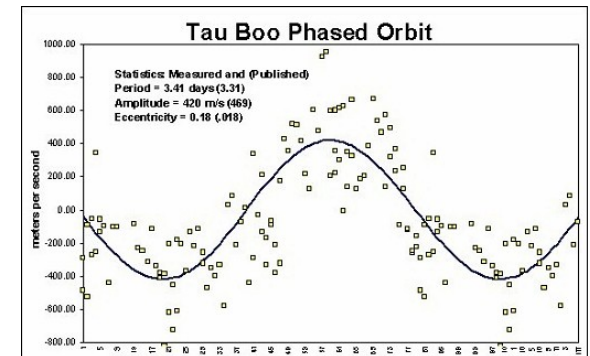
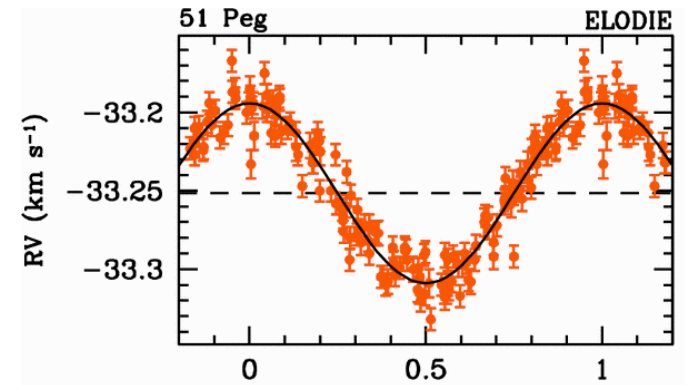
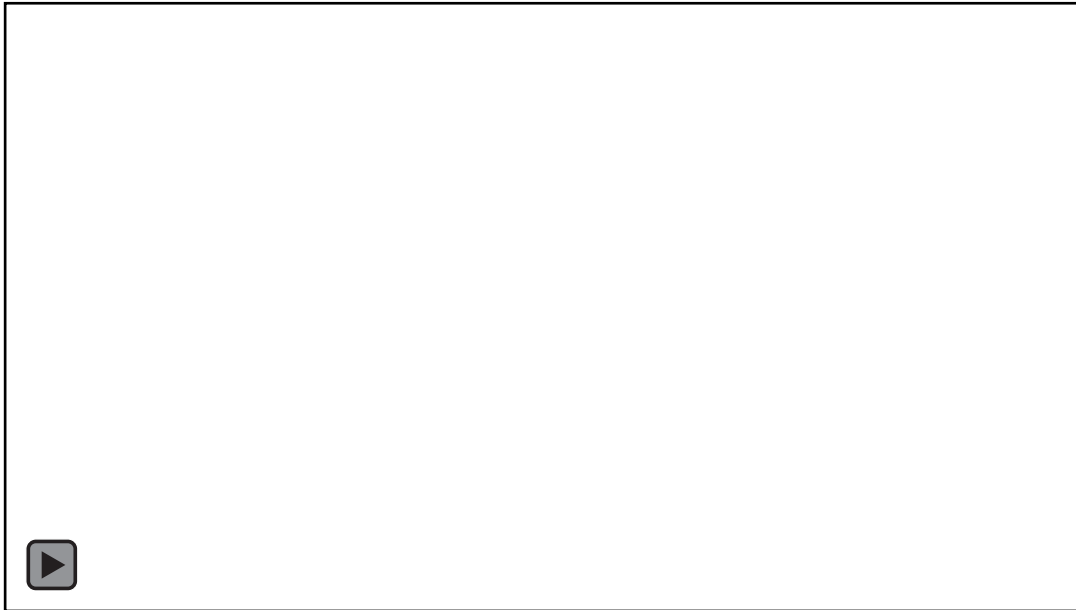
= změny okamžiků středů transitů;

- u transituující 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 12. 12. 2023 29 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 (12. 12. 2023) – 1082 planet, 811 planetárních soustav



Transity

- pozorování přechodu exoplanety před mateřskou hvězdou;
- nyní nejúspěšnější metoda - 3844 exoplanet, 2902 soustav, 608 soustav s více planetami (12. 12. 2023)
- program se zapojením amatérů a menších dalekohledů
- KEPLER, COROT, TESS, CHEOPS

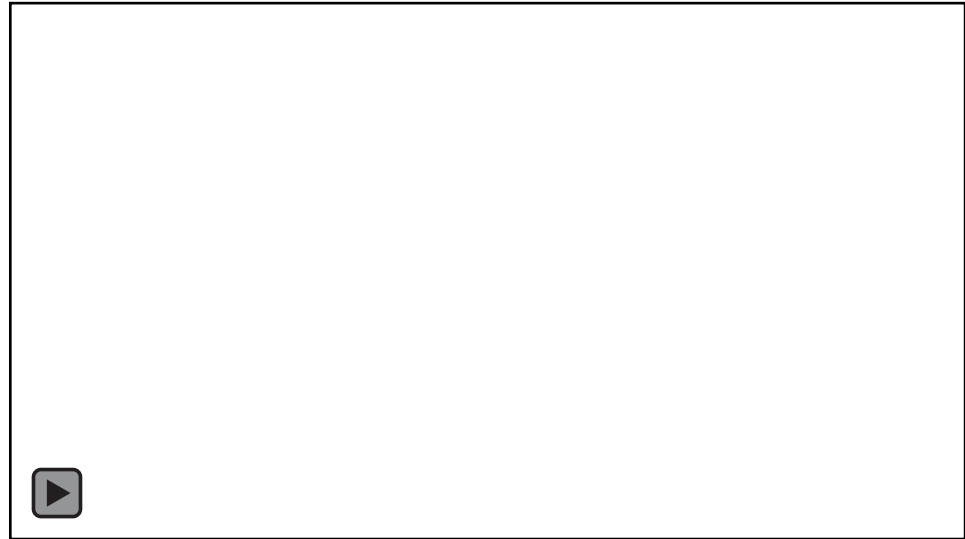
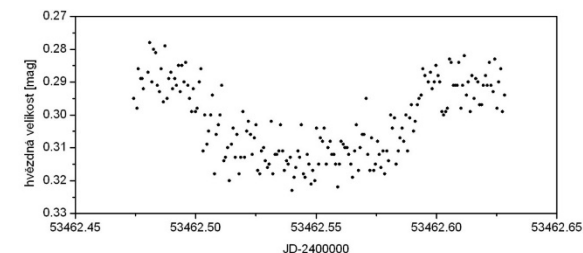
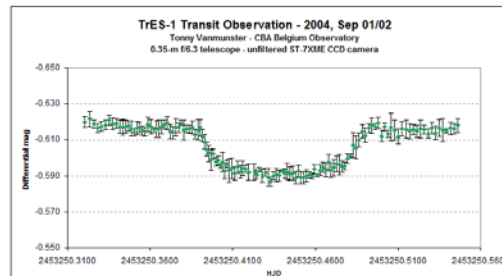
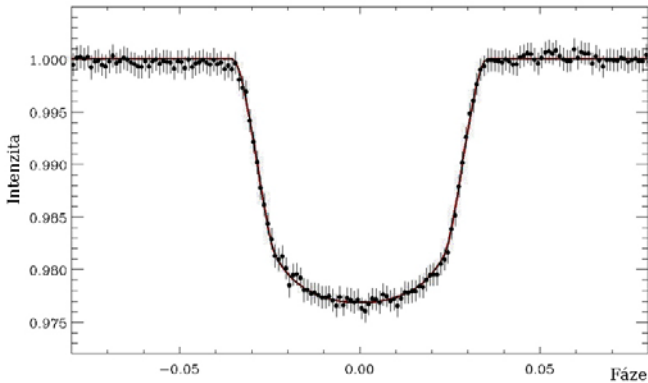
HAT = *Hungarian-made Automated Telescope*

TrES = *The Transatlantic Exoplanet Survey*

WASP = *The Wide Area Search for Planets*

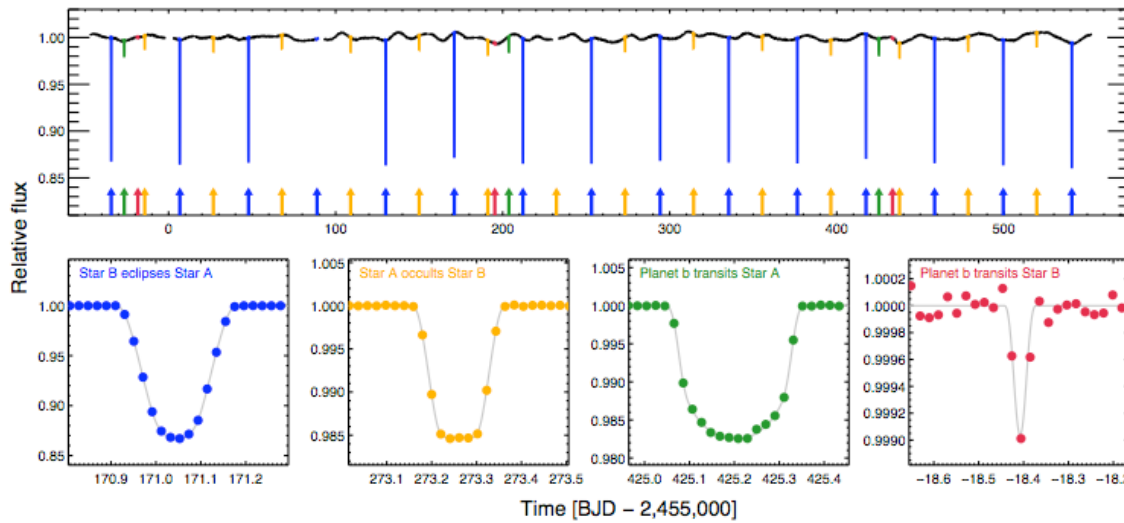
NGTS = *Next-Generation Transit Survey*

XO, TRAPPIST, MASCARA aj.

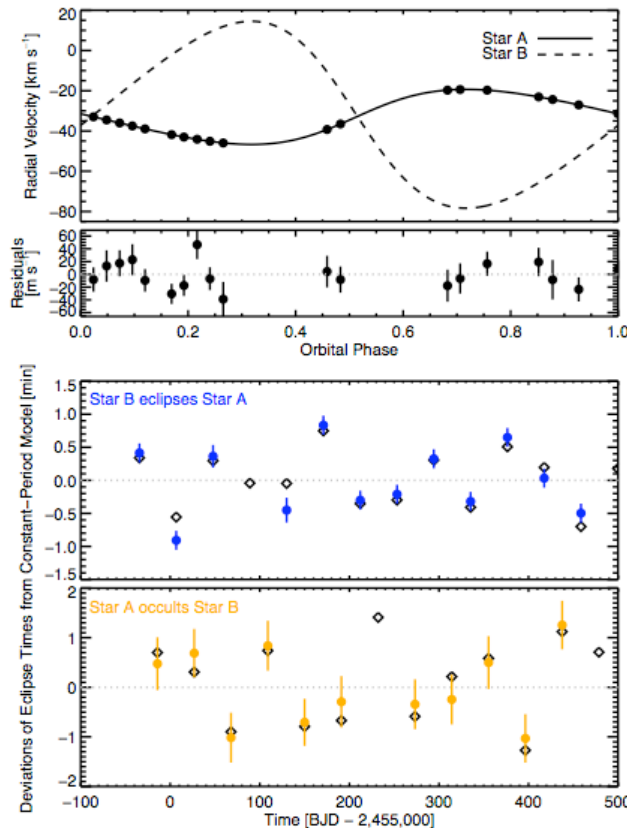
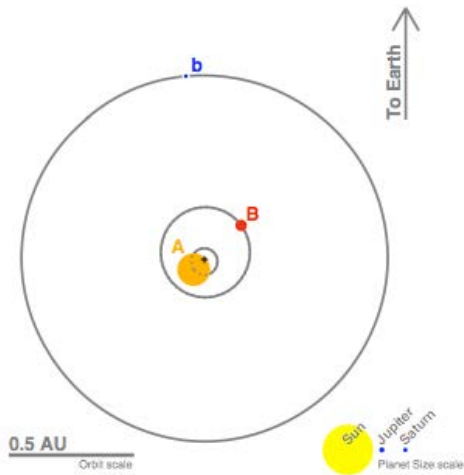


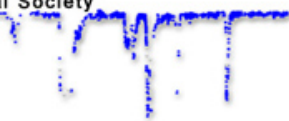
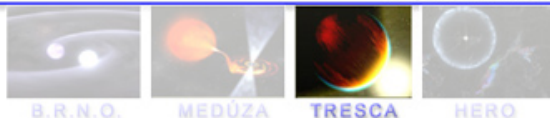
Transit duration variation method (TDV)

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: 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

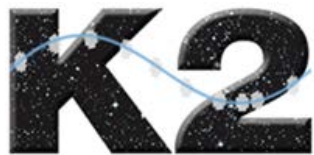


2006-2013 - COROT (Convection, Rotation and planetary Transits) na oběžné dráze družice (33 exoplanet a cca 600 kandidátů),



2009-2014 - družice Kepler – (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).

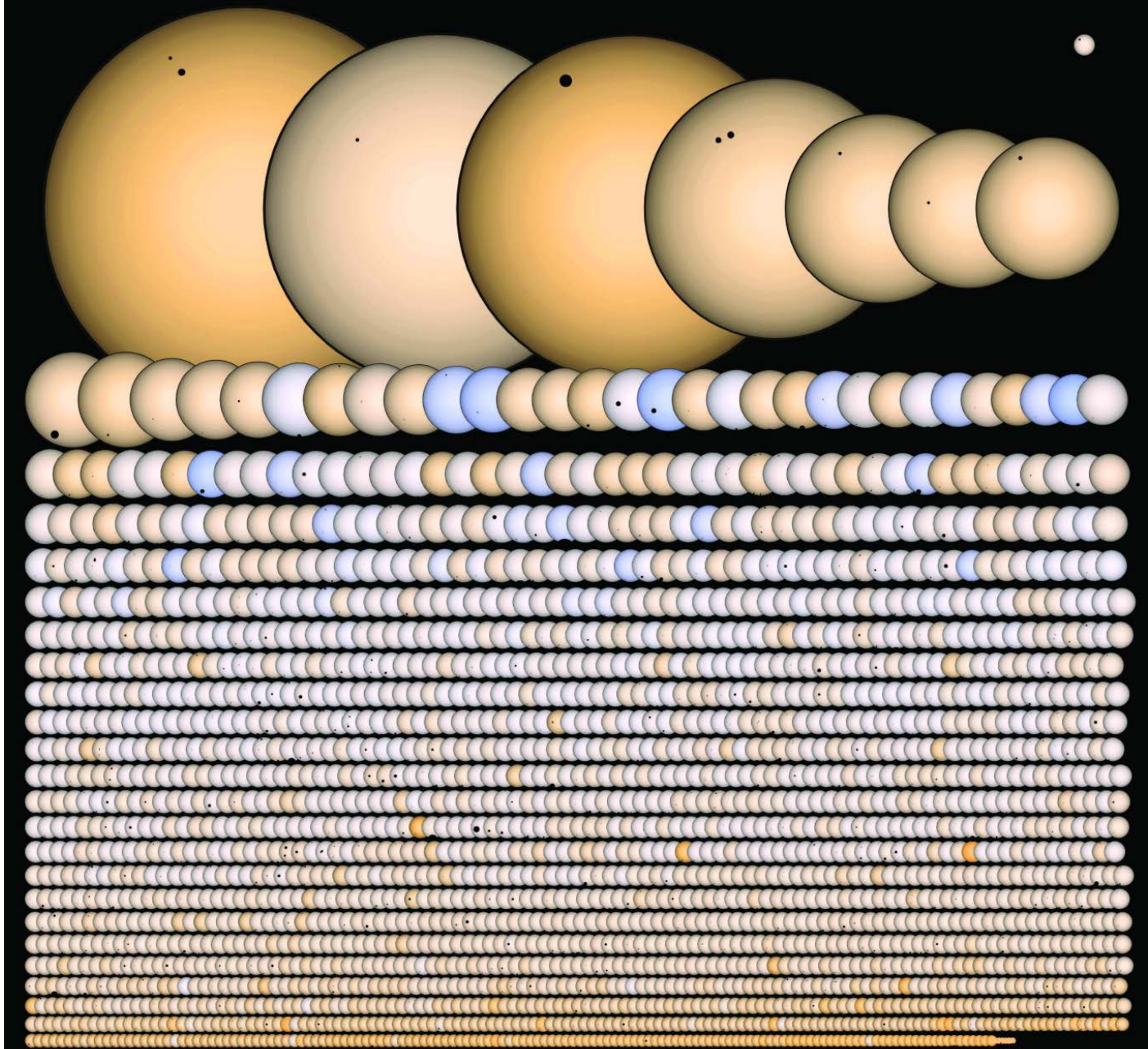
TESS (od 2018) – 410 potvrzených exoplanet, 6996 kandidátů (12.12. 2023)

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



Další projekty: CHEOPS (2019), PLATO (2026), Twinkle (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

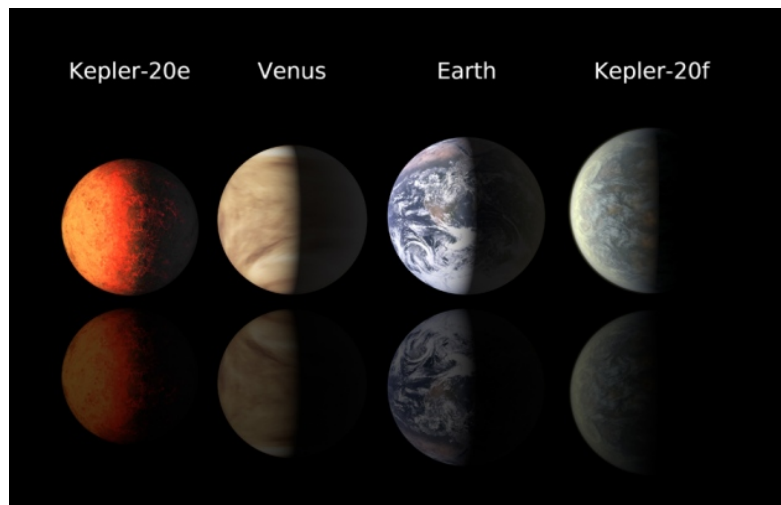
obíhají kolem dvojhvězdy (190 k 12.12. 2023) https://exoplanet.eu/planets_binary/
dnes i ve vícenásobných soustavách

2013 – 1. odhad počtu exoplanet z pozorování

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

2015 - KIC 8462852 (Tabbyina nebo Boyajianová hvězda)

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



Keplerův orloj IV



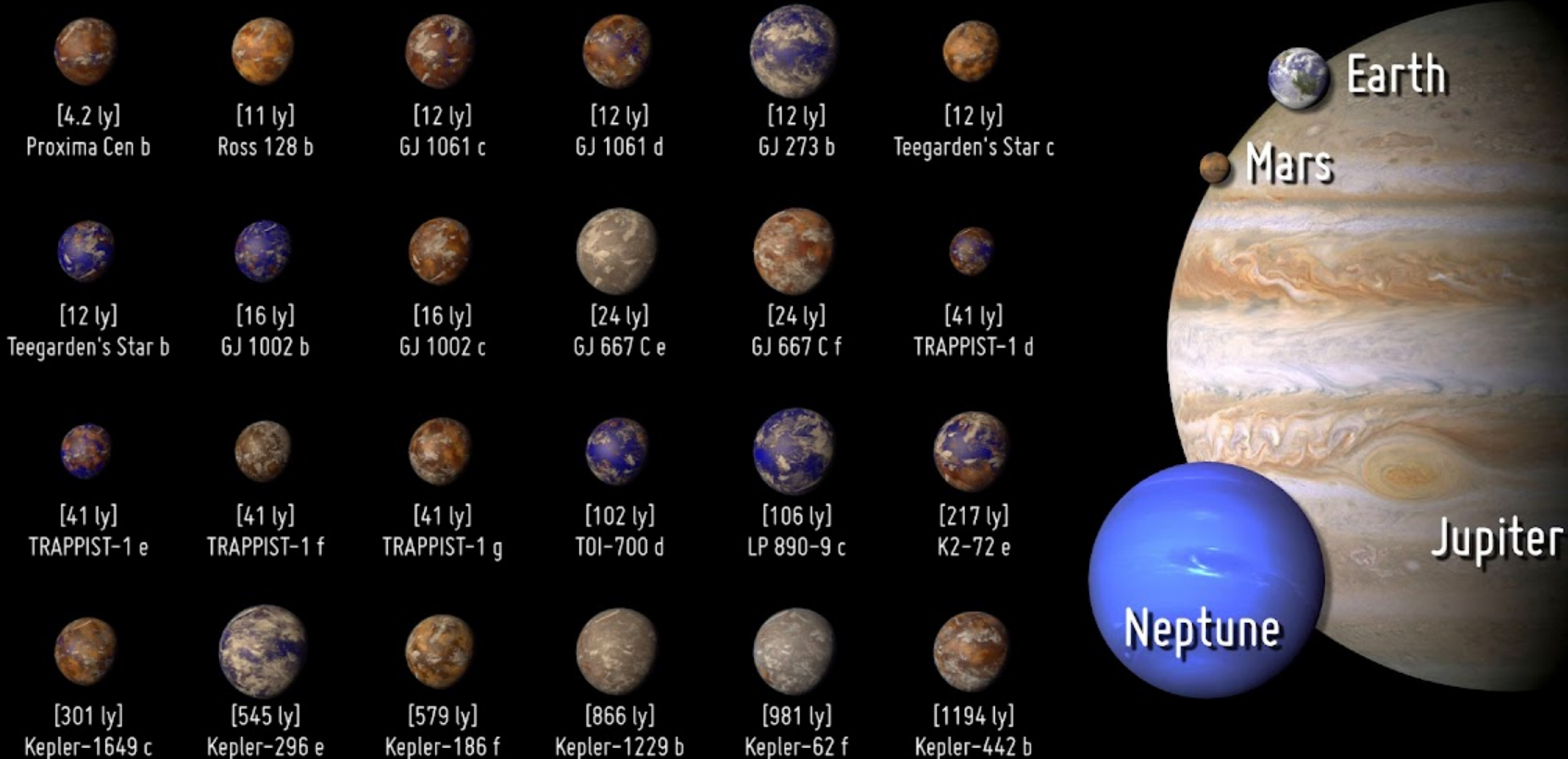
63 exoplanet v zónách života (12.12. 2023)

1 exomars, 23 exozemí, 39 superzemí [katalog](#)



Potentially Habitable Exoplanets

Sorted by Distance from Earth



Artistic representations. Earth, Mars, Jupiter, and Neptune for scale. Distance from Earth in light years (ly) is between brackets.

CREDIT: PHL @ UPR Arcibo (phl.upr.edu) Jan 5, 2023

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

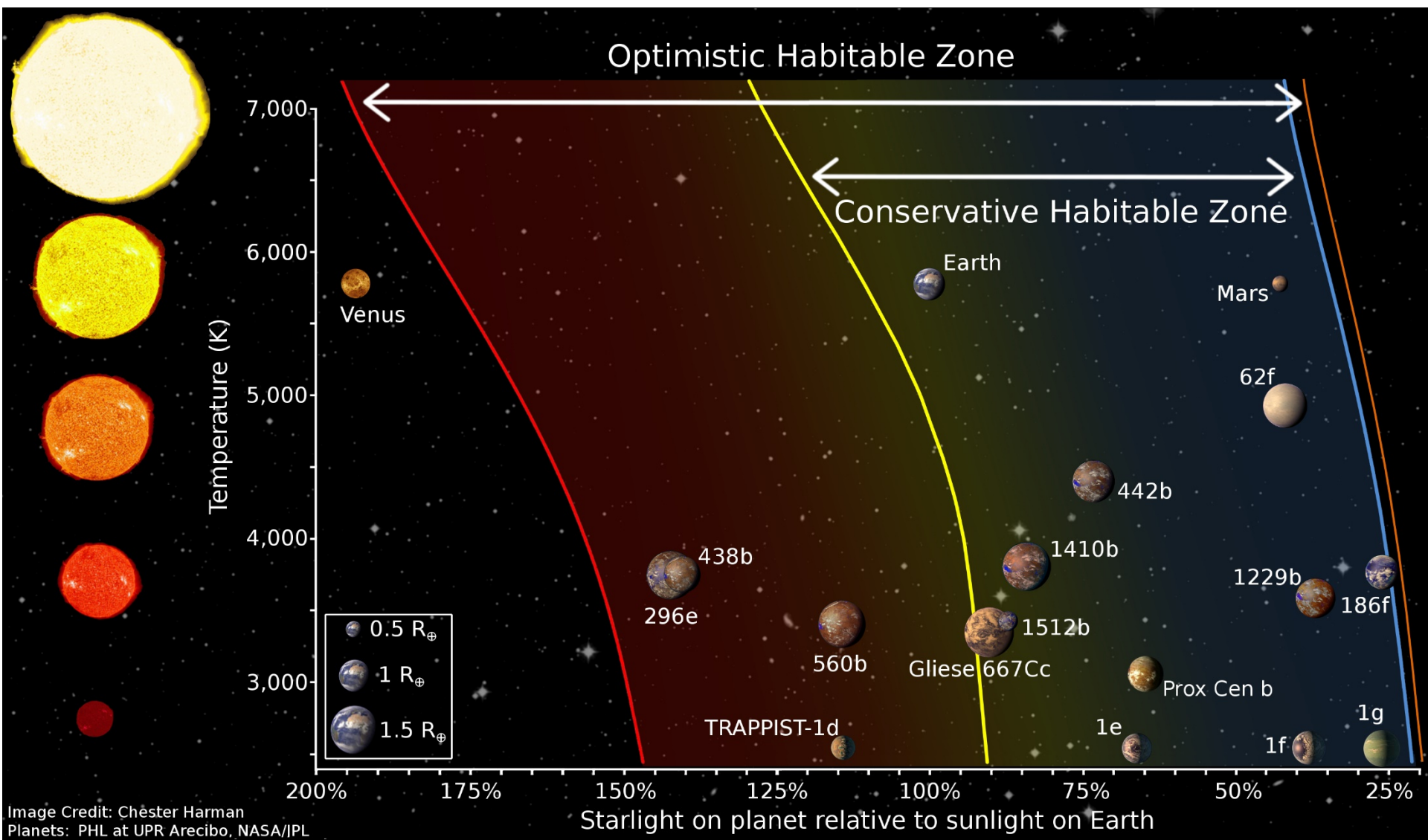
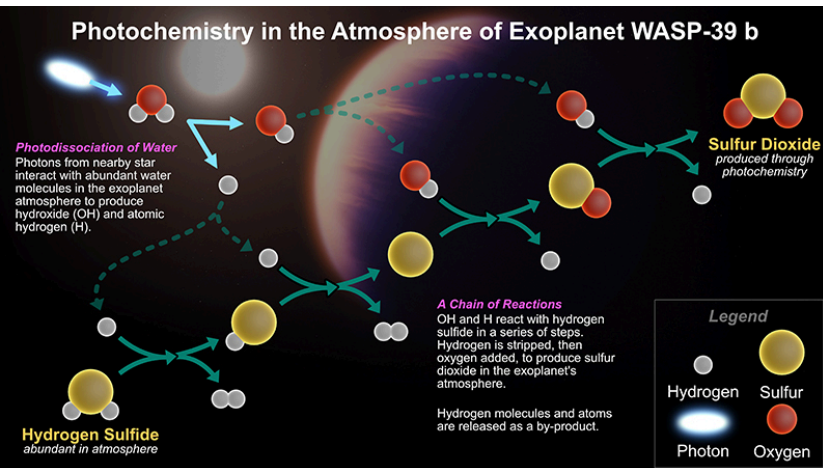
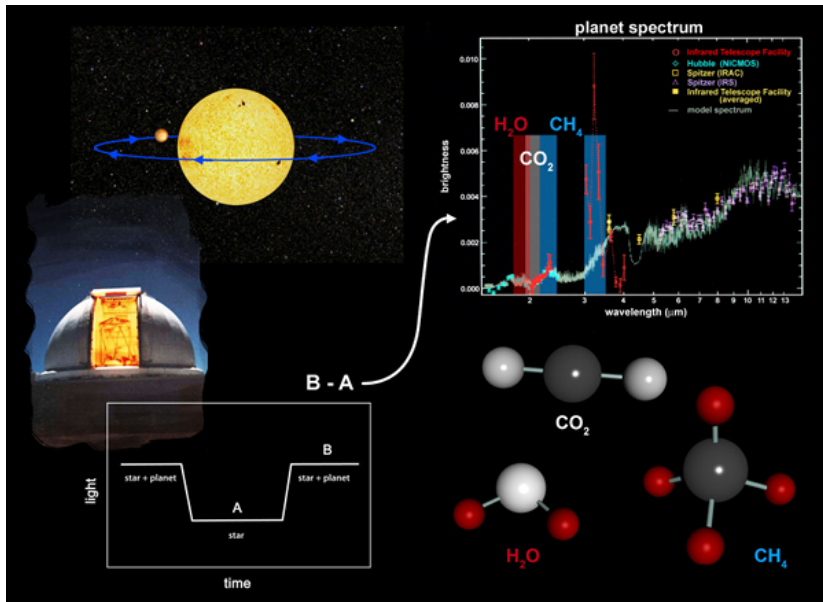


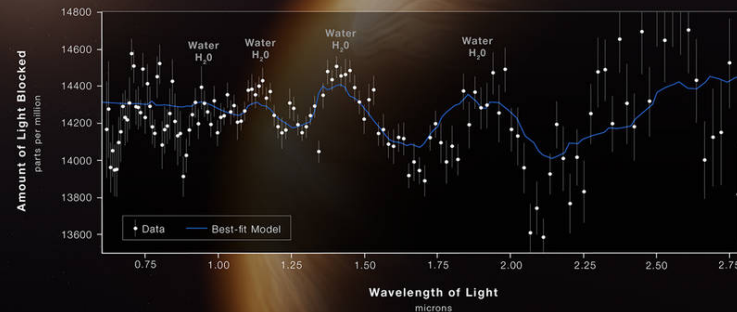
Image Credit: Chester Harman
Planets: PHL at UPR Arcibo, NASA/IPL

Atmosféry exoplanet



HOT GAS GIANT EXOPLANET WASP-96 b ATMOSPHERE COMPOSITION

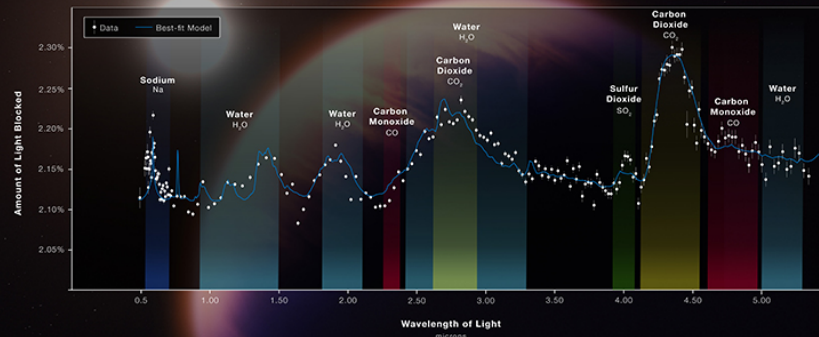
NIRISS | Single-Object Slitless Spectroscopy



WEBB
SPACE TELESCOPE

HOT GAS GIANT EXOPLANET WASP-39 b ATMOSPHERE COMPOSITION

NIRSpec PRISM



WEBB
SPACE TELESCOPE

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:

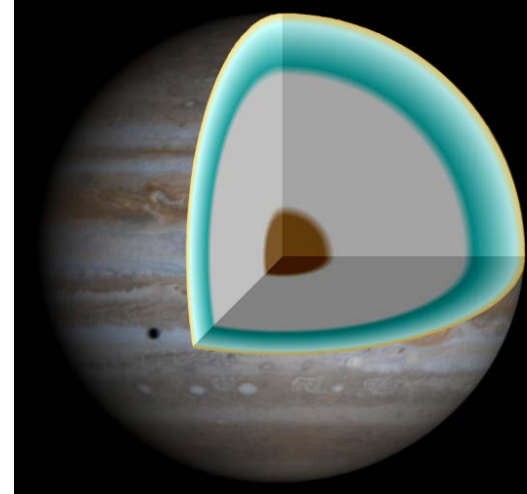
tři hlavní části (podle hustoty): *kůra, plášť a jádro*.

zárodečná látka v místě vzniku planety

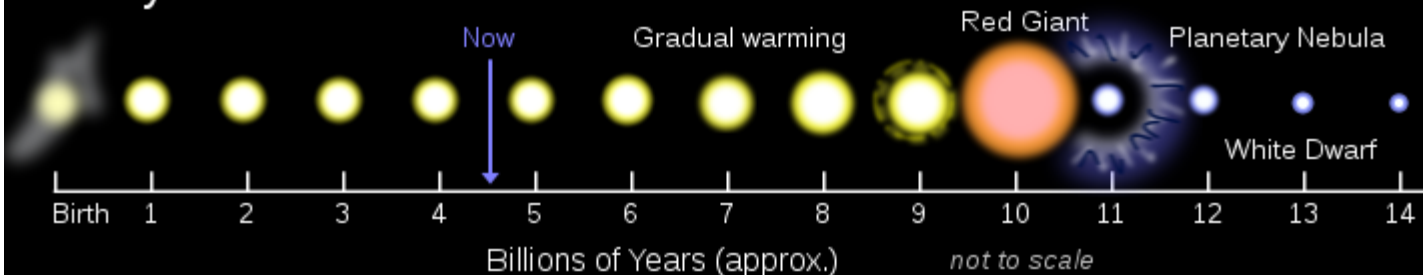
víceméně stejnorodá -> smršťování -> zahřátí -> rozčlenění látky dle hustot (*diferenciaci látky*) - před asi 4,5 miliardy roků.

zdroje energie planety

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



Life Cycle of the Sun



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.





Záliv rosy

Moře chladu

Moře Humboltovo

Moře deště

Alpy

Kavkaz

Apenniny

Ocean bouří

Grimaldi

Moře okraje

Moře Smythovo

Schickard

Plato

Aristoteles

Atlas

Jezero naděje

Záliv duh

M. Pico

Eudoxus

Hercules

Franklin

M. Piton

Aristillus

Autolycus

Posidonius

Aristarchus

Archimedes

Timocharis

Moře jasů

Moře nepokojů

Reiner Gamma

Eratosthenes

Moře par

Plinius

Moře klidu

Bazína spánku

Kepler

Copernicus

Reinhold

Lansberg

Herschel

Ptolemaeus

Alphonse

Theophilus

Cyrilus

Moře hojnosti

Langrenus

Bullialdus

Moře vláhy

Moře oblaků

Purbach

Warner

Aliacensis

Deslândres

Ticho

Magianus

Clavius

Catherina

Moře nektaru

Piccolomini

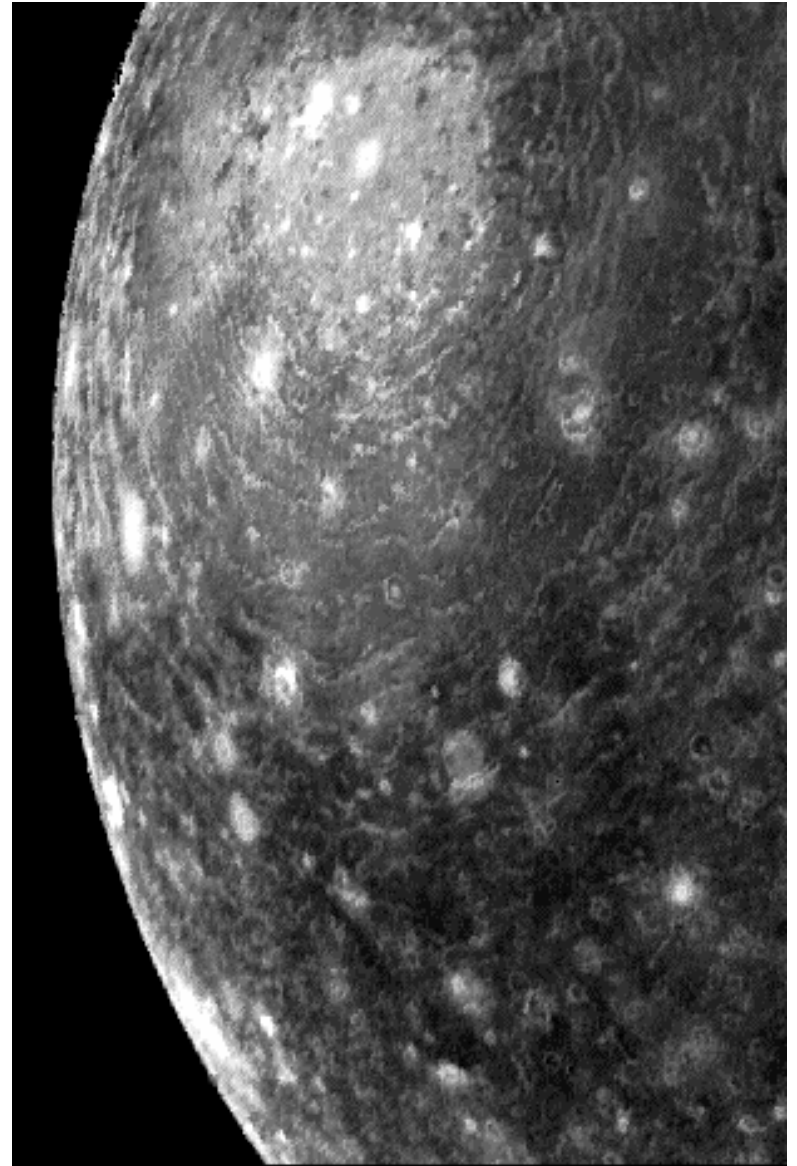
Stevinus



Mare Imbrium na Měsíci

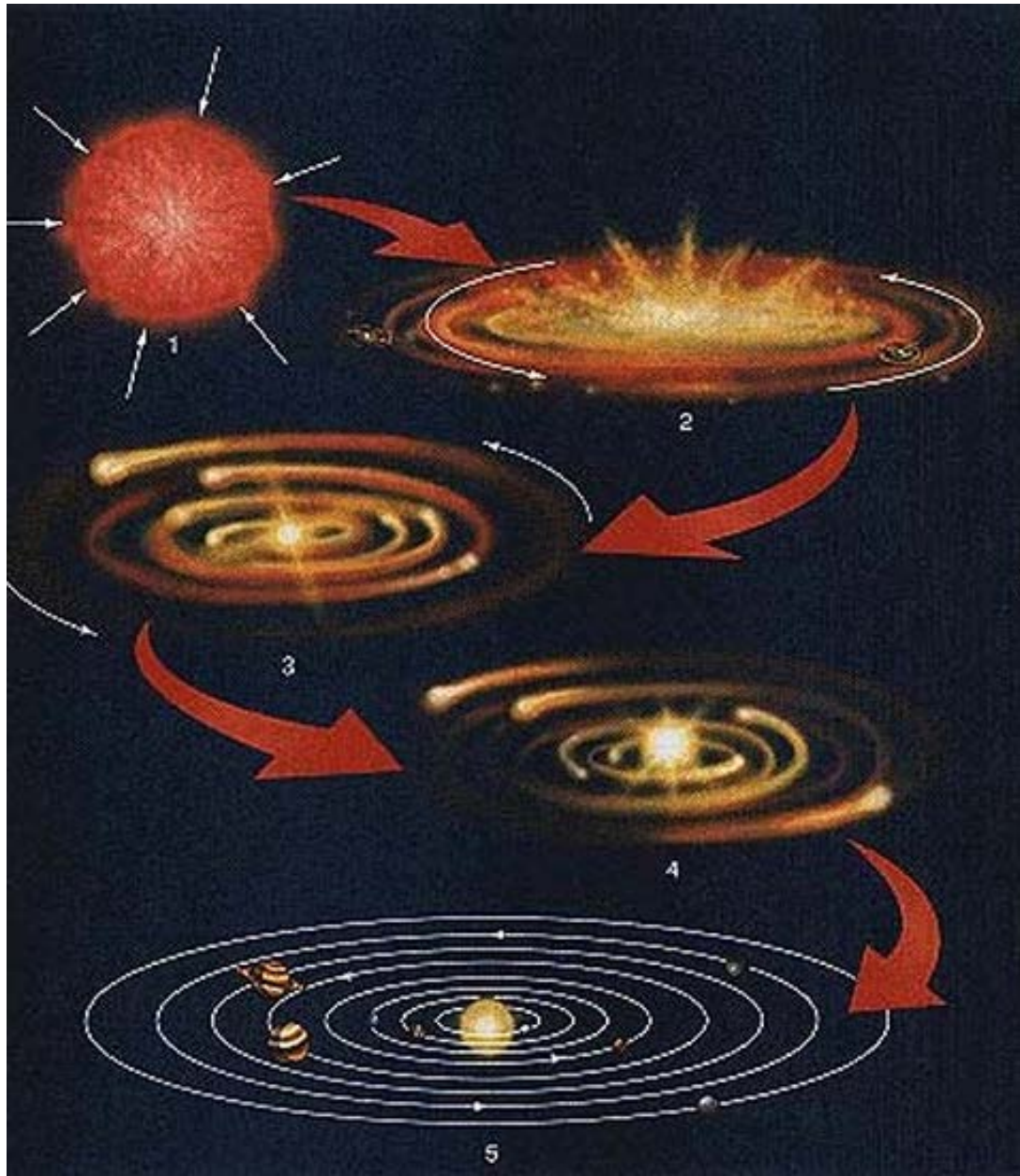


Caloris Planitia na Merkur.



Pánev Valhalla (Jupiterova družice Kallistó).

Vývojový scénář sluneční soustavy



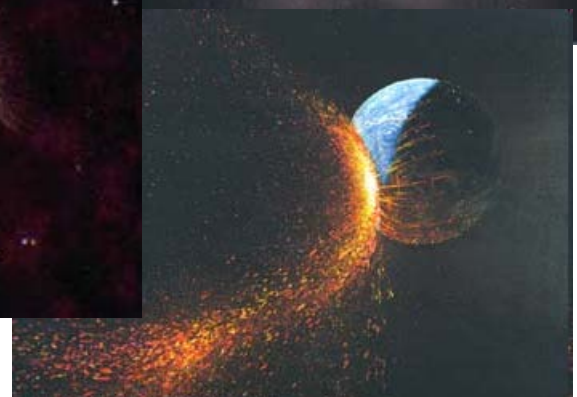
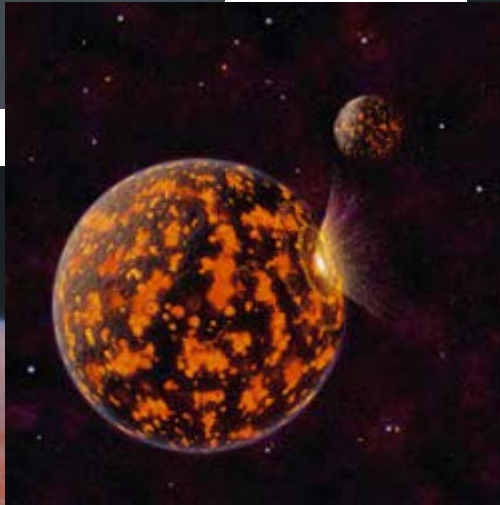
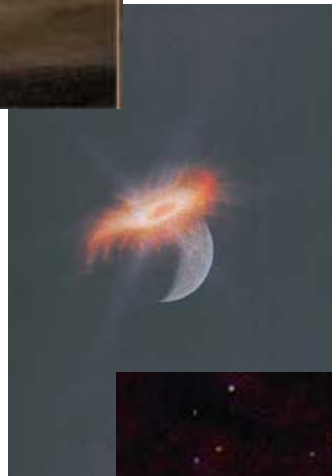
1 protoslunce

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)



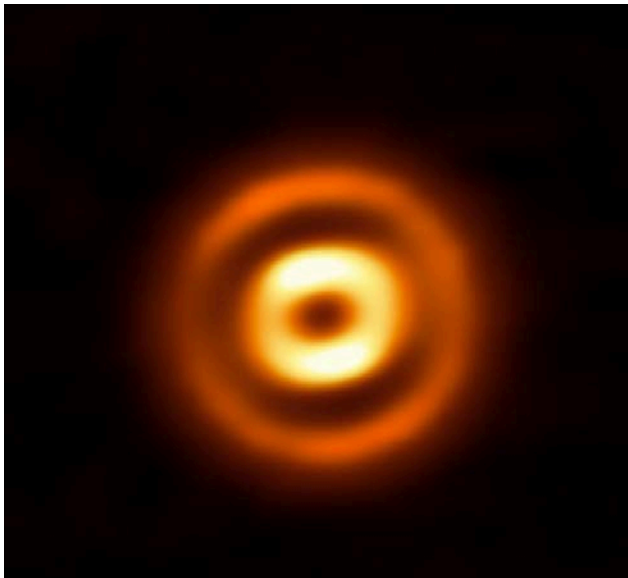
VLT,
SPHERE

HD 97048

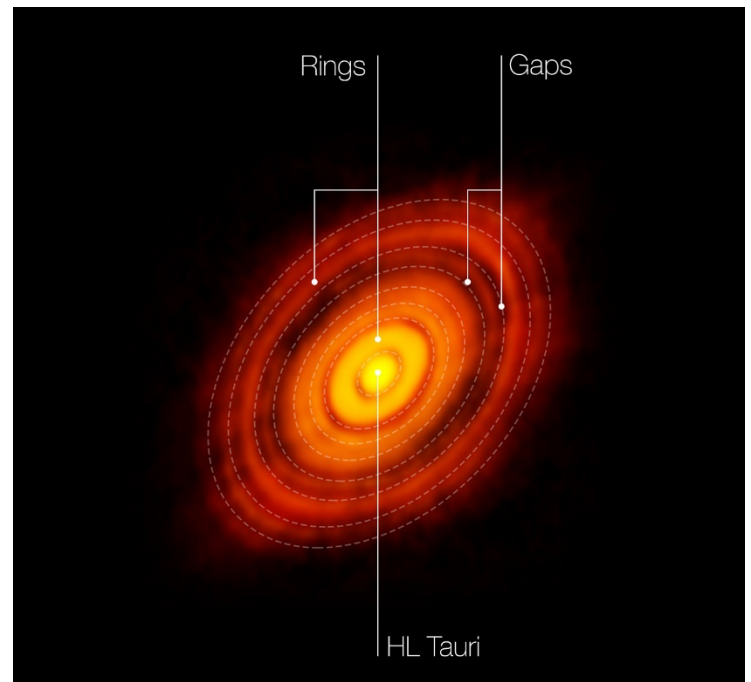
HD 135344B

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 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

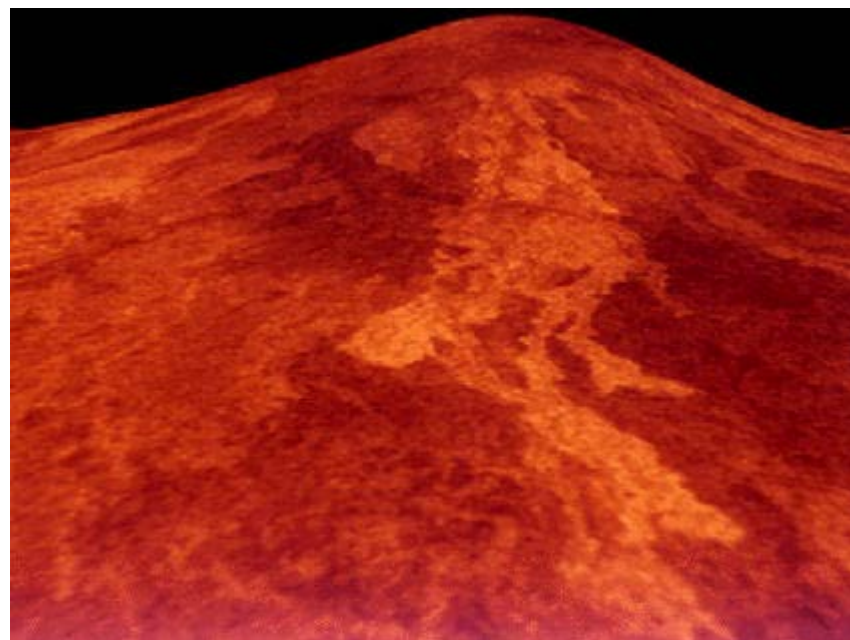
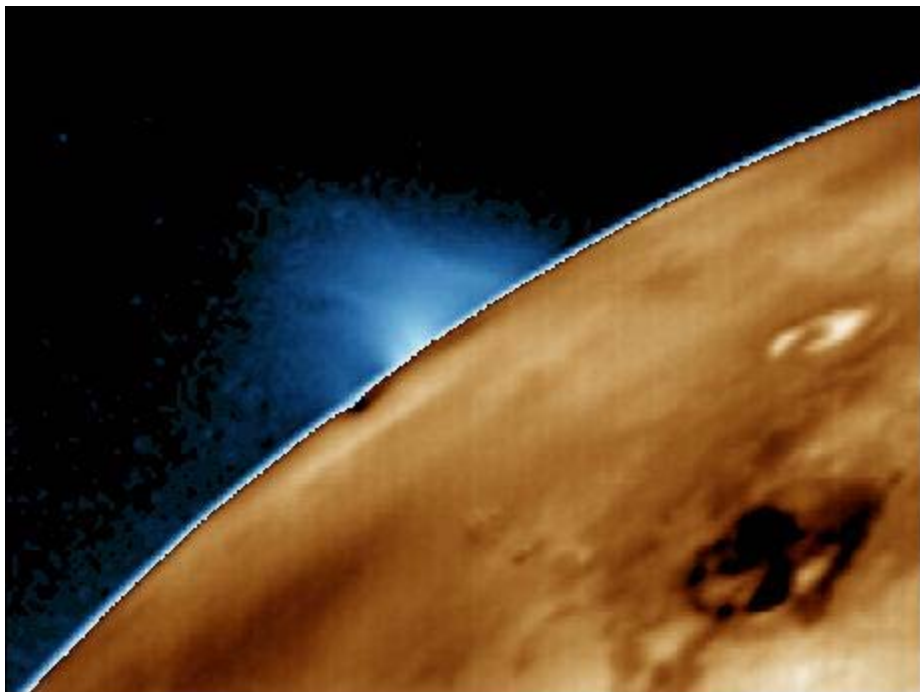
magmatismus - působení magmatu v hloubce

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)

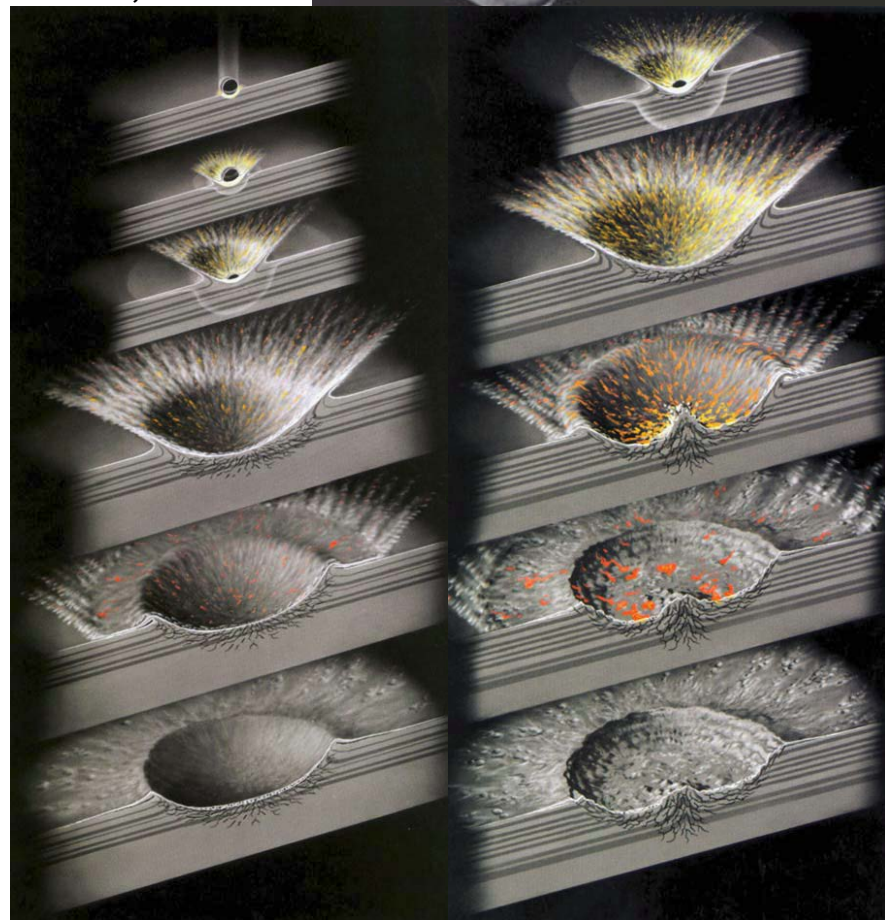
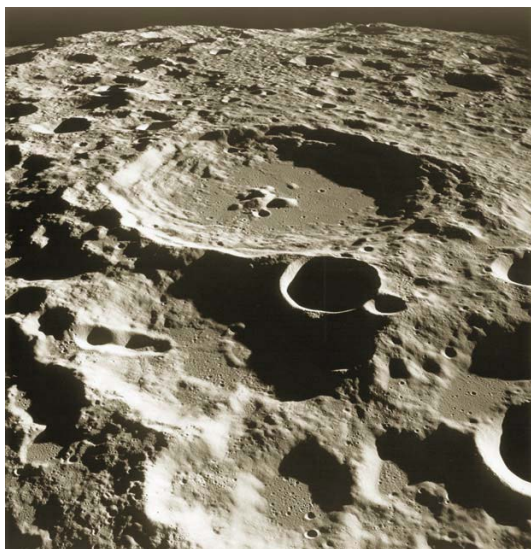
Impakty

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

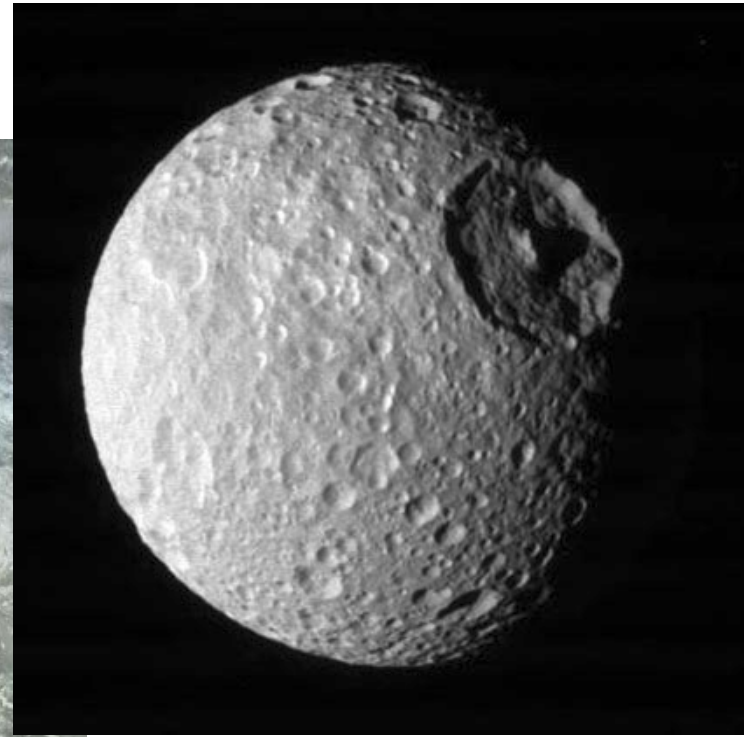
vznik zejména v době intenzivního bombardování, ale i dnes!

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.

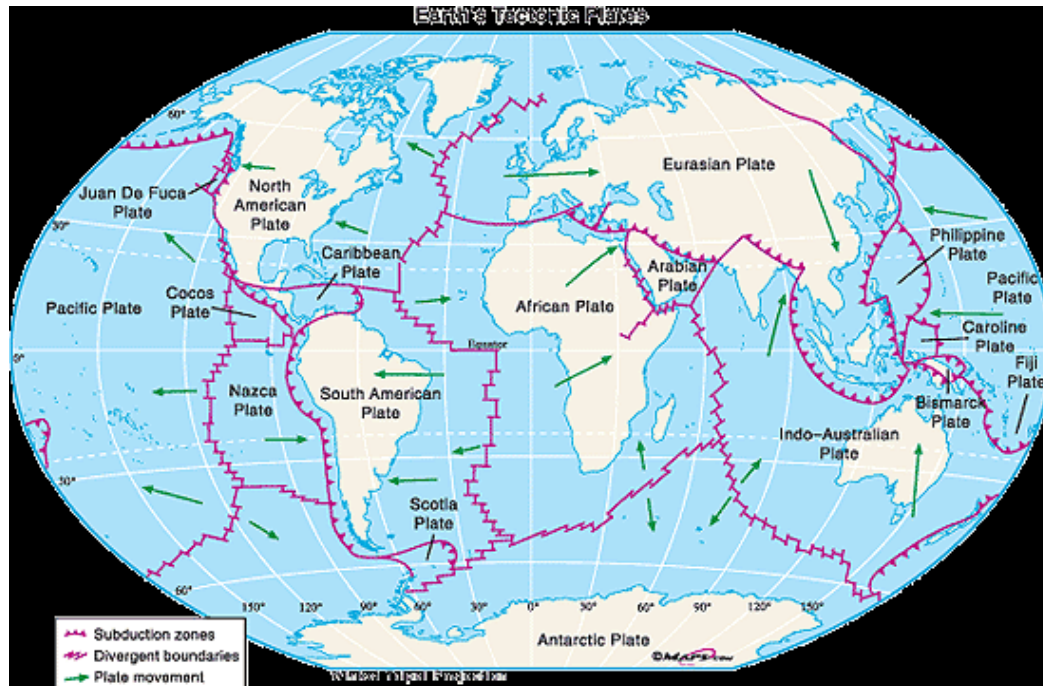
Měsíc - jednoduchá tektonika soustavy trhlin a zlomů vzniklých:

- 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:

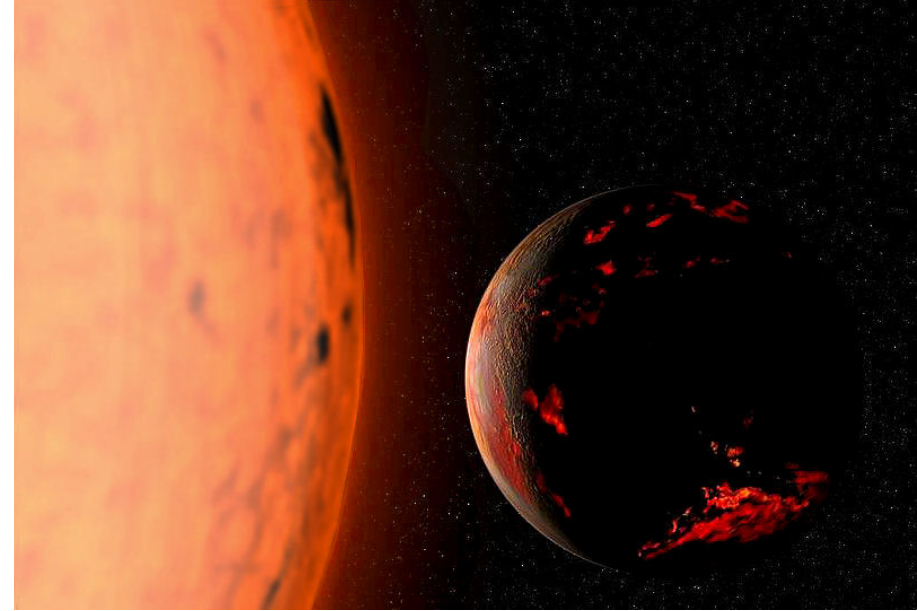
poloměr 1 au,

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!

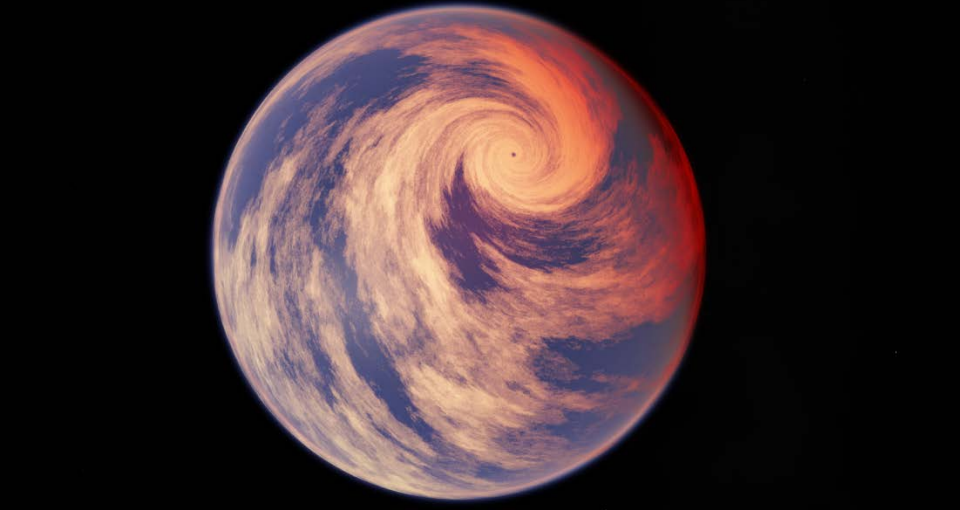




© Christoph Kulmann 1998

Země v současnosti



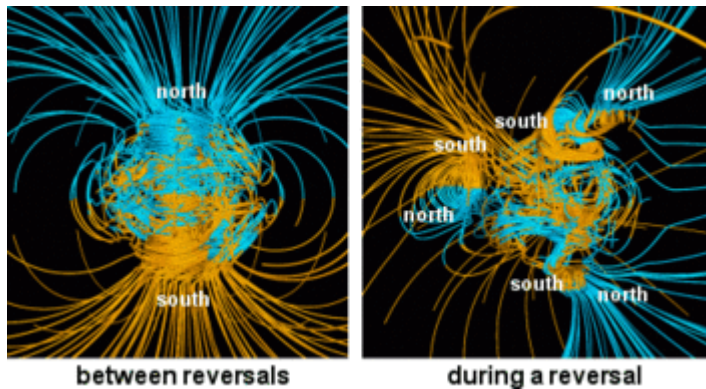


obří cyklón

dopad asteroidu



supervulkán



rychlá změna mg. pole





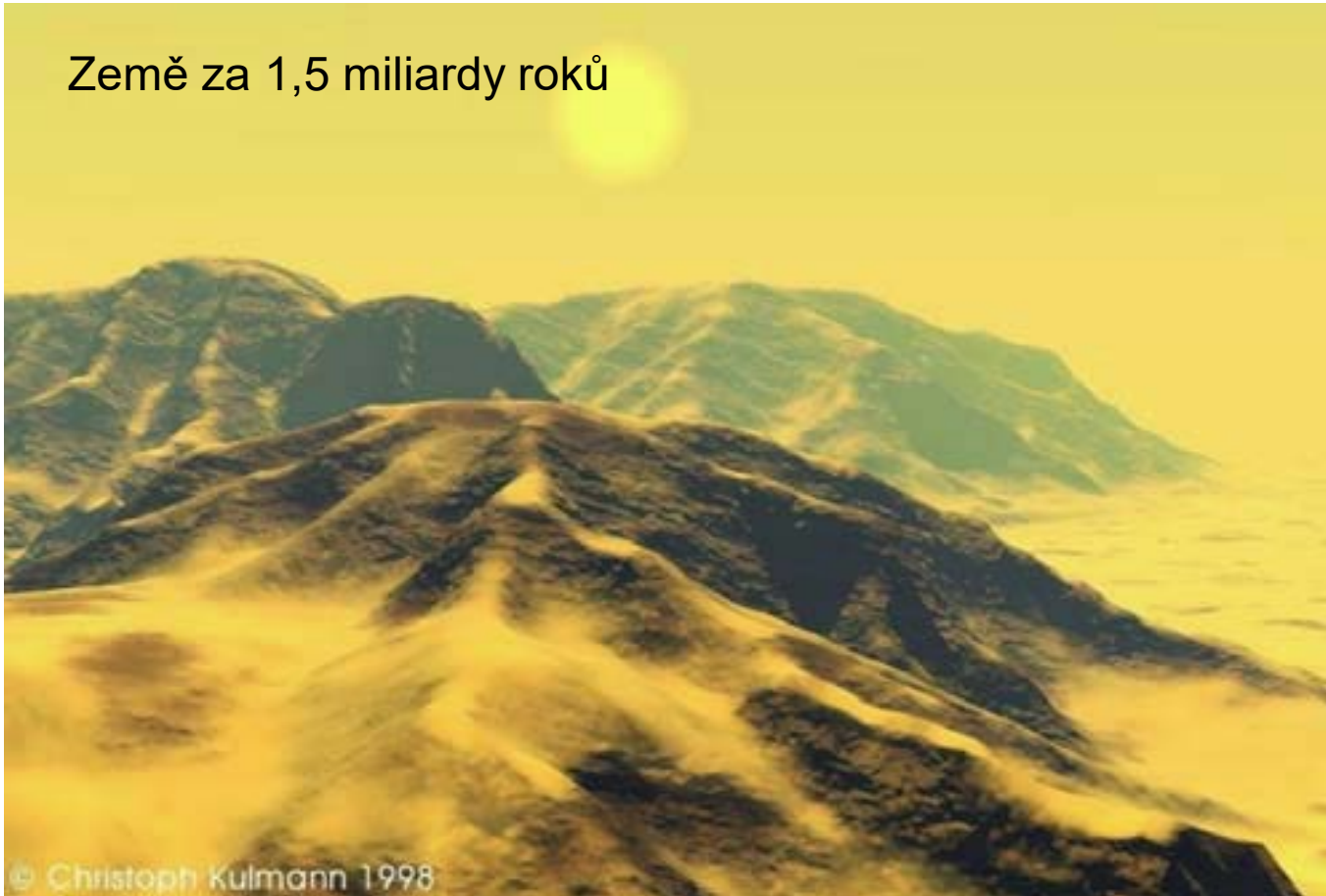
za 250 mil. let - vznik superkontinentu Pangea Ultima

Země za 700 milionů roků



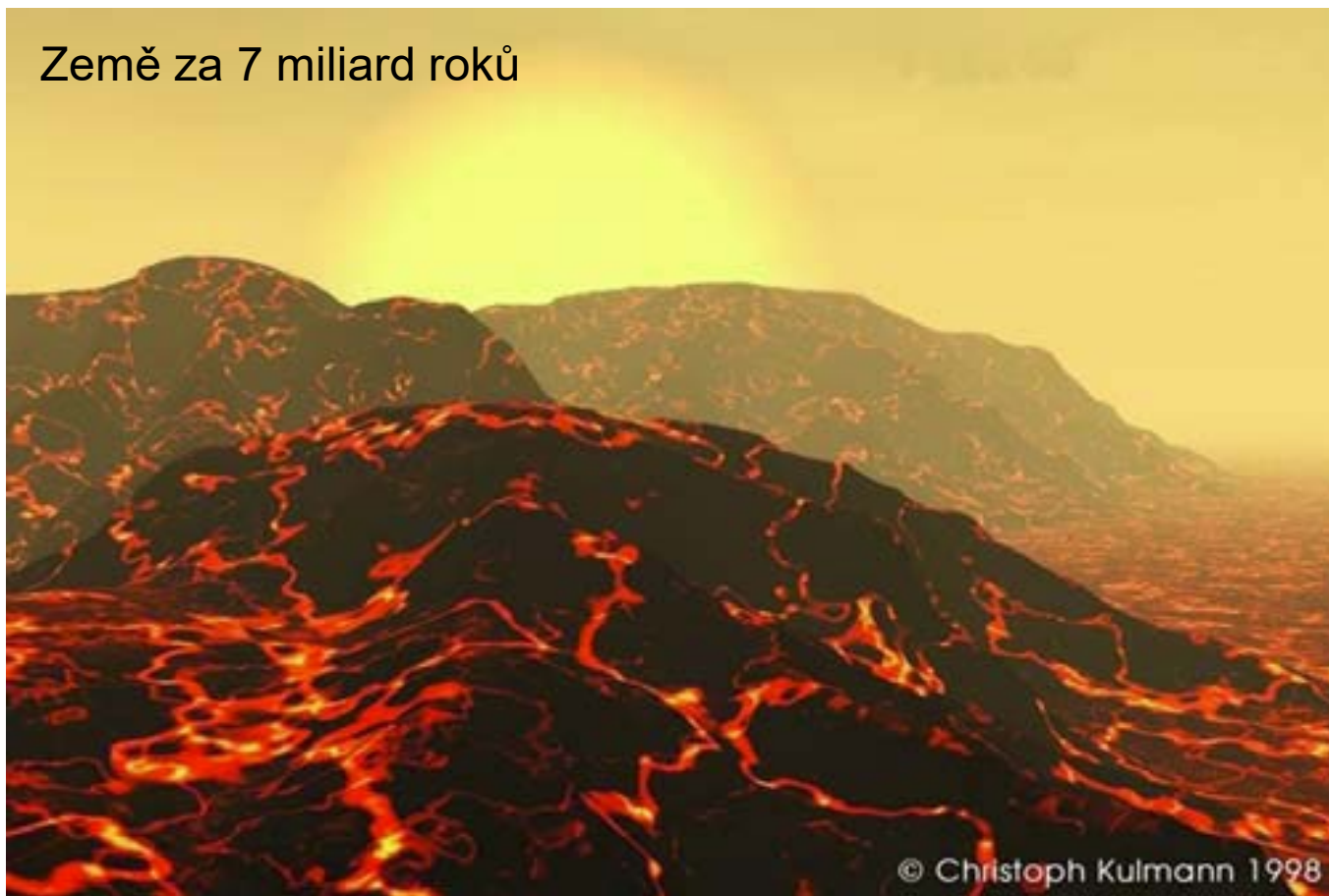
vypařování oceánů -> větší skleníkový efekt -> zvýšení teploty na 40-80°C

Země za 1,5 miliardy roků



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

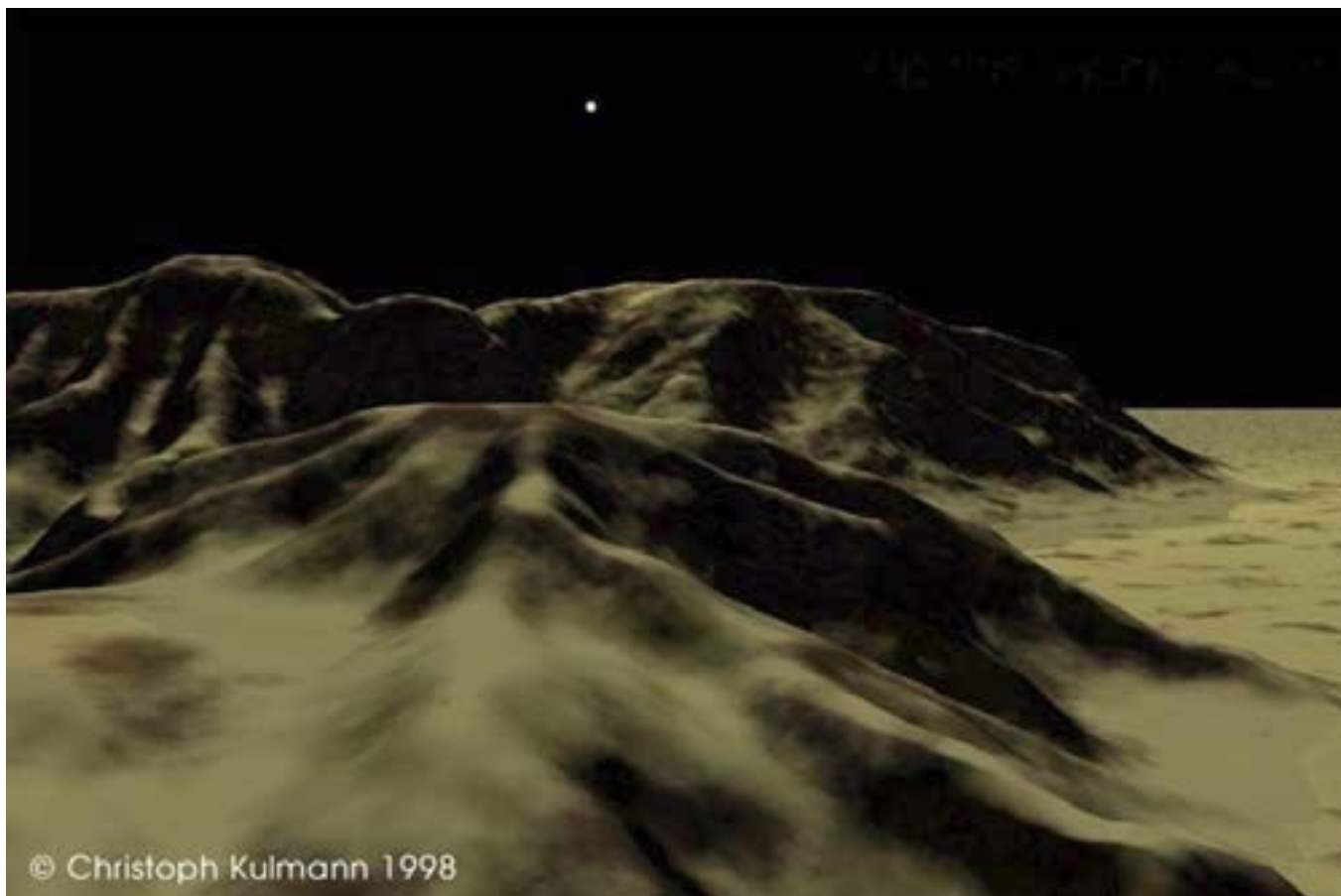
Země za 7 miliard roků



© Christoph Kulmann 1998

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!