

# F7514 Exoplanety

2-Sluneční soustava, planetární soustavy, jejich vznik a vývoj

Marek Skarka

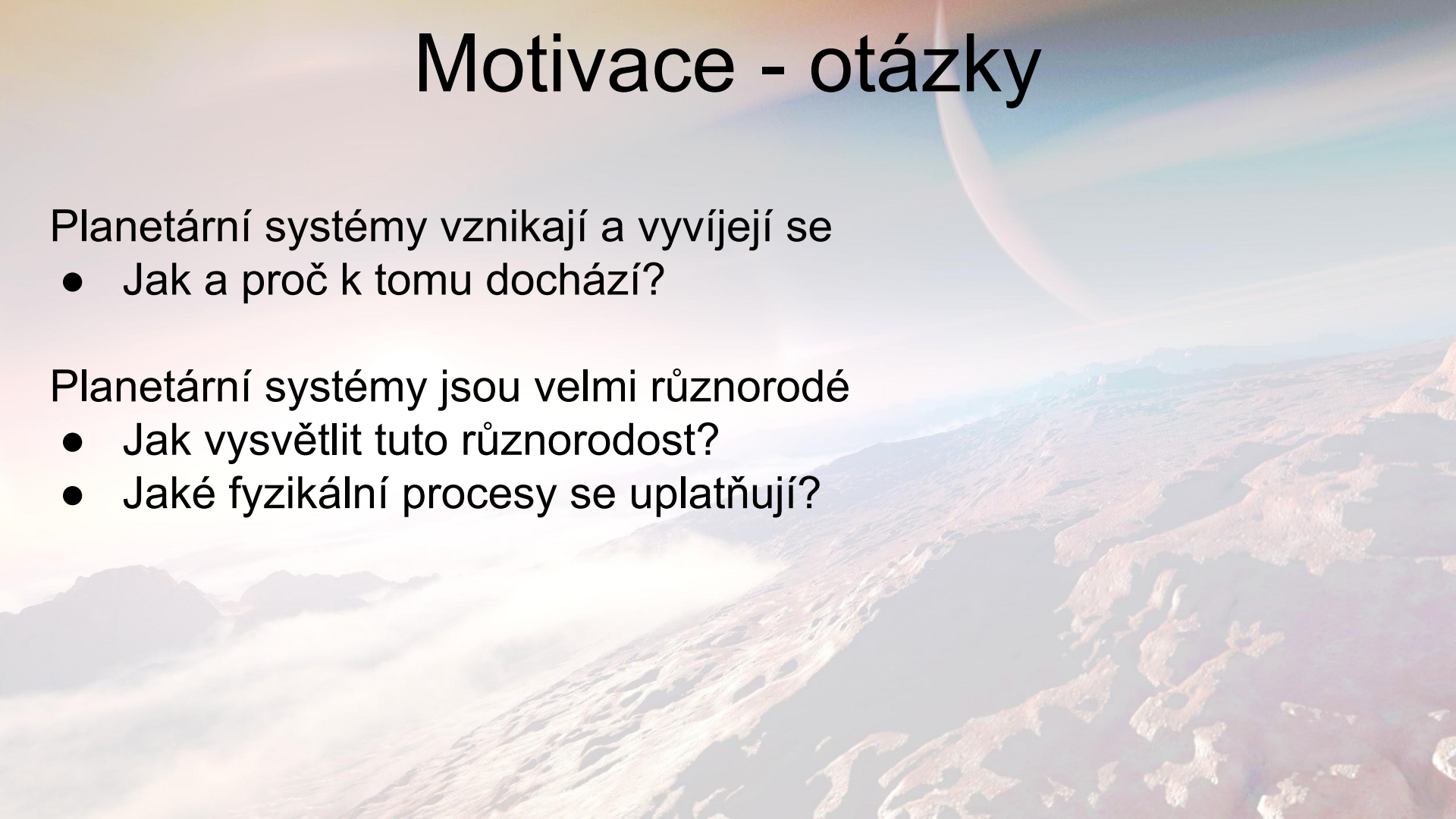
# Motivace - otázky

Planetární systémy vznikají a vyvíjejí se

- Jak a proč k tomu dochází?

Planetární systémy jsou velmi různorodé

- Jak vysvětlit tuto různorodost?
- Jaké fyzikální procesy se uplatňují?



# Motivace - otázky

Planetární systémy vznikají a vyvíjejí se

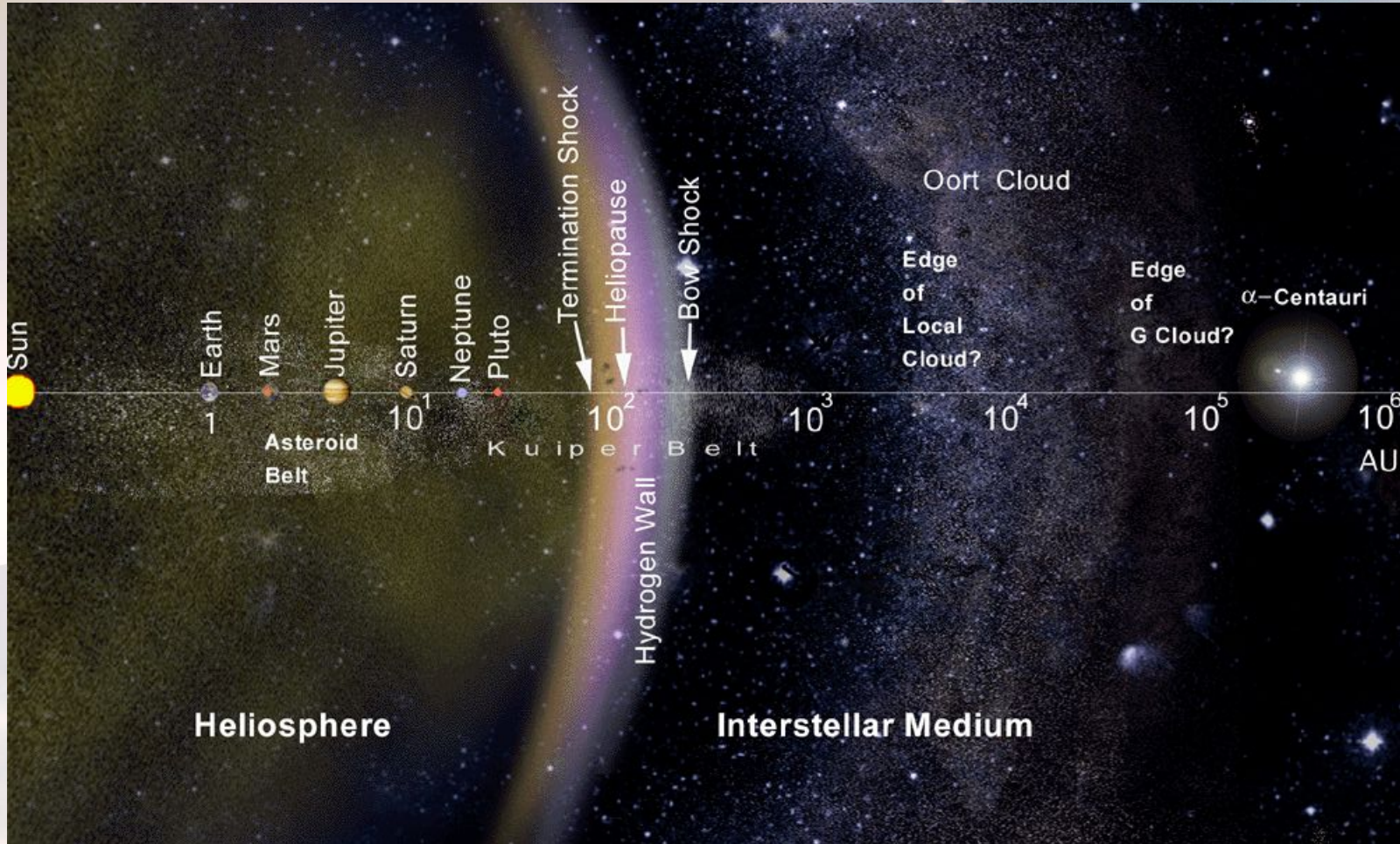
- Jak a proč k tomu dochází?

Planetární systémy jsou velmi různorodé

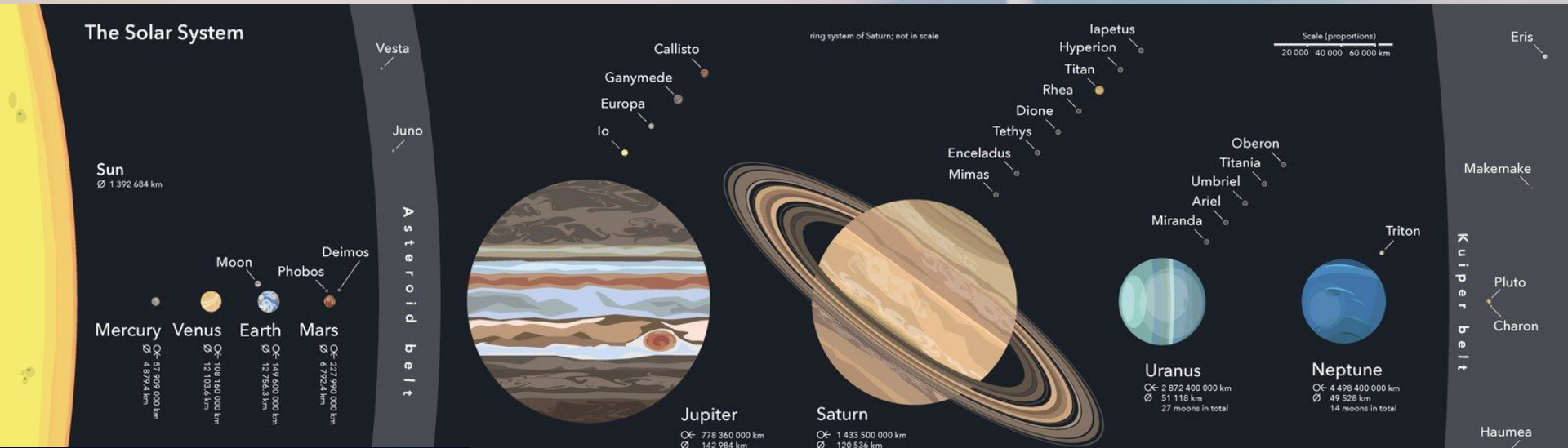
- Jak vysvětlit tuto různorodost?
- Jaké fyzikální procesy se uplatňují?

**Neexistuje univerzální teorie, která by dokázala předpovědět jak bude systém vypadat pro dané parametry protohvězdného oblaku**

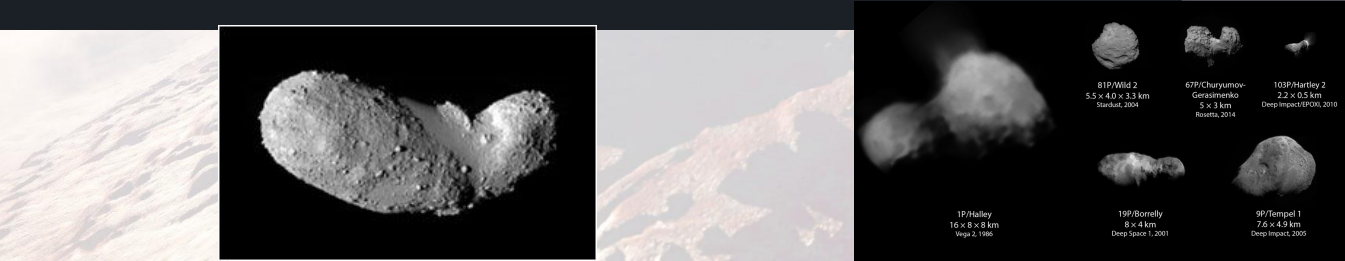
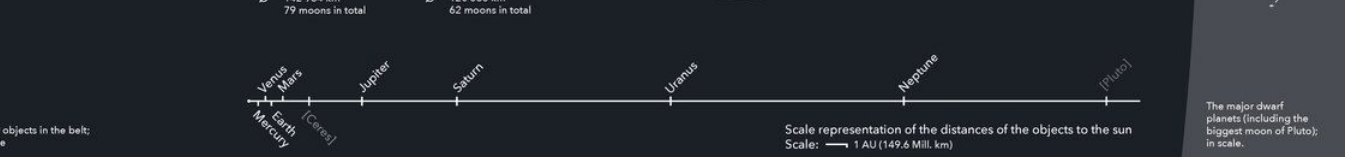
# Sluneční soustava



# Sluneční soustava

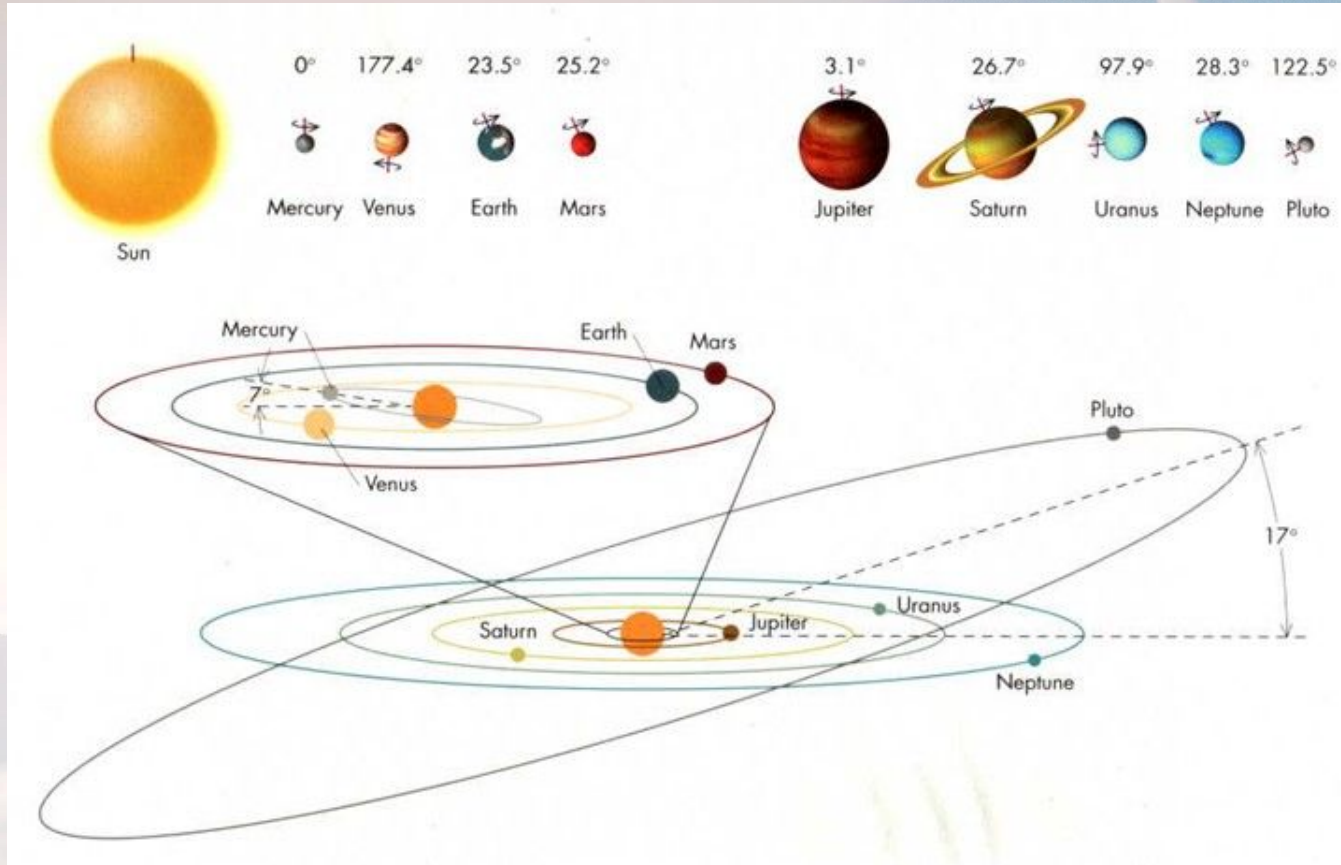


## Largest known trans-Neptunian objects (TNOs)



The major dwarf planets (including the biggest moon of Pluto); in scale.

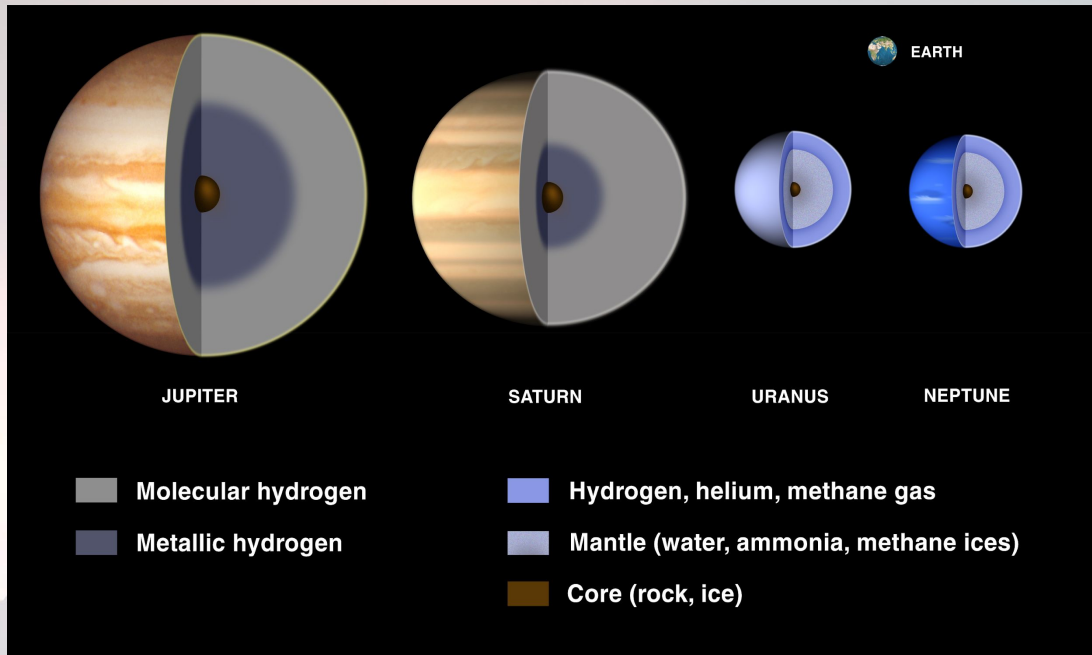
# Sluneční soustava



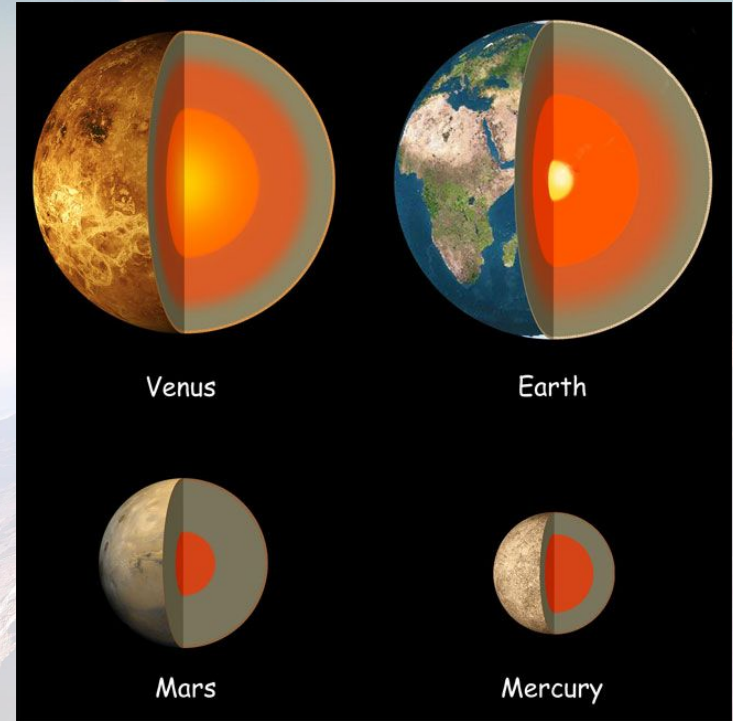
Planety obíhají zhruba v jedné rovině a ve stejném smyslu

Planety nemají osy rotace kolmé k rovině oběhu!

# Sluneční soustava



Kamenné jádro velikosti terestrických planet  
+ obal z lehčích sloučenin a plynů



Jádro z prvků skupiny železa  
+ obal z těžších sloučenin

# Sluneční soustava

objekt	r [au]	poloměr [R <sub>Z</sub> ]	hmotnost [M <sub>Z</sub> ]	P [rok]	hustota [kg/m <sup>3</sup> ]	excentricita	inklinace [°]	měsíce
Merkur	0.4	0.4	0.06	0.24	5.4	0.205	7.01	0
Venuše	0.7	0.9	0.82	0.62	5.2	0.007	3.39	0
Země	1.0	1.0	1.0	1.0	5.5	0.016	0	1
Mars	1.5	0.5	0.11	1.88	3.9	0.093	1.85	2
Jupiter	5.2	11.2	317.8	11.9	1.3	0.049	1.3	79
Saturn	9.5	9.3	95.2	29.5	0.7	0.057	2.48	82
Uran	19.2	4.0	14.5	84.0	1.3	0.046	0.77	27
Neptun	30.1	3.9	17.2	164.8	1.8	0.009	1.77	14
Měsíce	-	4x10 <sup>-3</sup> -0.4	10 <sup>-9</sup> -0.025	-	~1-5.5	0-1	0-90	-
trpasličí planety	2.3-100	0.15-0.36	0.00015-0.0028	4.6-560	1.8-2.5	0.076-0.44	10-44	?
planetky	2.3-3.3	4x10 <sup>-3</sup> -0.4	10 <sup>-10</sup> -0.00015	-	~1-5.5	0-1	0-180	-
komety	~5-70000	~1x10 <sup>-3</sup>	~10 <sup>-12</sup>	~10-10 <sup>6</sup>	~0.3-0.7	0-1	0-180	-



# Sluneční soustava

Body	Mass (kg)	Orbital Velocity (km/sec)	Orbital Radius (m)	Period	Orbital Angular Velocity (rad/sec)	Kinetic Energy (kg-m <sup>2</sup> /sec <sup>2</sup> )	Potential Energy (kg-m <sup>2</sup> /sec <sup>2</sup> )	Angular Momentum (kg-m <sup>2</sup> /sec)
Sun	$1.99 \times 10^{30}$							
Mercury	$3.30 \times 10^{23}$	47.4	$5.80 \times 10^{10}$	88.00 d	$8.26 \times 10^{-7}$	$3.71 \times 10^{32}$	$-7.57 \times 10^{32}$	$9.11 \times 10^{38}$
Venus	$4.87 \times 10^{24}$	35.0	$1.08 \times 10^{11}$	224.70 d	$3.24 \times 10^{-7}$	$2.98 \times 10^{33}$	$-5.97 \times 10^{33}$	$1.82 \times 10^{40}$
Earth	$5.97 \times 10^{24}$	29.8	$1.49 \times 10^{11}$	365.25 d	$1.99 \times 10^{-7}$	$2.65 \times 10^{33}$	$-5.30 \times 10^{33}$	$2.64 \times 10^{40}$
Mars	$6.42 \times 10^{23}$	24.1	$2.28 \times 10^{11}$	687.00 d	$1.06 \times 10^{-7}$	$1.86 \times 10^{32}$	$-3.74 \times 10^{32}$	$3.49 \times 10^{39}$
Jupiter	$1.90 \times 10^{27}$	13.1	$7.78 \times 10^{11}$	11.86 y	$1.68 \times 10^{-8}$	$1.63 \times 10^{35}$	$-3.24 \times 10^{35}$	$1.91 \times 10^{43}$
Saturn	$5.68 \times 10^{26}$	9.7	$1.43 \times 10^{12}$	29.46 y	$6.76 \times 10^{-9}$	$2.67 \times 10^{34}$	$-5.29 \times 10^{34}$	$7.78 \times 10^{42}$
Uranus	$8.68 \times 10^{25}$	6.8	$2.87 \times 10^{12}$	84.02 y	$2.37 \times 10^{-9}$	$2.01 \times 10^{33}$	$-4.01 \times 10^{33}$	$1.68 \times 10^{42}$
Neptune	$1.02 \times 10^{26}$	5.4	$4.49 \times 10^{12}$	164.80 y	$1.21 \times 10^{-9}$	$1.49 \times 10^{33}$	$-3.02 \times 10^{33}$	$2.45 \times 10^{42}$
Pluto	$1.31 \times 10^{22}$	4.7	$5.87 \times 10^{12}$	247.70 y	$8.00 \times 10^{-10}$	$1.45 \times 10^{29}$	$-2.89 \times 10^{29}$	$3.60 \times 10^{38}$
Totals	$1.99 \times 10^{30}$					$1.993 \times 10^{35}$	$-3.96 \times 10^{35}$	$3.10 \times 10^{43}$

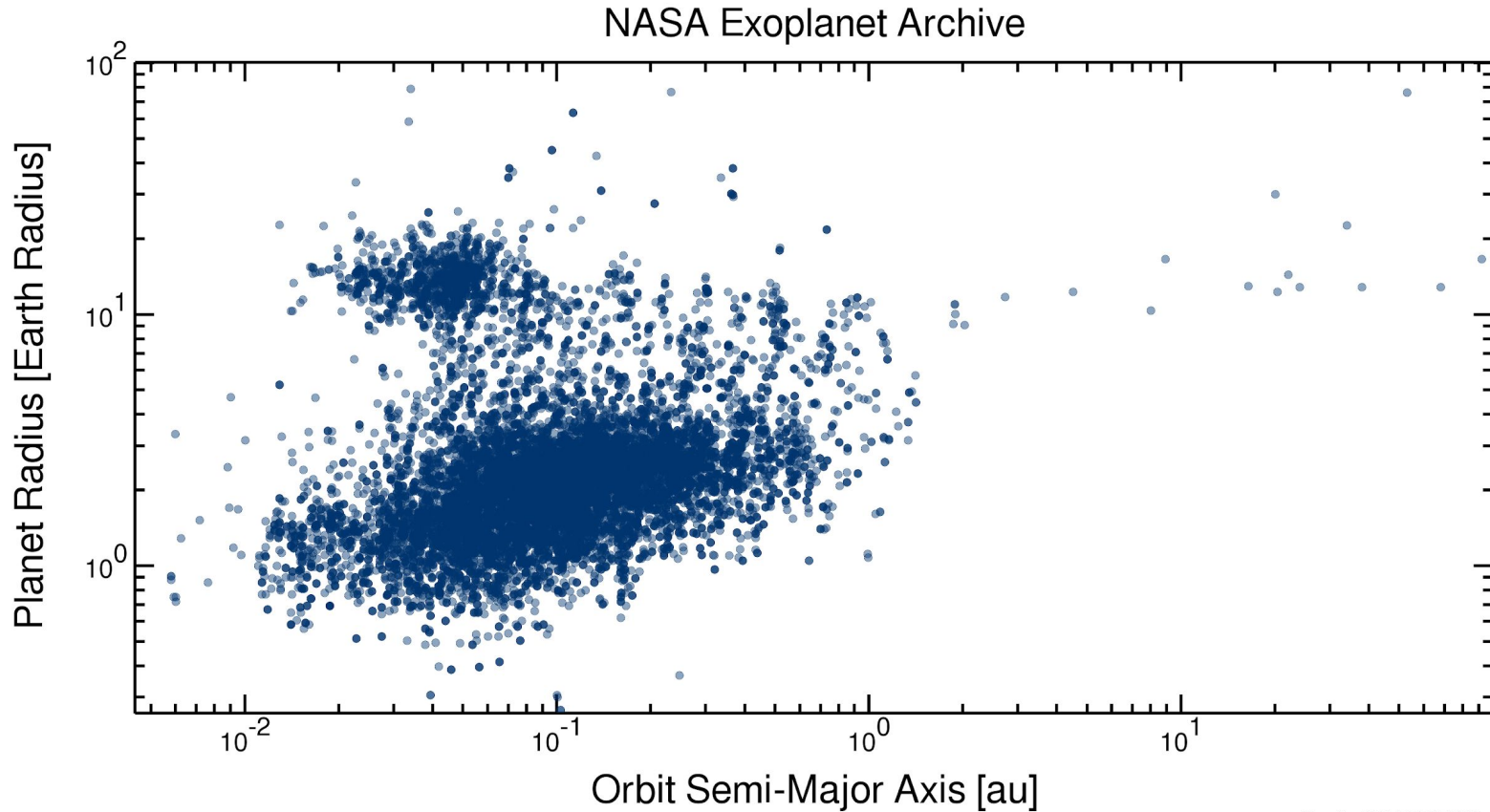
Table 1.0 Energy and Angular Momentum of the Planets

# Sluneční soustava

The background of the slide features a high-angle view of a rocky, cratered celestial body, likely the Moon, with a large, prominent crater in the foreground. In the upper right corner, a thin crescent moon is visible against a light blue sky. The overall scene is bathed in a soft, warm light, suggesting a sunrise or sunset.

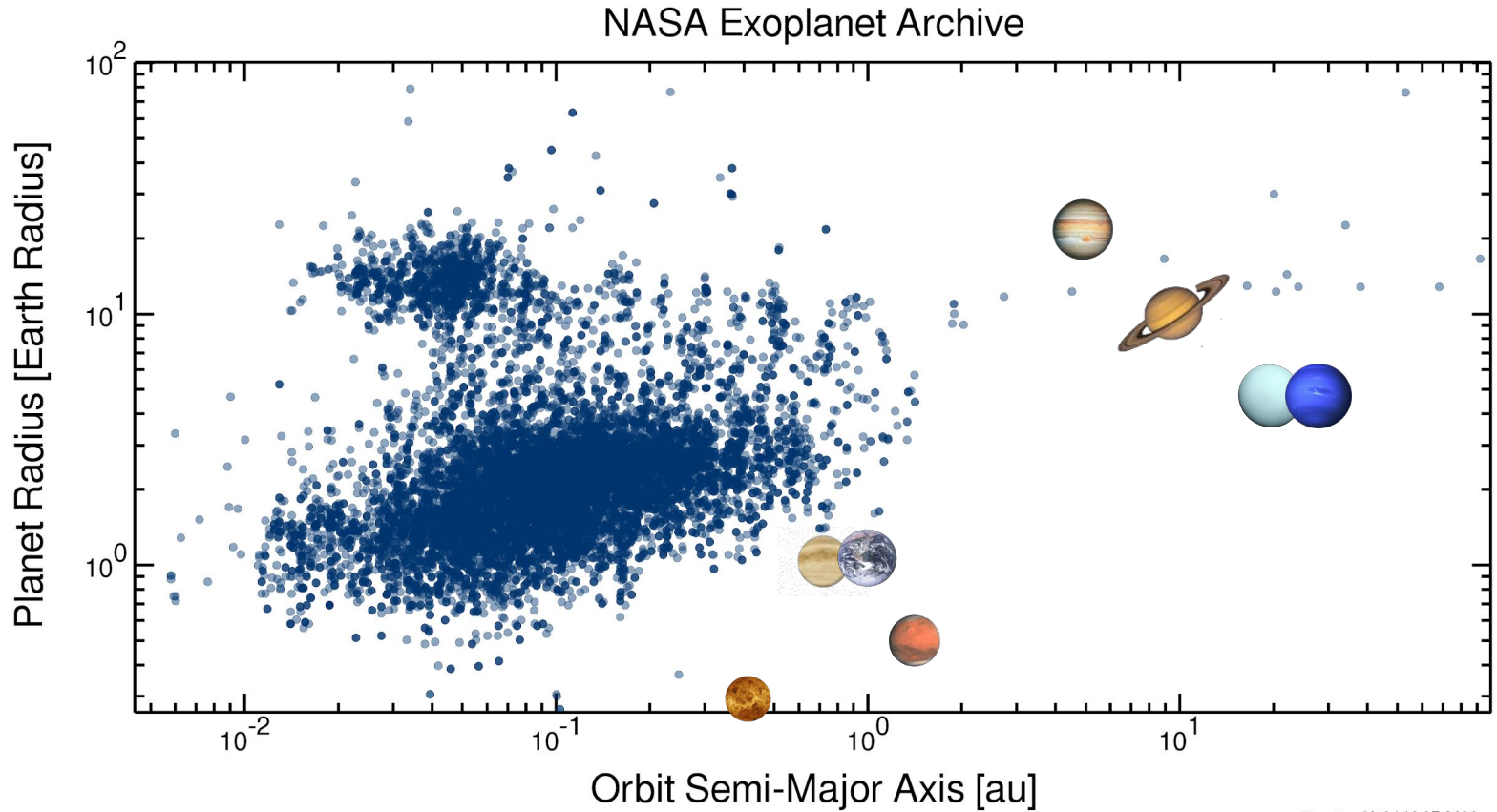
- Proč je uspořádání planet jaké je?
- Proč jsou takové rozdíly mezi planetami?
- Proč je rozdílné jejich chemické složení a stavba?
- Proč jsou dráhy velkých těles téměř kruhové?
- Proč obíhají všechna tělesa zhruba ve stejné rovině a ve stejném směru?
- Proč jsou rotační osy některých planet skloněny vůči rovině oběhu?

# Sluneční soustava vs exoplanetární soustavy



Tue Oct 13 04:13:37 2020

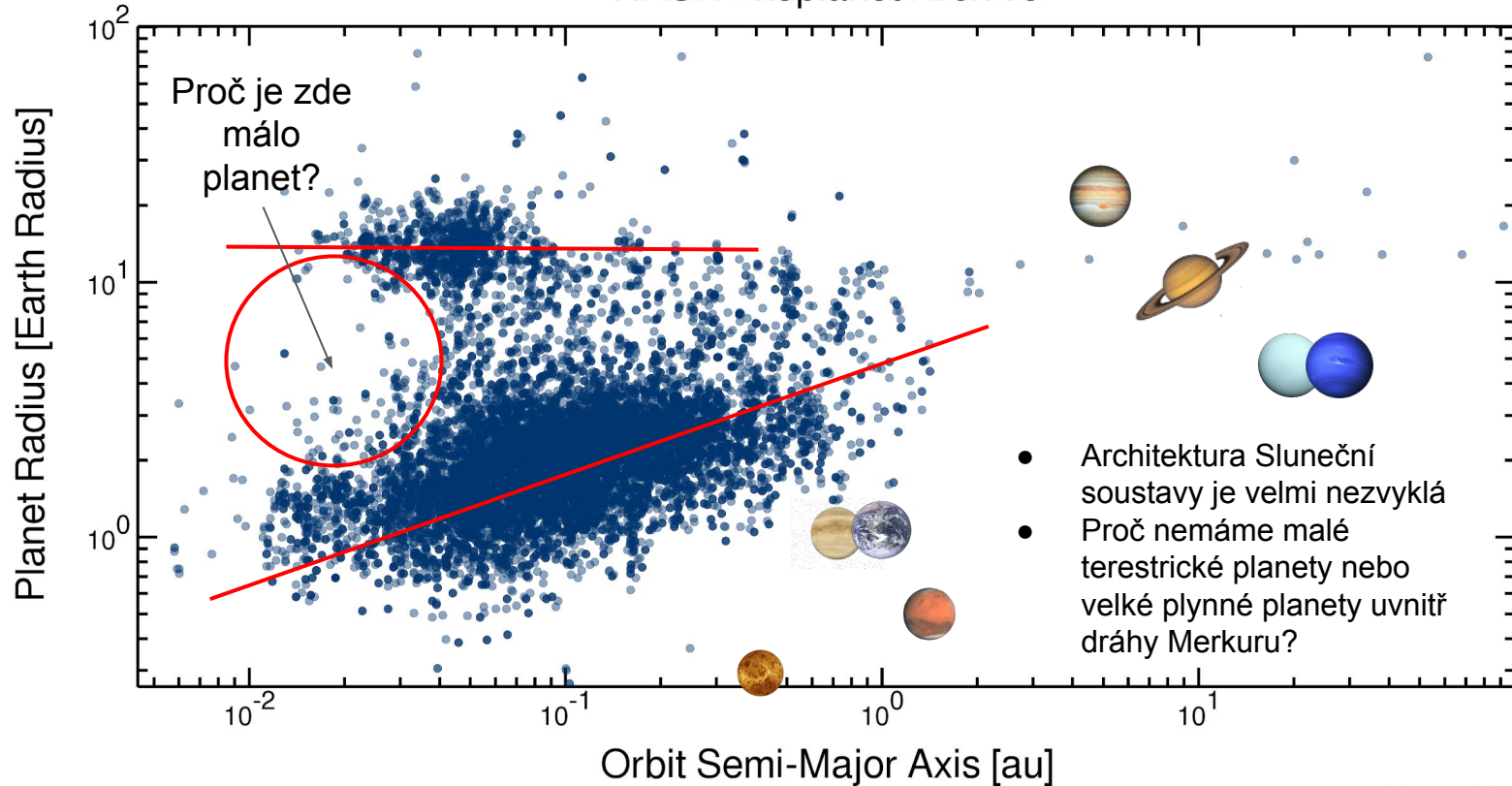
# Sluneční soustava vs exoplanetární soustavy



Tue Oct 13 04:13:37 2020

# Sluneční soustava vs exoplanetární soustavy

NASA Exoplanet Archive

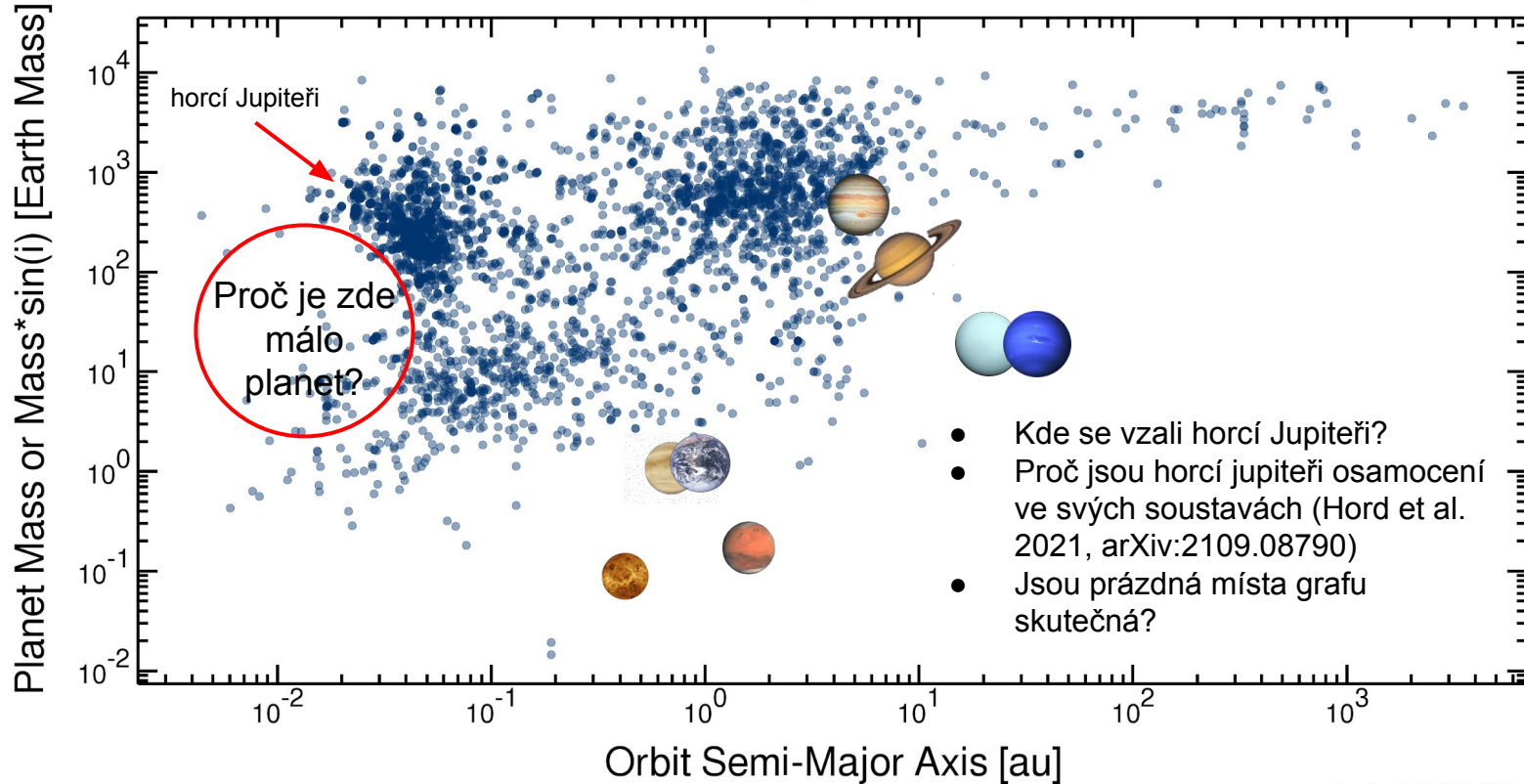


Tue Oct 13 04:13:37 2020

Pozor na pozorovací bias!

# Sluneční soustava vs exoplanetární soustavy

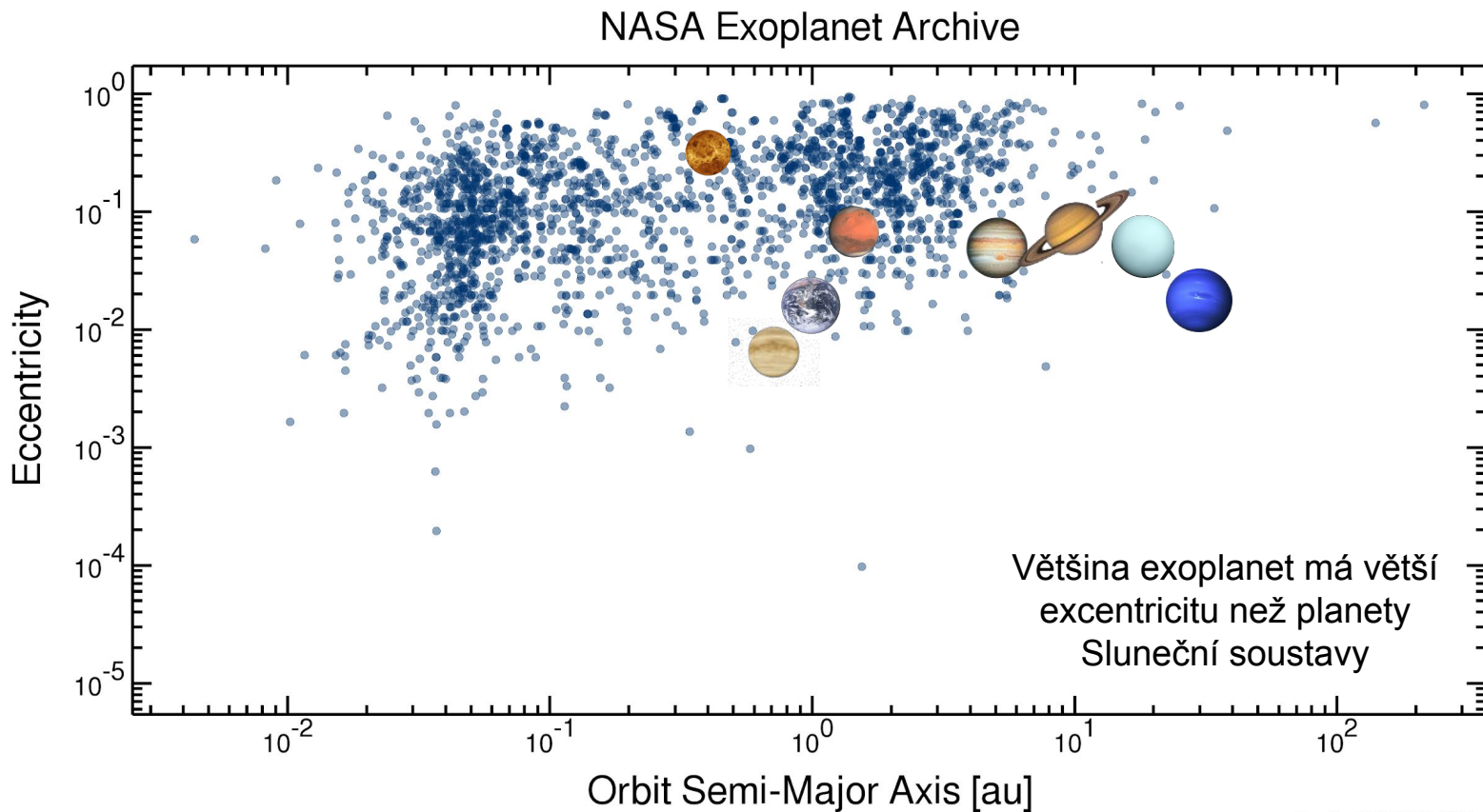
NASA Exoplanet Archive



Tue Oct 13 04:17:07 2020

Pozor na pozorovací bias!

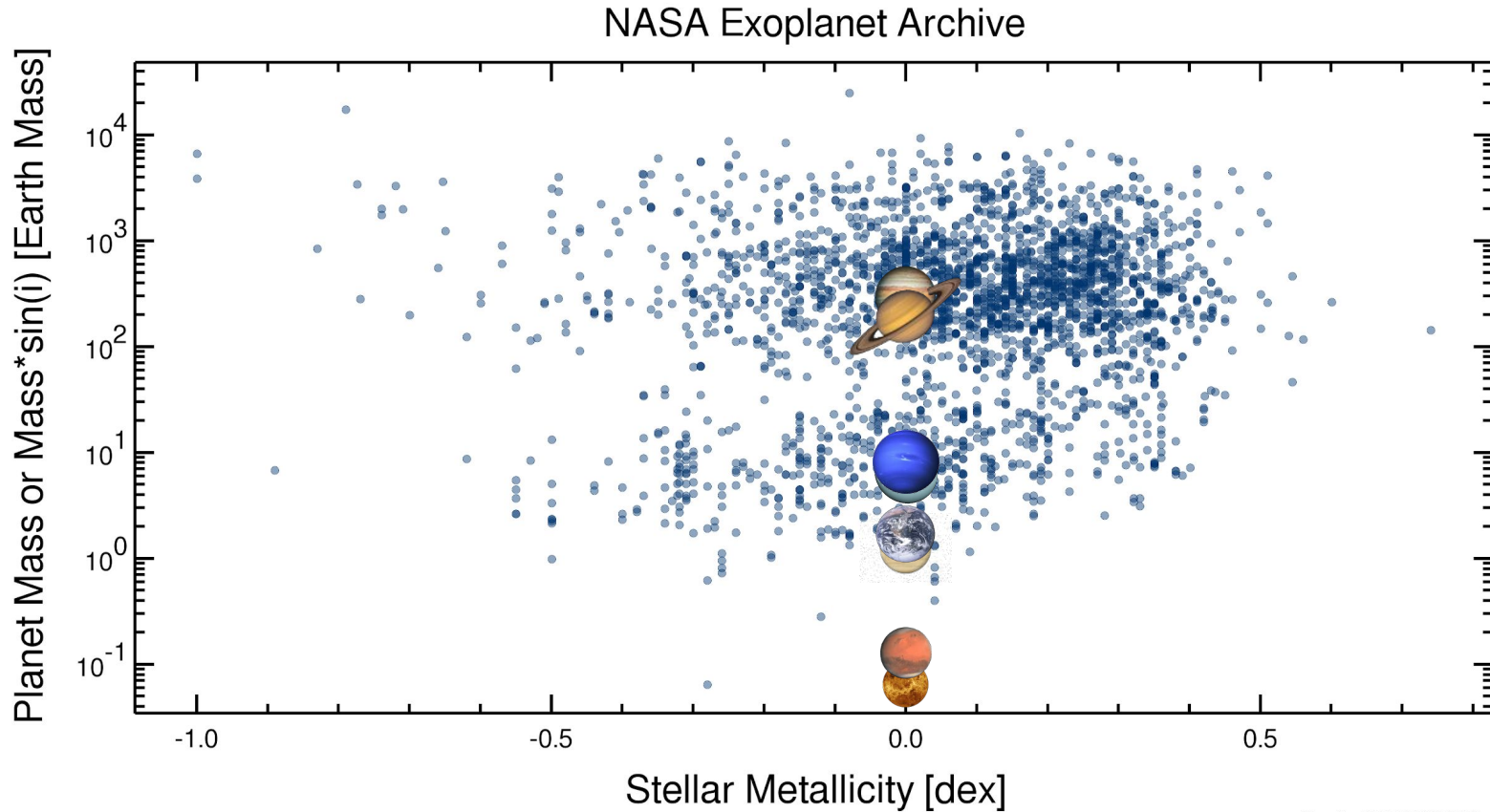
# Sluneční soustava vs exoplanetární soustavy



Tue Oct 13 07:36:01 2020

Pozor na pozorovací bias!

# Sluneční soustava vs exoplanetární soustavy

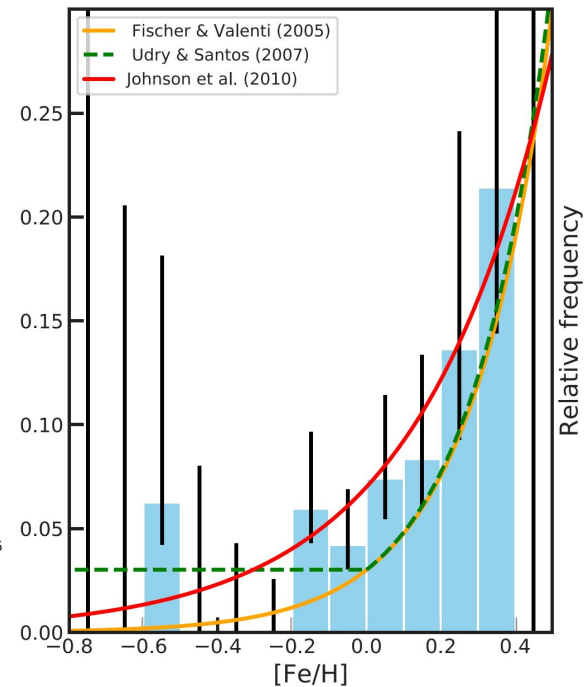
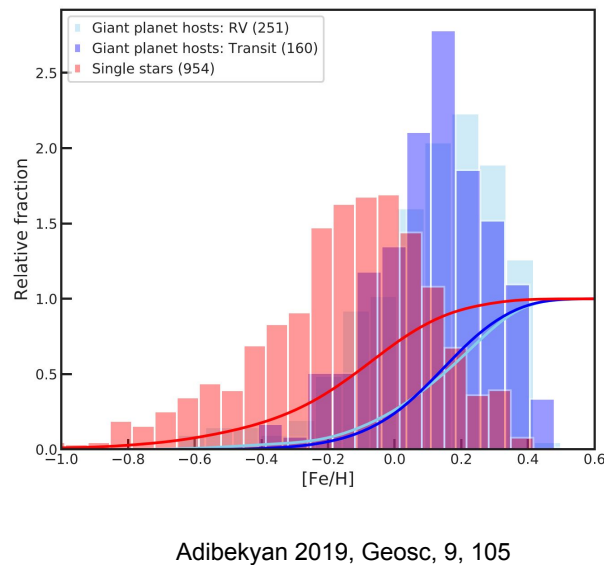
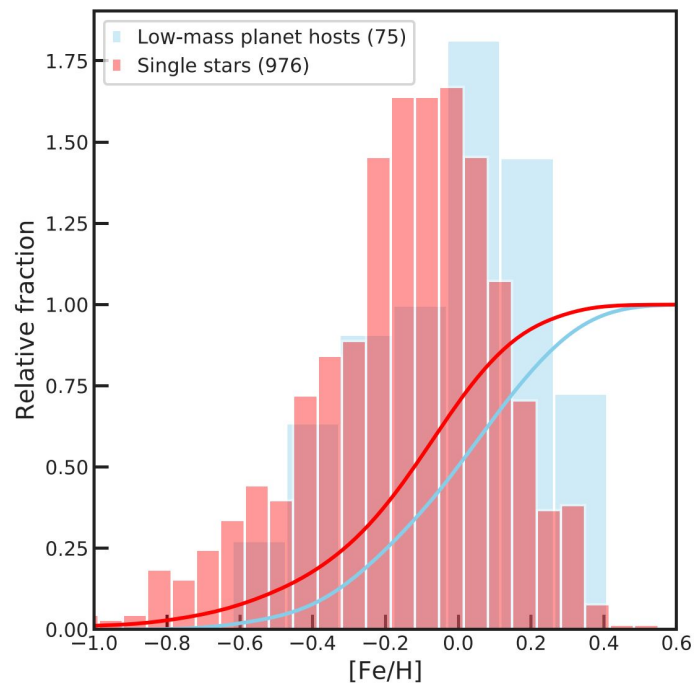


Tue Oct 13 06:35:27 2020

Pozor na pozorovací bias!

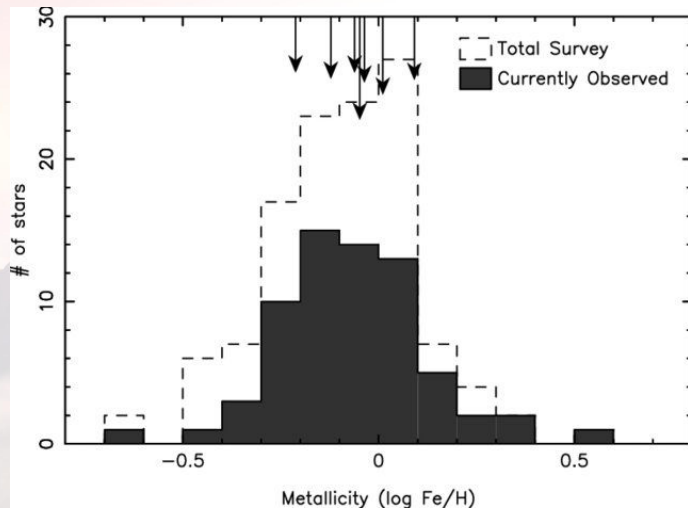
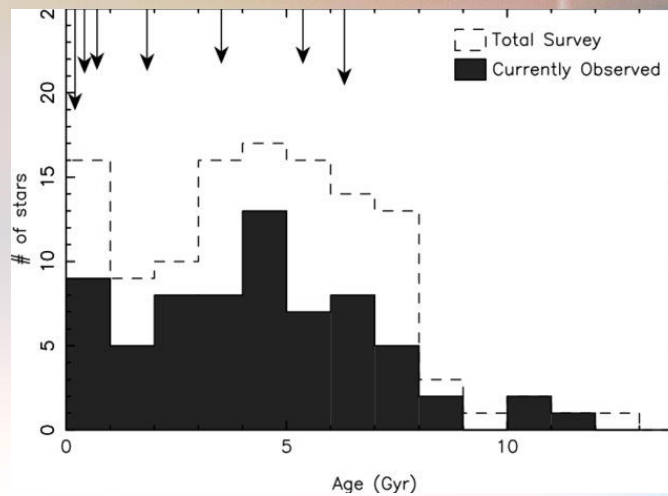
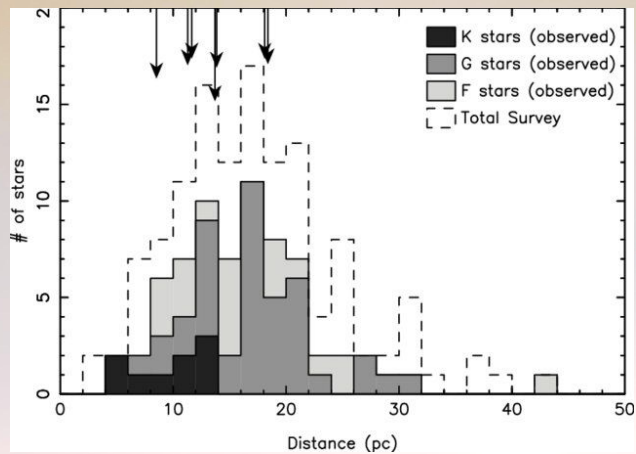


# Sluneční soustava vs exoplanetární soustavy



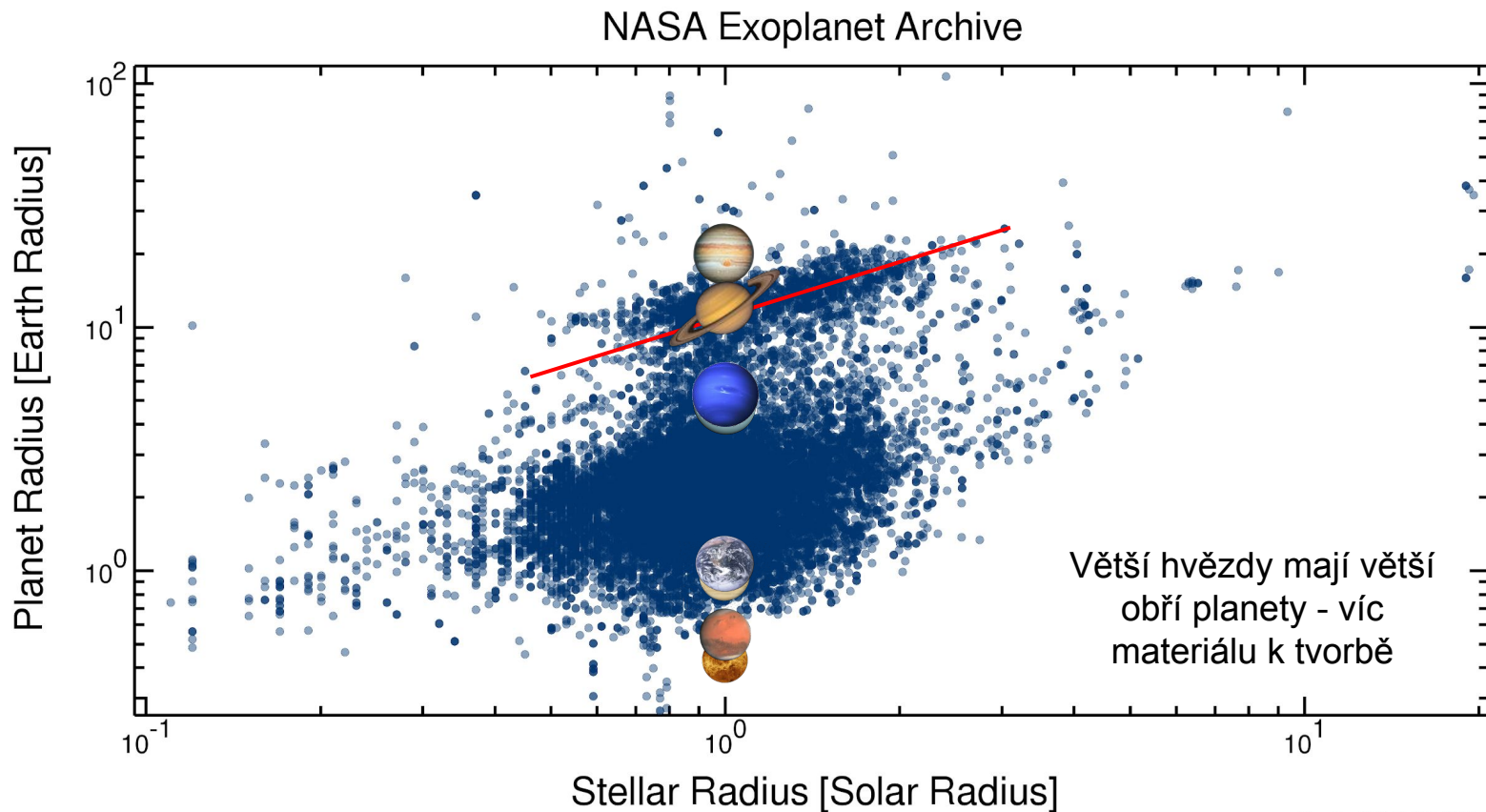
Čím větší metalicita, tím více planet všech typů

$$[\text{Fe}/\text{H}] = \log_{10} \left( \frac{N_{\text{Fe}}}{N_{\text{H}}} \right)_{\text{star}} - \log_{10} \left( \frac{N_{\text{Fe}}}{N_{\text{H}}} \right)_{\text{sun}}$$



Bryden et al. 2006, ApJ, 636, 1098, Frequency of Debris Disks around Solar-Type Stars: First Results from a Spitzer MIPS Survey

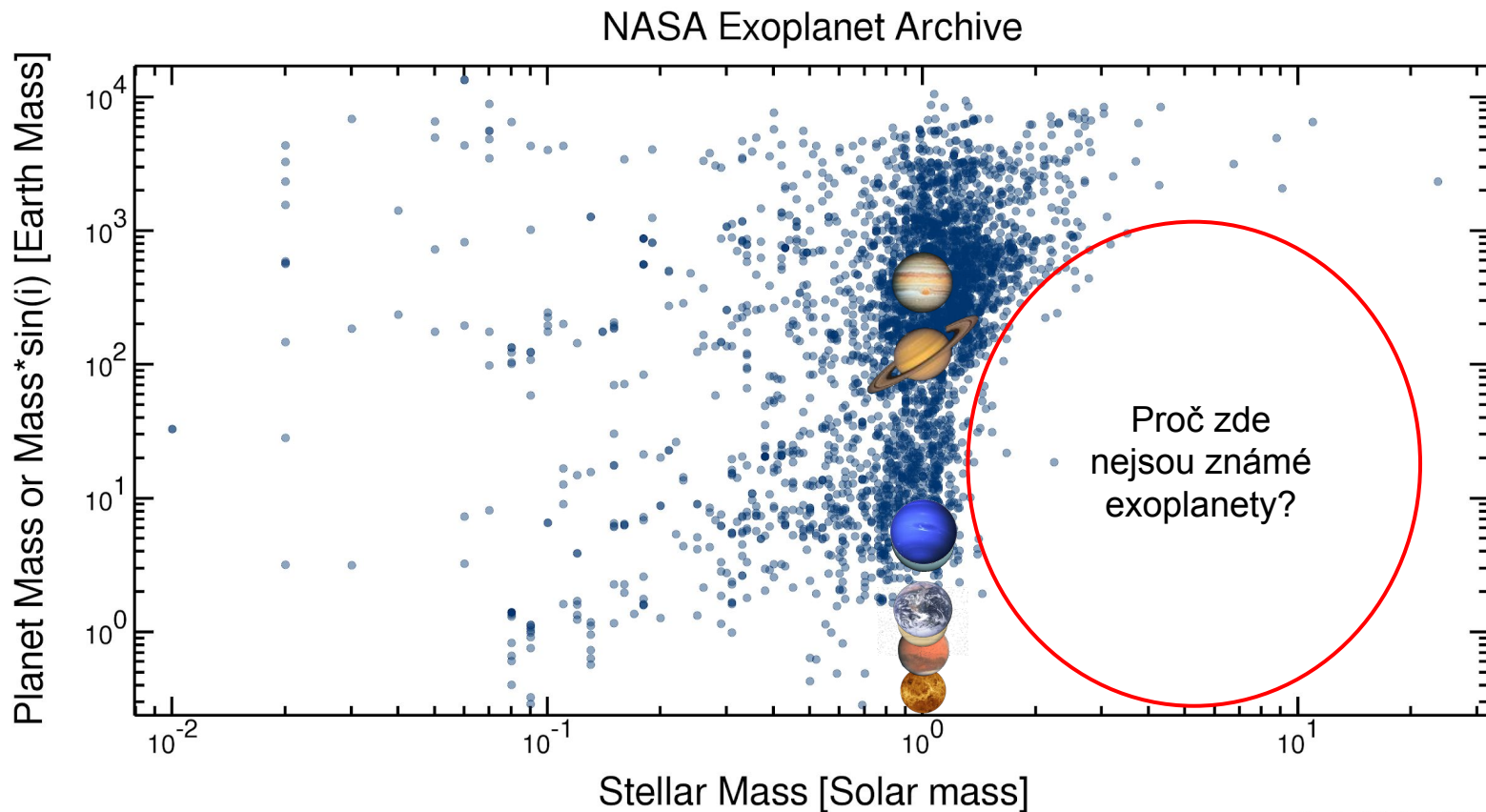
# Sluneční soustava vs exoplanetární soustavy



Tue Oct 13 04:34:05 2020

Pozor na pozorovací bias!

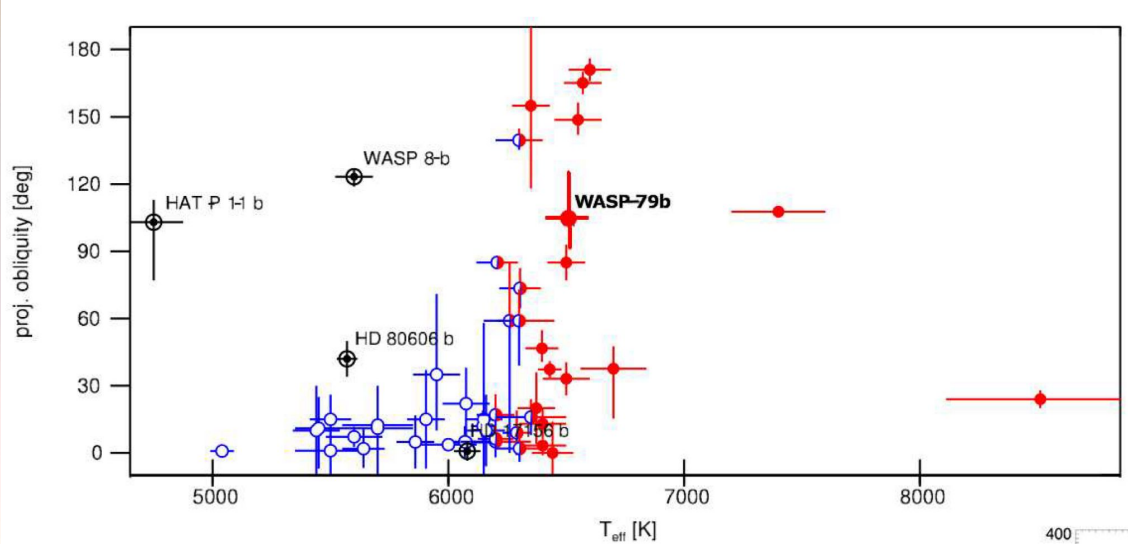
# Sluneční soustava vs exoplanetární soustavy



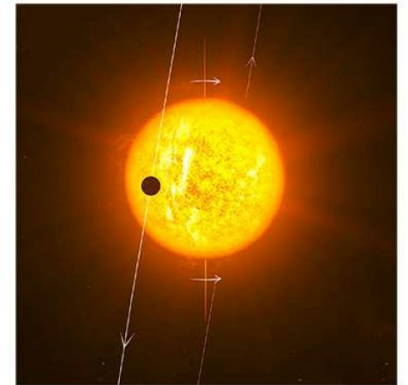
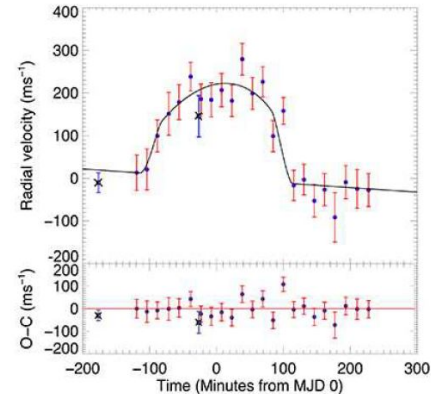
Tue Oct 13 04:32:30 2020

Pozor na pozorovací bias!

# Sluneční soustava vs exoplanetární soustavy

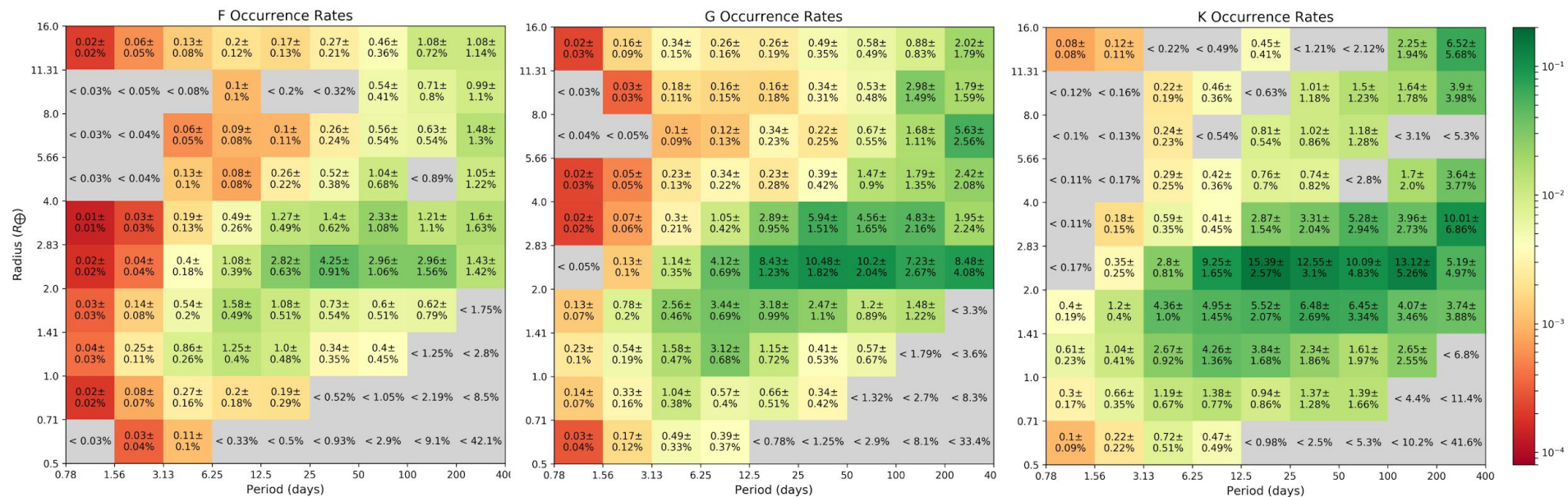


Proč některé planety neobíhají po drahách koplanárních s rovníkem hvězdy?



# Sluneční soustava vs exoplanetární soustavy

Kunimoto&Matthews 2020, AJ, 159, 248 - statistické modely na základě dat z Kepleru



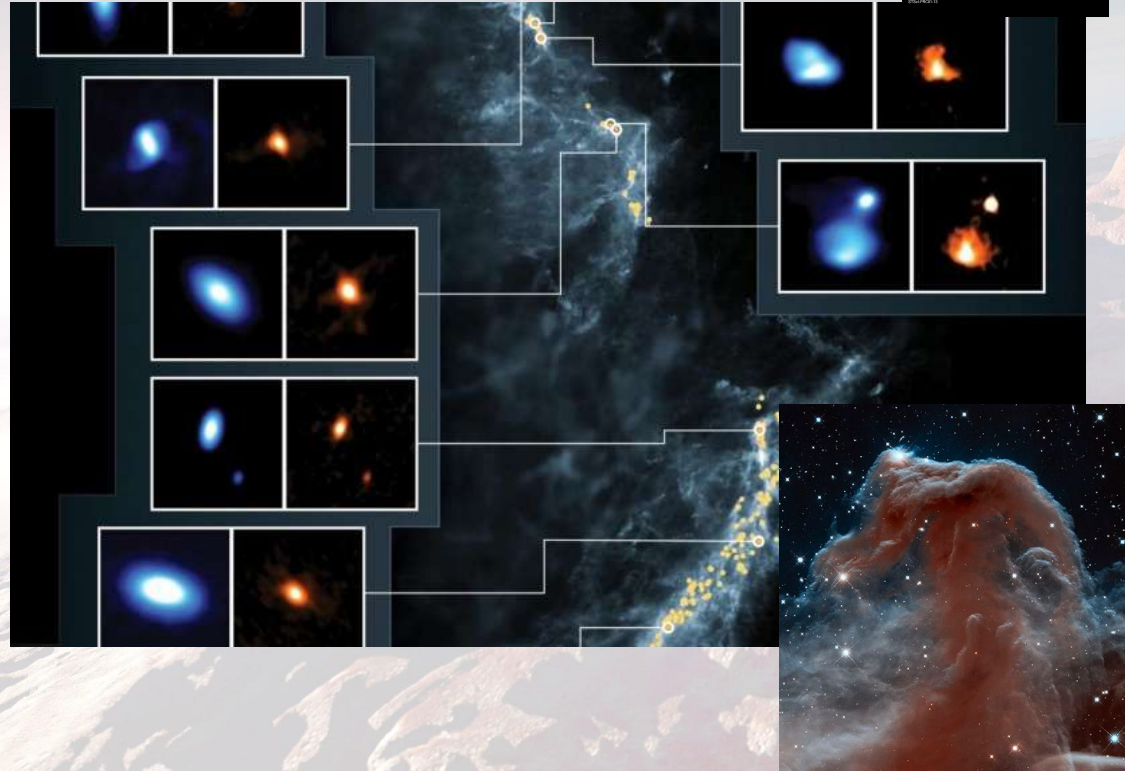
Současné statistiky naznačují, že většina planet je větších než Země a obíhají po drahách s periodami mezi 10 a 400 dny

# Otázky k řešení

- Proč je uspořádání planet Sluneční soustavy (SS) jaké je?
- Je skutečně SS výjimečná ve srovnání s ostatními soustavami?
- Proč jsou takové rozdíly mezi planetami?
- Proč je rozdílné chemické složení planet SS i jejich stavba?
- Proč se obří plynné planety SS nacházejí dále než terestrické planety?
- Proč jsou dráhy velkých těles SS téměř kruhové?
- Proč obíhají všechna tělesa SS zhruba ve stejné rovině?
- Proč planety obíhají ve stejném smyslu?
- Proč jsou rotační osy některých planet SS skloněny a jiných ne?
- Jak vznikají horcí Jupiteri a proč je nemáme ve SS?
- Proč nejsou žádné planety uvnitř Merkurovy dráhy?
- Co definuje horní mez hmotnosti konkrétní planety?
- Proč nejsou známy planety větší a hmotnější než Země v určité vzdálenosti od mateřské hvězdy?
- Proč je více planet u hvězd s vyšší metalicitou?
- Jak moc ovlivňují naše metody naše výsledky?

# Kolaps mezihvězdného mračna

- Hvězdy vznikají v obřích molekulových mračnách





# Kolaps mezihvězdného mračna

- Hvězdy vznikají v obřích molekulových mračnách

$$2K + U = 0$$

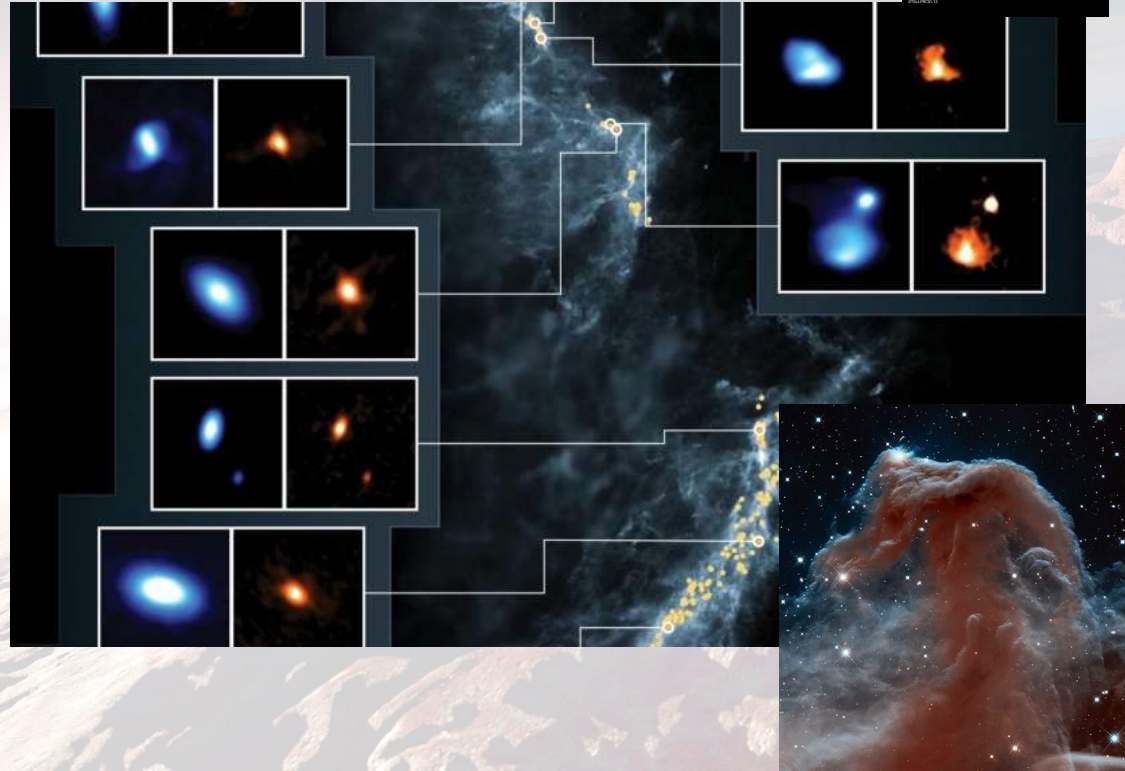
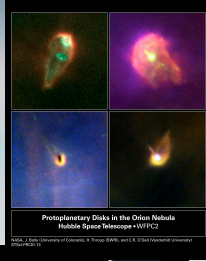
$$U \sim -\frac{3}{5} \frac{GM^2}{R} \quad K = \frac{3}{2} NkT = \frac{3}{2} \frac{M}{\bar{m}} kT$$

$$M > \left( \frac{5kT}{G\bar{m}} \right)^{3/2} \left( \frac{3}{4\pi\rho} \right)^{1/2} \equiv M_J$$

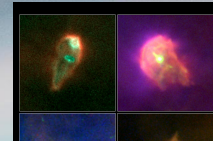
$$\rho > \frac{3}{4\pi M^2} \left( \frac{5kT}{G\bar{m}} \right)^3 \equiv \rho_J$$

Jeansovo kritérium -> Mrak začne kolabovat pouze pokud je teplota dostatečně nízká a hustota vysoká.

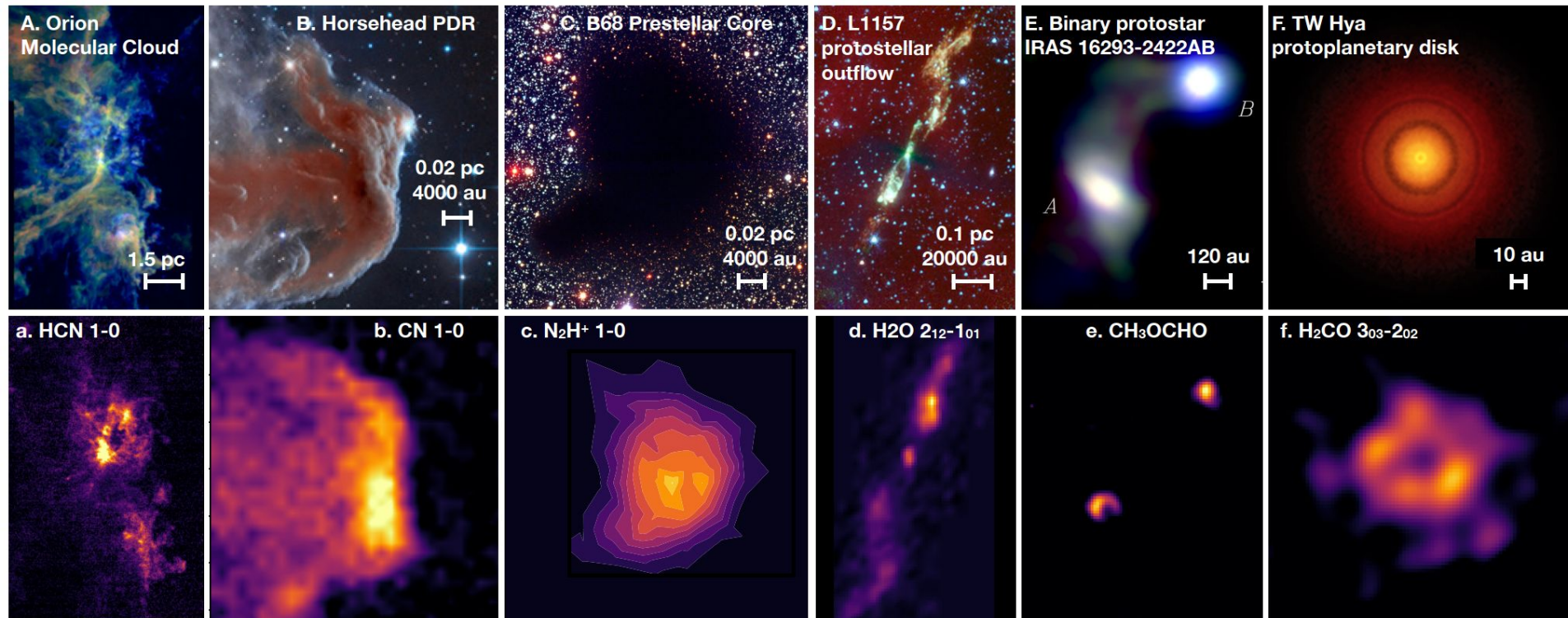
Pro  $T \sim 20 \text{ K}$  a  $n \sim 100 \text{ cm}^{-3}$  je  $M \sim 1000 M_{\odot}$



# Kolaps mezihvězdného mračka

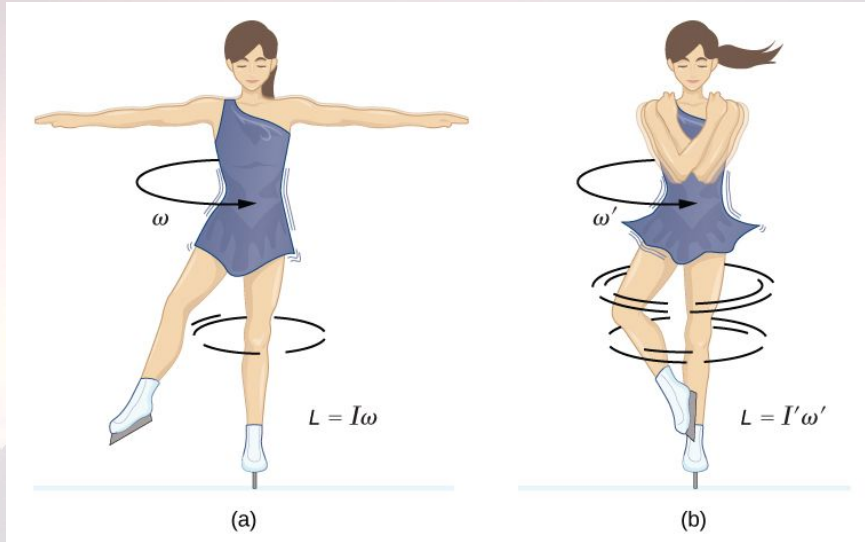


- Hvězdy vznikají v obřích molekulových mračkách

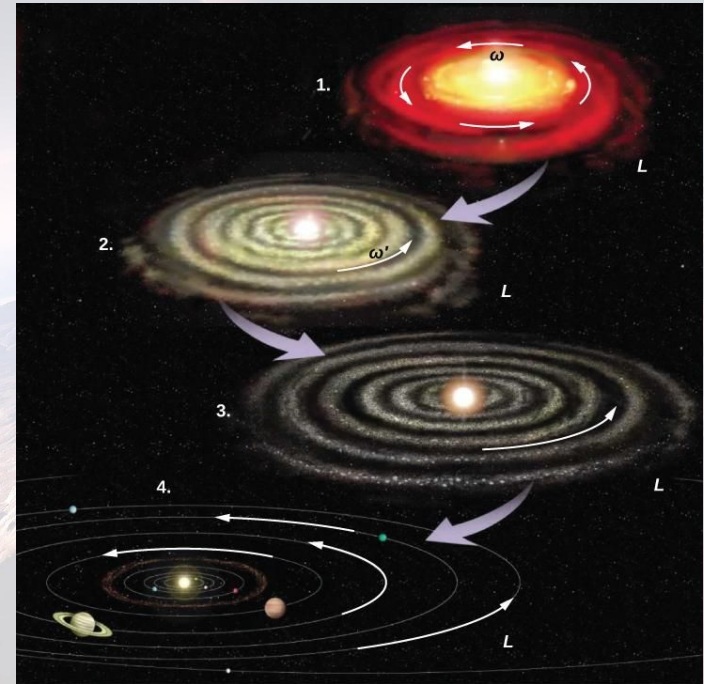


# Kolaps mezihvězdného mračka

- Do centrálních oblastí padá volným pádem hmota, oblast se stává neprůhlednou a zahřívá se
- Mrak se při smršťování roztáčí díky zákonu zachování momentu hybnosti -> vznik disku, zpomalení přísunu hmoty do centrálních oblastí



$$\mathbf{L}_i \equiv \mathbf{r}_i \times m_i \mathbf{v}_i$$

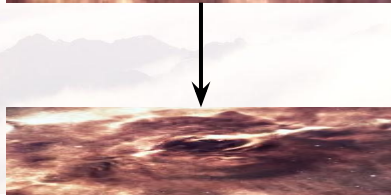


# Kolaps mezihvězdného mračna

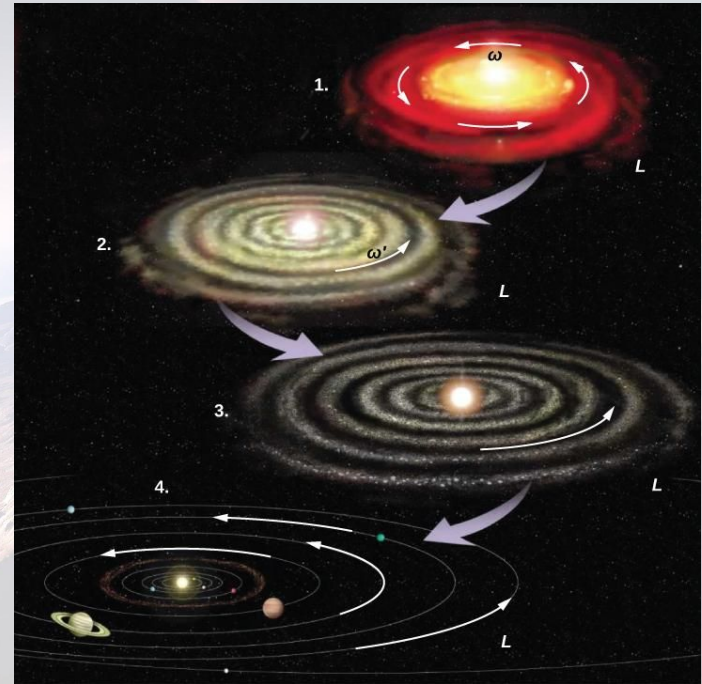
- Do centrálních oblastí padá volným pádem hmota, oblast se stává neprůhlednou a zahřívá se
- Mrak se při smršťování roztáčí díky zákonu zachování momentu hybnosti -> vznik disku, zpomalení přísunu hmoty do centrálních oblastí



Složka síly  
směřující k  
rovině oběhu  
-> materiál se  
sdružuje v disku



$$\mathbf{L}_i \equiv \mathbf{r}_i \times m_i \mathbf{v}_i$$



# PROTOPLANETARY DISKS

HD 163296

WARNING: OBJECTS NOT TO SCALE

HL TAURI

HD 169142

RX J1615

HD 135344B

AS 209

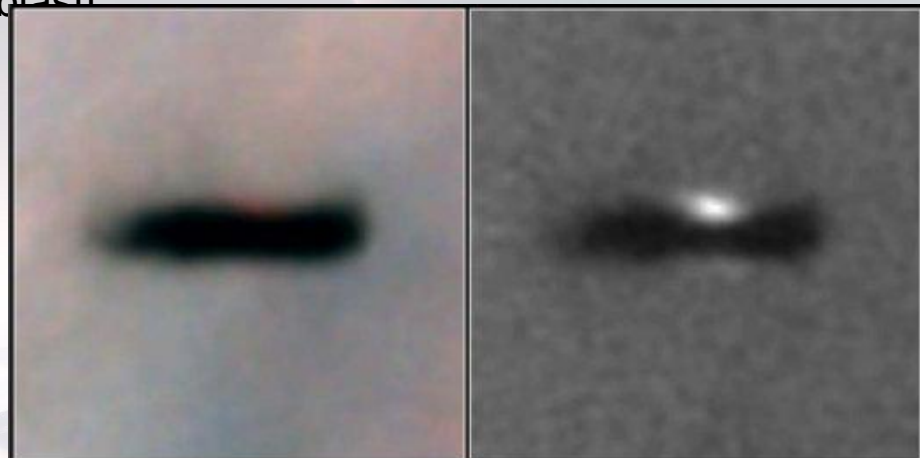
TW HYDRAE

ELIAS 2-27

Specimens exhibiting rings, gaps, & spirals

# hvězdného mračka

dem hmota, oblast se stává neprůhlednou a zahřívá se  
konu zachování momentu hybnosti -> vznik disku,  
n oblastí



Edge-On Protoplanetary Disk  
Orion Nebula

HST · WFPC2

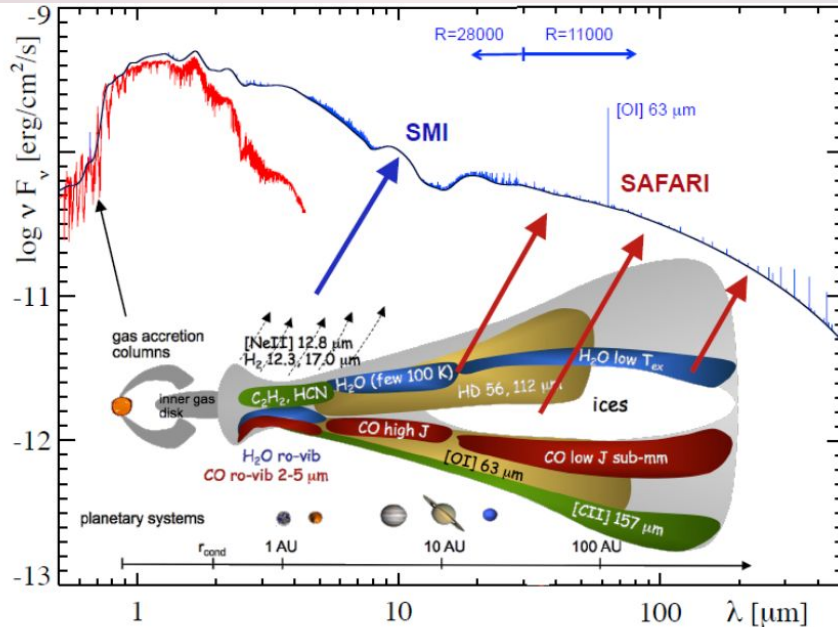
PRC95-45c · ST ScI OPO · November 20, 1995

M. J. McCaughrean (MPIA), C. R. O'Dell (Rice University), NASA



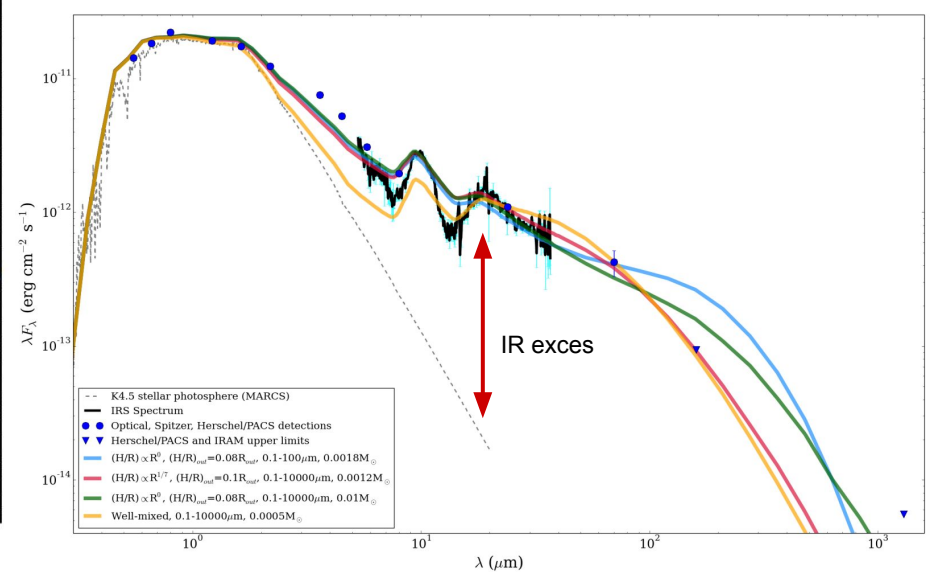
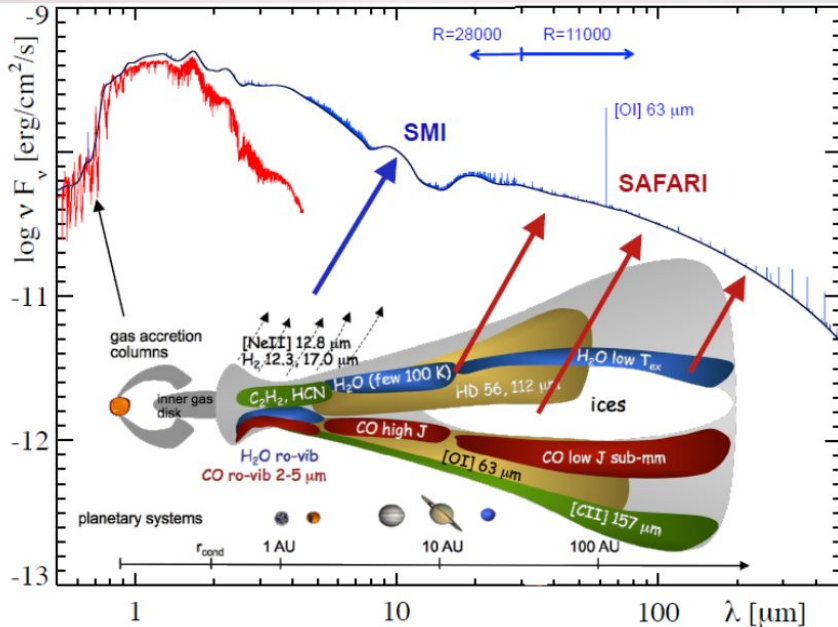
# Vznik planet

- Do hry vstupují gravitace, odstředivé síly, gradient tlaku, magnetická pole, viskozita materiálu, později srážky a gravitační ovlivňování těles navzájem, migrace.
- Na póly hvězdy padá materiál, vznikají výtrysky z disku ve směru pólů, hvězda začíná zářit jako hvězda typu T Tau - infračervený exces.



# Vznik planet

- Do hry vstupují gravitace, odstředivé síly, gradient tlaku, magnetická pole, viskozita materiálu, později srážky a gravitační ovlivňování těles navzájem, migrace.
- Na póly hvězdy padá materiál, vznikají výtrysky z disku ve směru pólů, hvězda začíná zářit jako hvězda typu T Tau - infračervený exces.



# Vznik planet

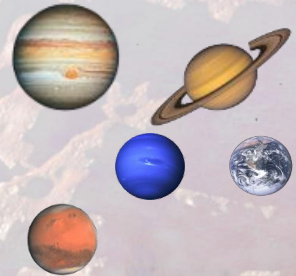
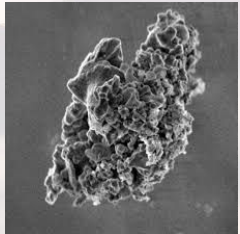
- Do hry vstupují gravitace, odstředivé síly, gradient tlaku, magnetická pole, viskozita materiálu, později srážky a gravitační ovlivňování těles navzájem, migrace.
- Na póly hvězdy padá materiál, vznikají výtrysky z disku ve směru pólů, hvězda začíná zářit jako hvězda typu T Tau - infračervený exces.
- Centrální horké oblasti jsou zbaveny lehkých sloučenin a lehkých prvků, které jsou odsunuty do okrajových částí
- Kondenzují první prachová zrnka, která se dále spojují





# Vznik planet

- Do hry vstupují gravitace, odstředivé síly, gradient tlaku, magnetická pole, viskozita materiálu, později srážky a gravitační ovlivňování těles navzájem, migrace.
- Na póly hvězdy padá materiál, vznikají výtrysky z disku ve směru pólů, hvězda začíná zářit jako hvězda typu T Tau - infračervený exces.
- Centrální horké oblasti jsou zbaveny lehkých sloučenin a lehkých prvků, které jsou odsunuty do okrajových částí
- Kondenzují první prachová zrnka, která se dále spojují

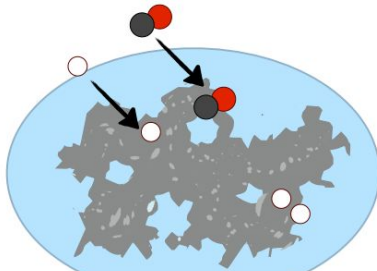


# Vznik planet

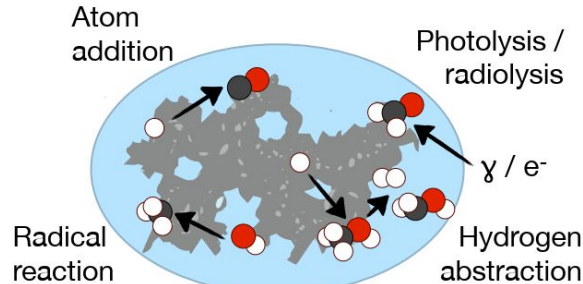
- Do hry vstupují gravitace, odstředivé síly, gradient tlaku, magnetická pole, viskozita materiálu, později srážky a gravitační ovlivňování těles navzájem, migrace.
- Na póly hvězdy padá materiál, vznikají výtrysky z disku ve směru pólů, hvězda začíná zářit jako hvězda typu T Tau - infračervený exces.
- Centrální horké oblasti jsou zbaveny lehkých sloučenin a lehkých prvků, které jsou odsunuty do okrajových částí
- Kondenzují první prachová zrnka, která se dále spojují



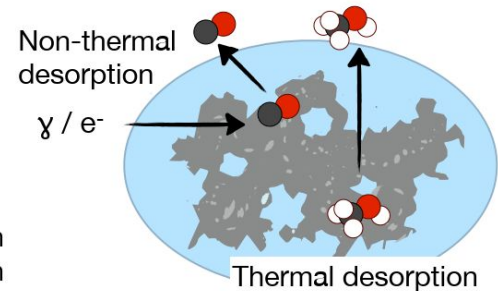
Freeze-out / adsorption



Grain surface and ice chemistry

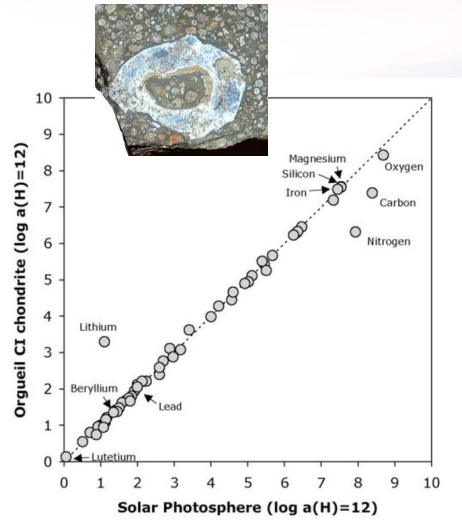
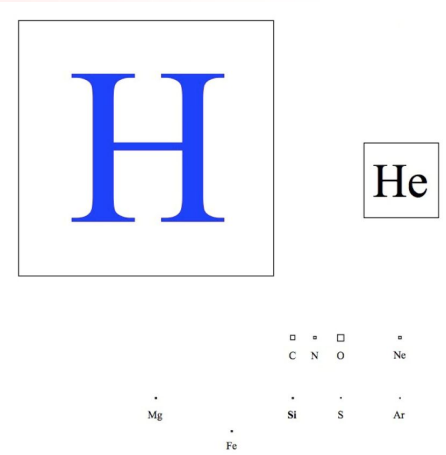


Ice sublimation / desorption

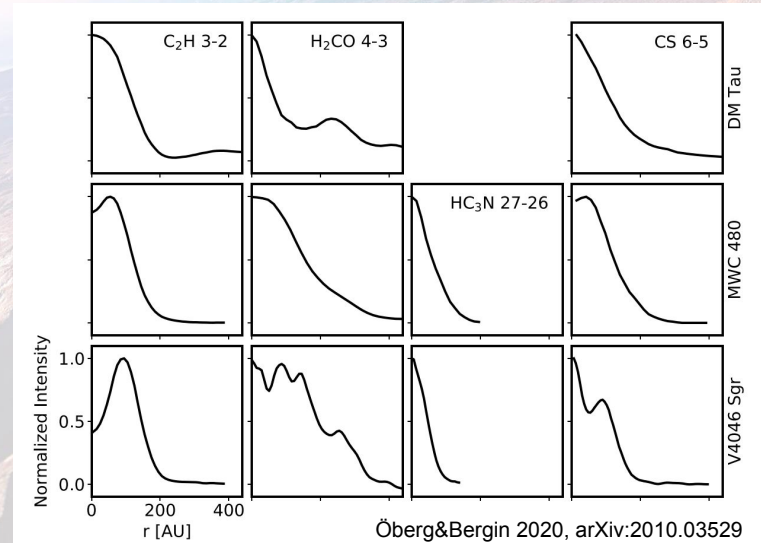


# Vznik planet

- Do hry vstupují gravitace, odstředivé síly, gradient tlaku, magnetická pole, viskozita materiálu, později srážky a gravitační ovlivňování těles navzájem, migrace.
- Na póly hvězdy padá materiál, vznikají výtrysky z disku ve směru pólů, hvězda začíná zářit jako hvězda typu T Tau - infračervený exces.
- Centrální horké oblasti jsou zbaveny lehkých sloučenin a lehkých prvků, které jsou odsunuty do okrajových částí
- Kondenzují první prachová zrnka, která se dále spojují



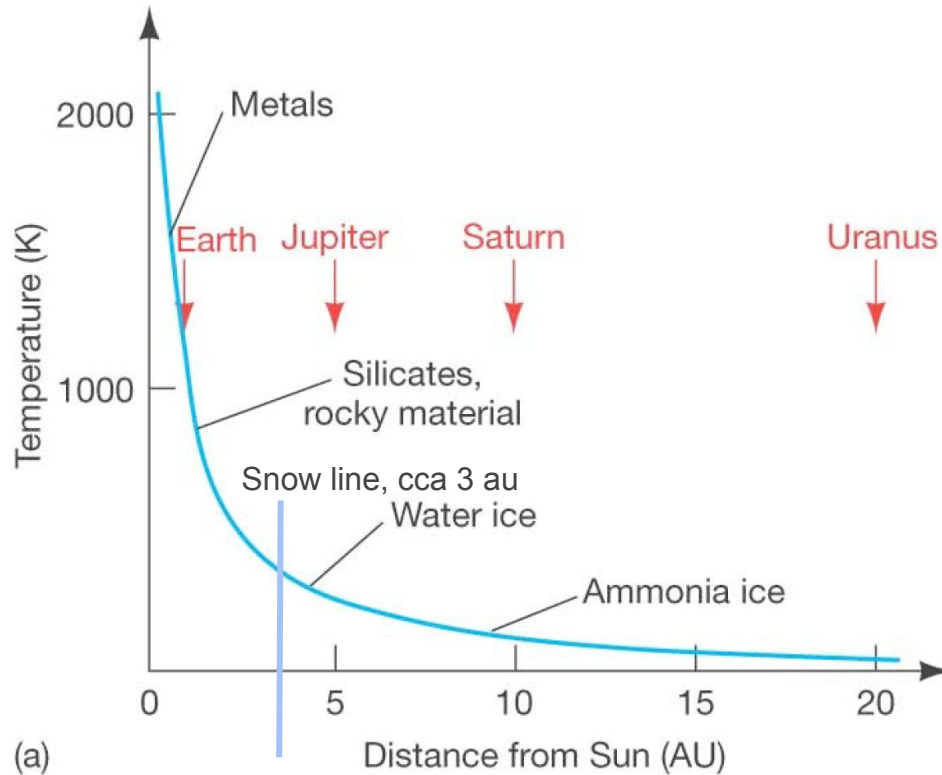
V disku i složitější molekuly



Chemické složení zárodečného mraku stejné jako složení chondritů

# Vznik planet

- Do hry vstupují g
- později srážky a
- Na póly hvězdy p
- jako hvězda typu
- Centrální horké c
- do okrajových část
- Kondenzují prv



ole, viskozita materiálu,  
, hvězda začíná zářit  
ů, které jsou odsunuty

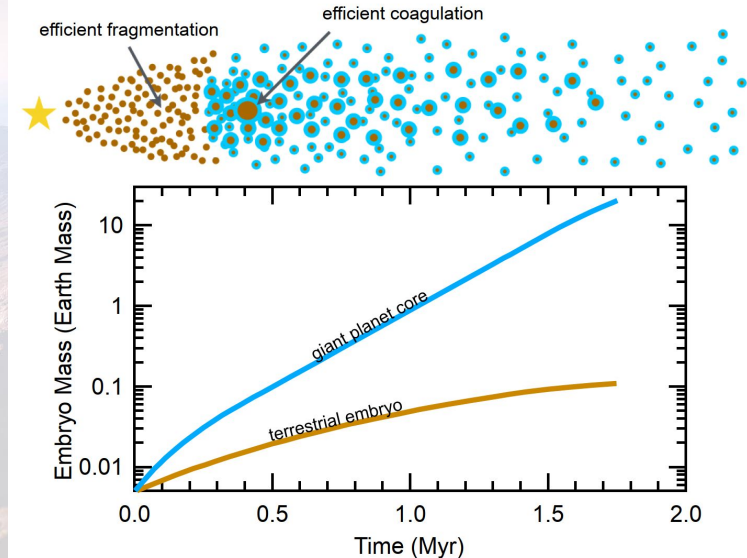
# Vznik planet

- Do hry vstupují gravitace, odstředivé síly, gradient tlaku, magnetická pole, viskozita materiálu, později srážky a gravitační ovlivňování těles navzájem, migrace.
- Na póly hvězdy padá materiál, vznikají výtrysky z disku ve směru pólů, hvězda začíná zářit jako hvězda typu T Tau - infračervený exces.
- Centrální horké oblasti jsou zbaveny lehkých sloučenin a lehkých prvků, které jsou odsunuty do okrajových částí
- Kondenzují první prachová zrnka, která se dále spojují
- Terestrické planety
  - Vznik v horkých oblastech, husté prvky, malé hmotnosti planet
  - Sekundární atmosféry
  - Až  $10^8$  let
- Plynní obři
  - Ve vnějších oblastech, efektivnější spojování prachových zrn díky ledu, postupné nabalení okolního plynu, vznik primární atmosféry
  - cca  $3 \times 10^6$  let - pak nedostatek plynu

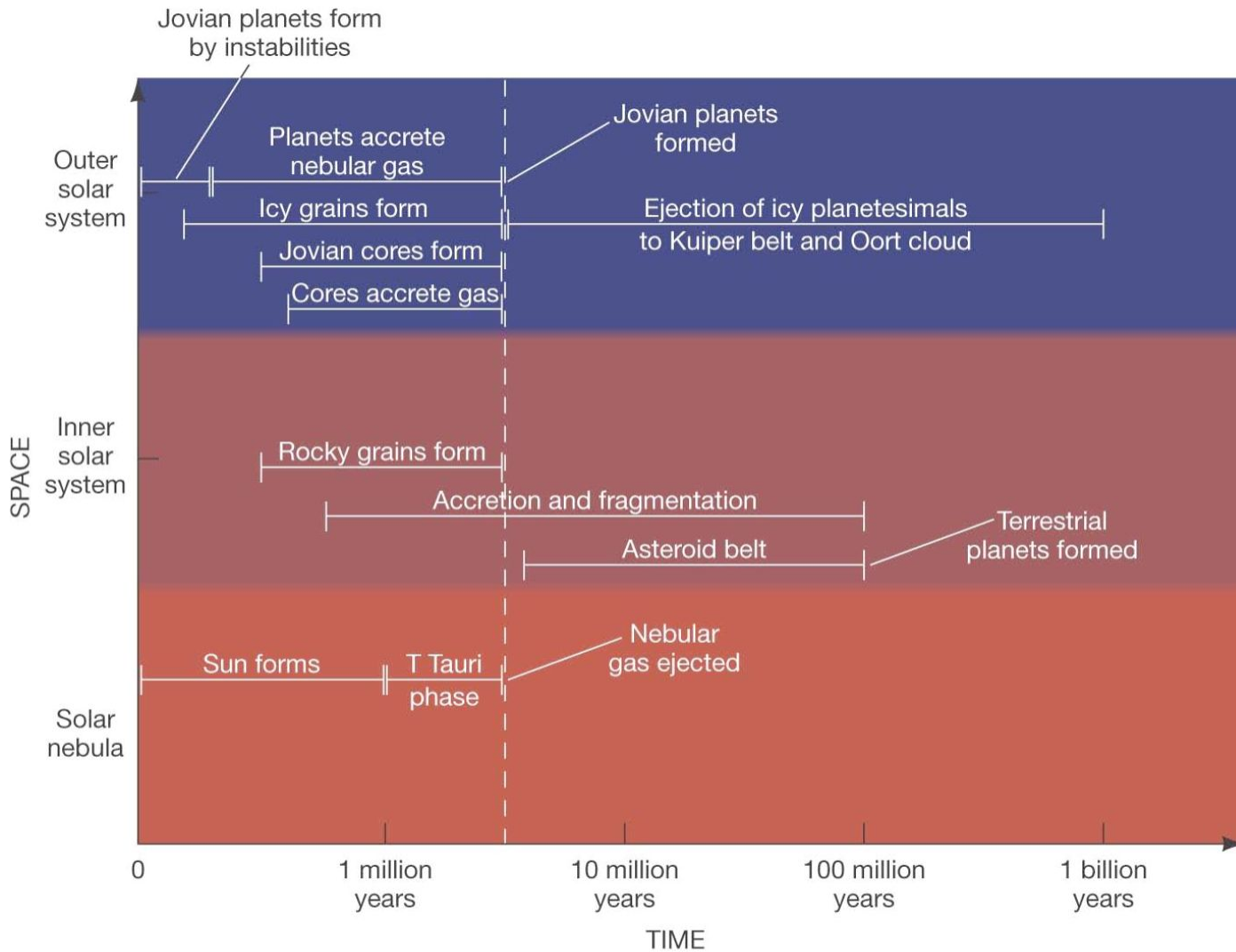
$$R_{Hill} = a \left( \frac{R_{pl}}{3R_{star}} \right)^{1/3}$$

vzdálenost

Hillova sféra - převládne gravitace planety



- Do hr...
- Na po...
- jako h...
- Centr...
- do ok...
- Kond...
- Teres...
- 
- 
- 
- 
- Plynn...
- 
- 
- 

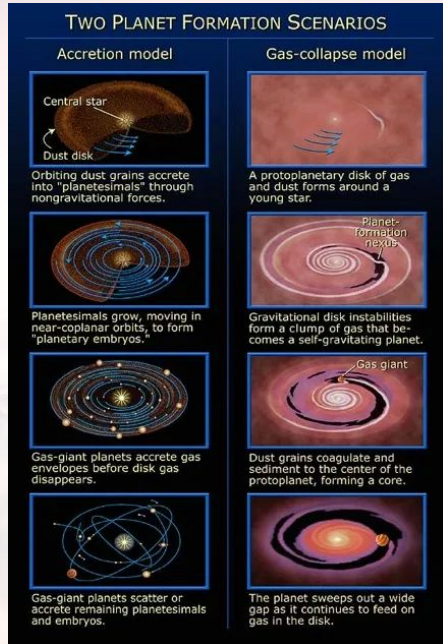


materiálu,  
ná zářit  
odsunuty

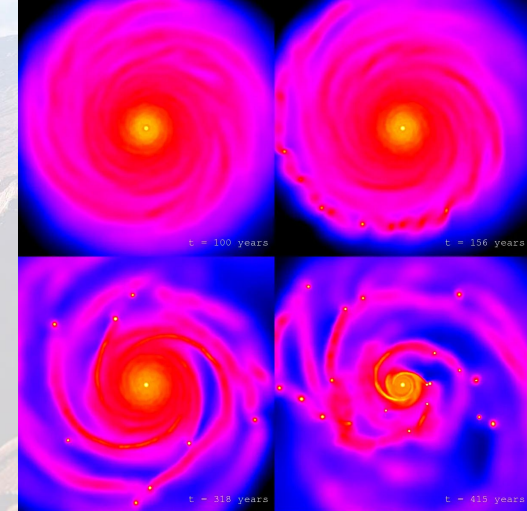
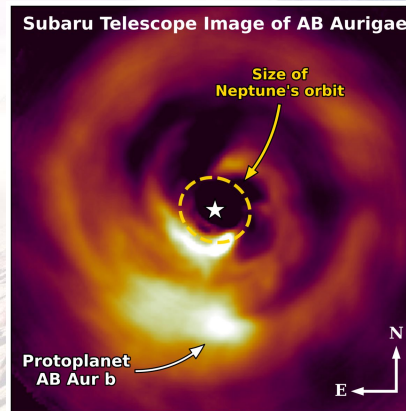


# Vznik planet

- Obří planety mohou vznikat i alternativní cestou přes gravitační nestability v disku



Currie et al. 2022, NatAs, 6, 751



# Vznik planet

- Obří planety mohou vznikat i alternativní cestou přes gravitační nestability v disku

Safronov-Toomreho  
nestabilita:

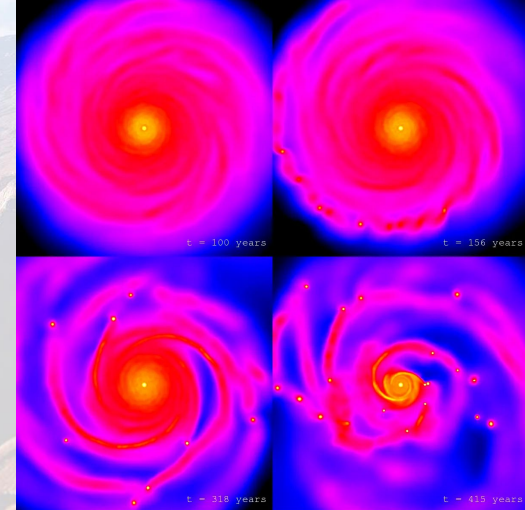
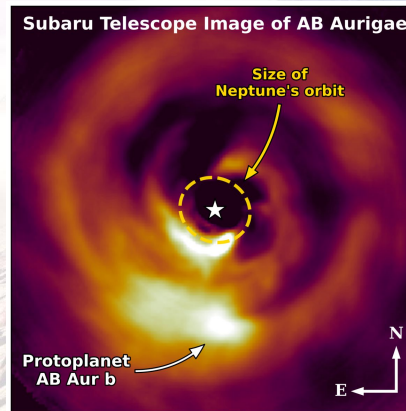
$$Q \equiv \frac{c_s \Omega}{\pi G \Sigma} > Q_{\text{crit}} \simeq 1$$

Pro vzdálenost 10 au:  $c_s \sim 0.5 \text{ km/s}$ .  
Pro  $Q \sim 1$  je  $\Sigma \sim 1500 \text{ g/cm}^2$ , hustota  
materiálu je ale jen  $\Sigma \sim 54 \text{ g/cm}^2$



Tento proces může fungovat jen ve velmi hmotných a hustých discích

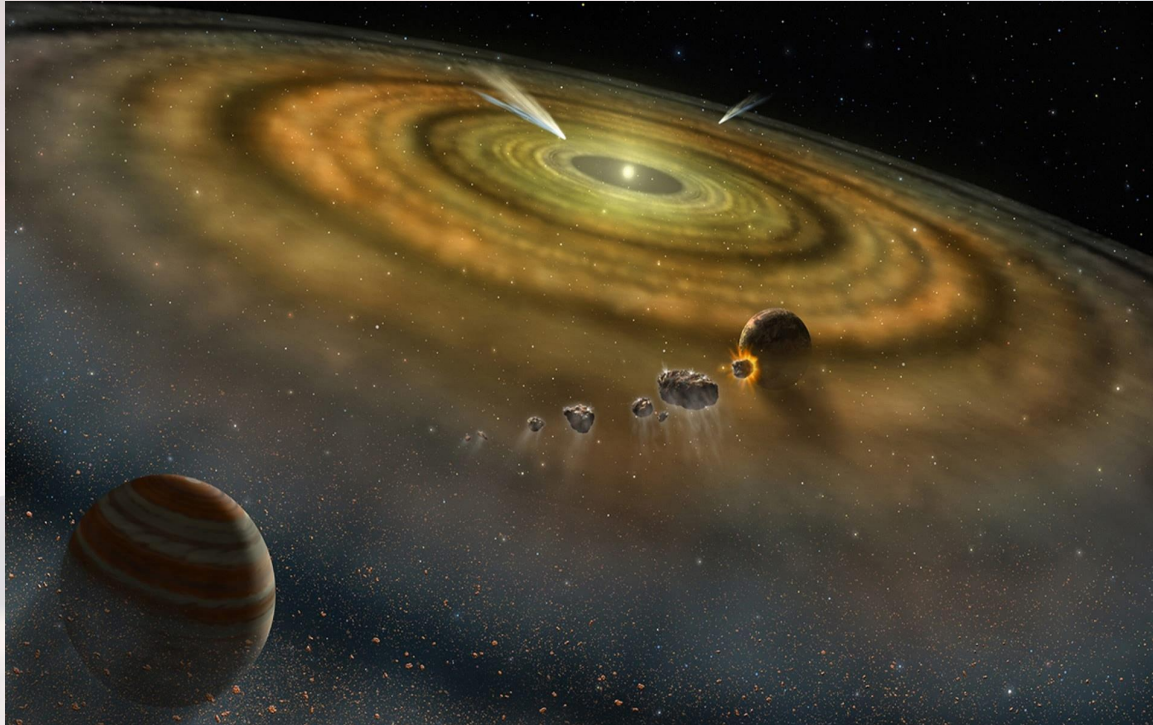
Currie et al. 2022, NatAs, 6, 751





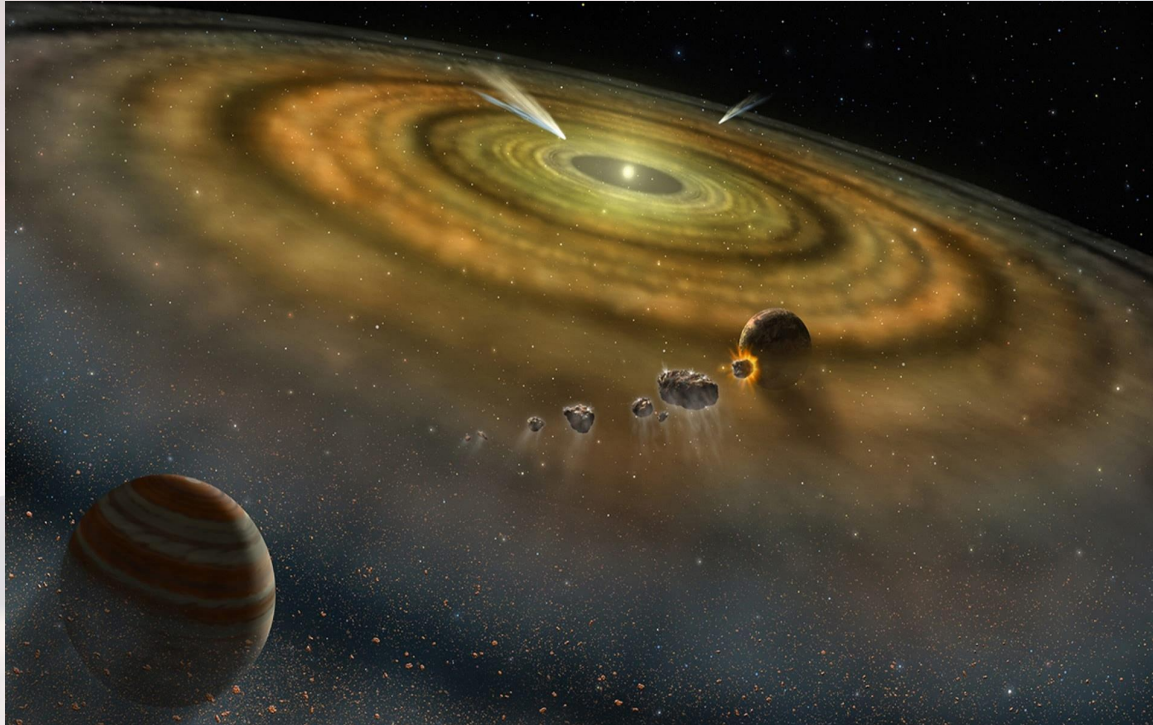
# Vývoj soustav

- Vlivem tření dochází k migraci planetesimál směrem k centru soustavy



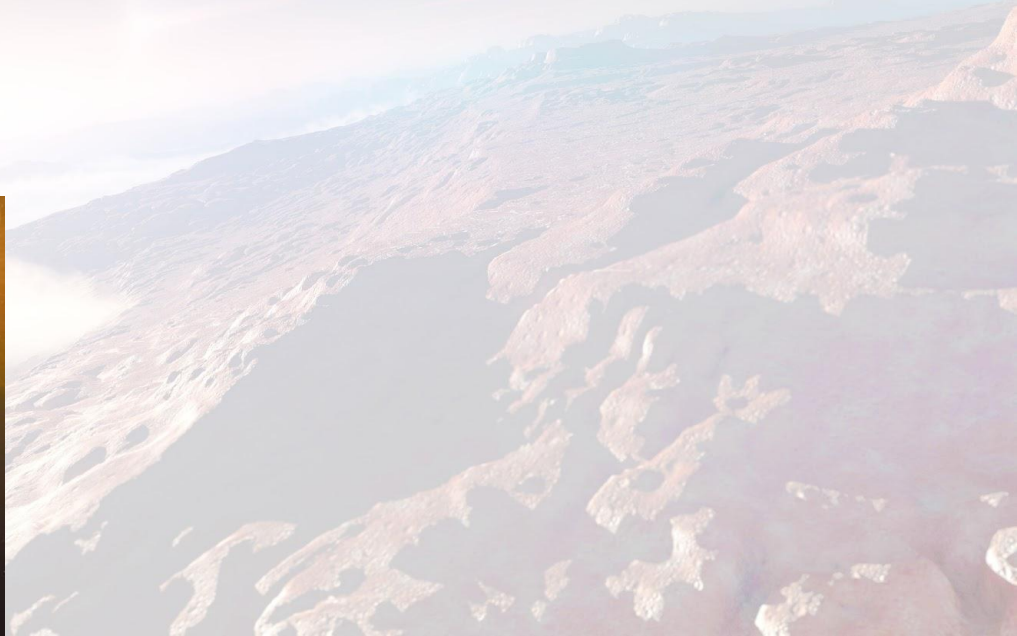
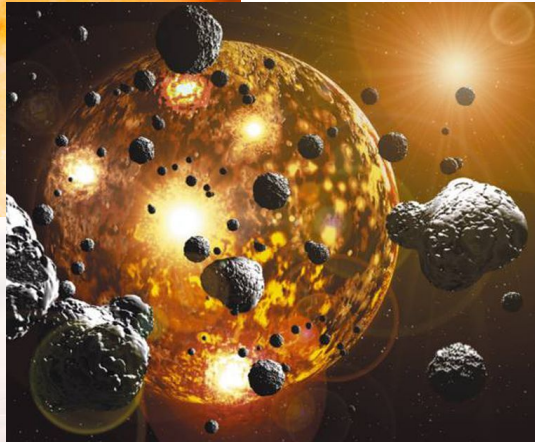
# Vývoj soustav

- Vlivem tření dochází k migraci planetesimál směrem k centru soustavy
- Srážky mohou vést k destrukci či vychylování těles - různý sklon rotačních os planet a jejich oběžných drah, vznik Měsíce



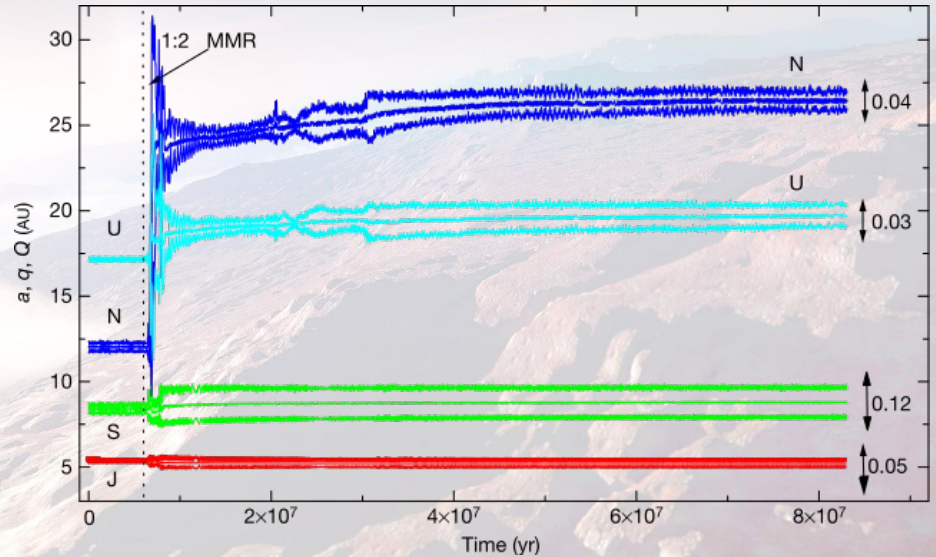
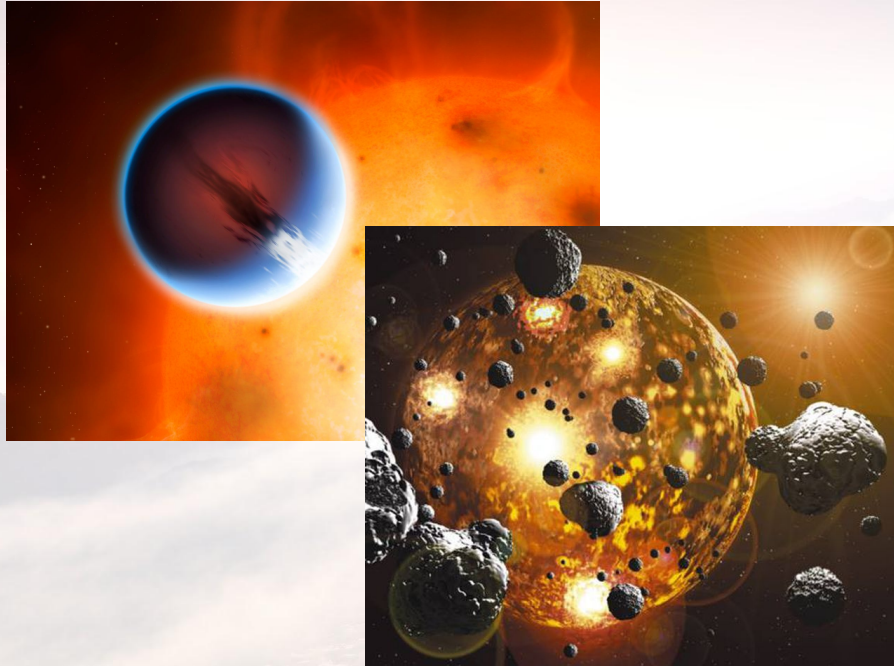
# Vývoj soustav

- Vlivem tření dochází k migraci planetesimál směrem k centru soustavy
- Srážky mohou vést k destrukci či vychylování těles - různý sklon rotačních os planet a jejich oběžných drah, vznik Měsíce
- Gravitační ovlivňování může vést k migraci planet (horcí Jupiteri, prohození drah Uran-Neptun), zachycování těles (měsíce), velkému bombardování



# Vývoj soustav

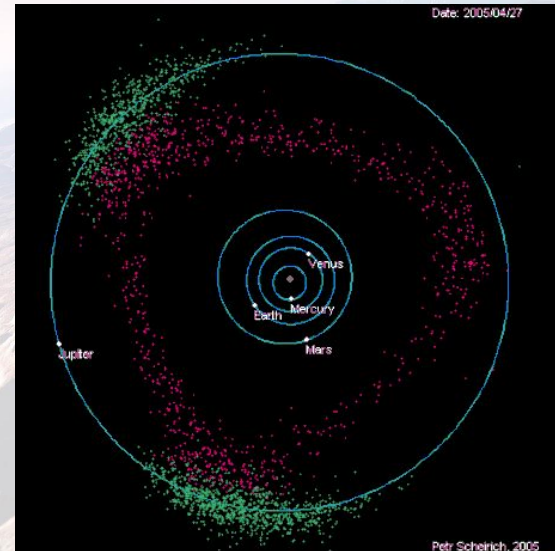
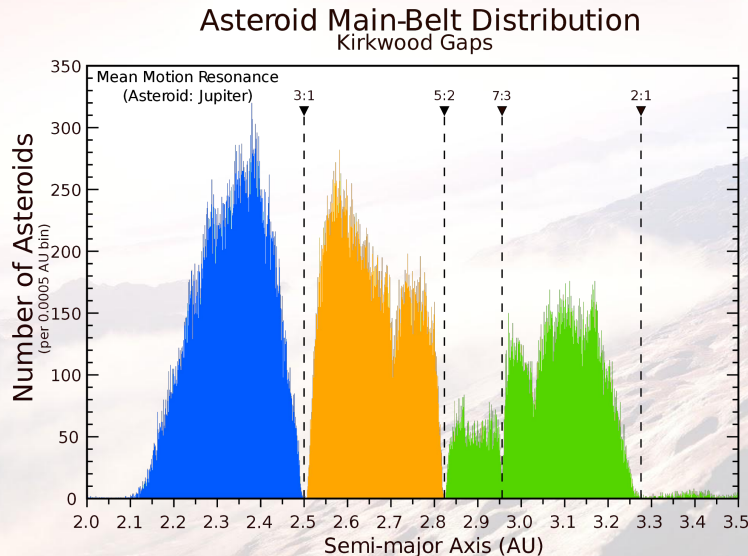
- Vlivem tření dochází k migraci planetesimál směrem k centru soustavy
- Srážky mohou vést k destrukci či vychylování těles - různý sklon rotačních os planet a jejich oběžných drah, vznik Měsíce
- Gravitační ovlivňování může vést k migraci planet (horkí Jupiteri, prohození drah Uran-Neptun), zachycování těles (měsíce), velkému bombardování



Tsiganis et al. 2005, Nature, 435, 26

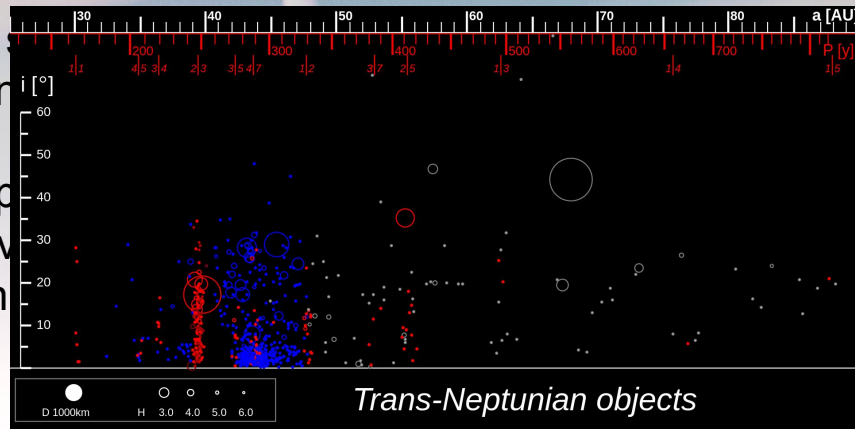
# Vývoj soustav

- Vlivem tření dochází k migraci planetesimál směrem k centru soustavy
- Srážky mohou vést k destrukci či vychylování těles - různý sklon rotačních os planet a jejich oběžných drah, vznik Měsíce
- Gravitační ovlivňování může vést k migraci planet (hročí Jupiteri, prohození drah Uran-Neptun), zachycování těles (měsíce), velkému bombardování
- Rezonance mohou vést k migraci či uzamknutí těles na určitých drahách (pás asteroidů, Trojané)

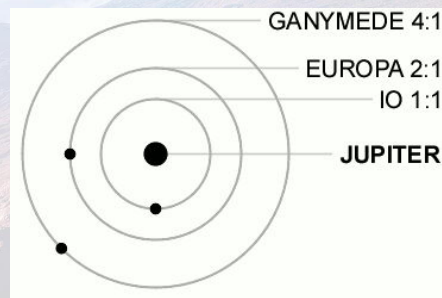
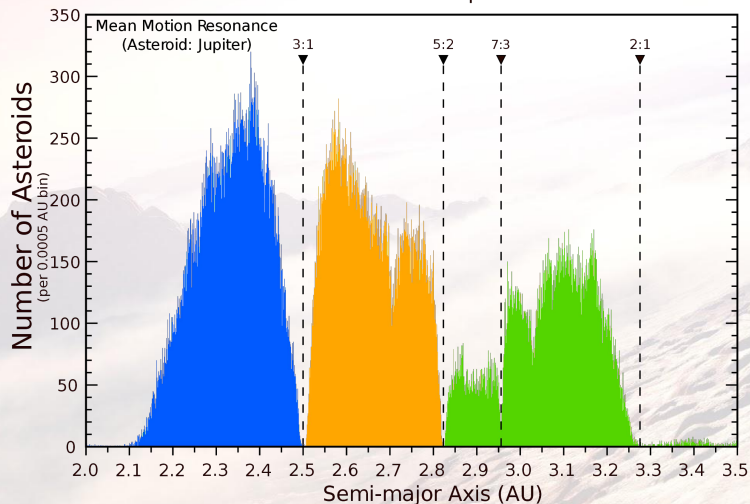


# Vývoj soustav

- Vlivem tření dochází k migraci planetesimál
- Srážky mohou vést k destrukci či vychylování oběžných drah, vznik Měsíce
- Gravitační ovlivňování může vést k migraci planet (Uran-Neptun), zachycování těles (měsíce), v
- Rezonance mohou vést k migraci či uzamknutí (Trojané)



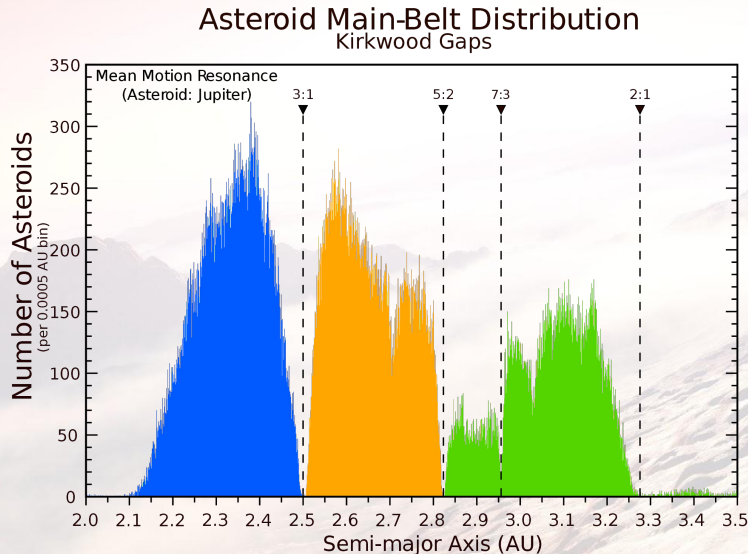
Asteroid Main-Belt Distribution  
Kirkwood Gaps



Proč jsou některé dráhy stabilní a jiné ne?

# Vývoj soustav

- Vlivem tření dochází k migraci planetesimál směrem k centru soustavy
- Srážky mohou vést k destrukci či vychylování těles - různý sklon rotačních os planet a jejich oběžných drah, vznik Měsíce
- Gravitační ovlivňování může vést k migraci planet (horcí Jupiteri, prohození drah Uran-Neptun), zachycování těles (měsíce), velkému bombardování
- Rezonance mohou vést k migraci či uzamknutí těles na určitých drahách (pás asteroidů, Trojané)



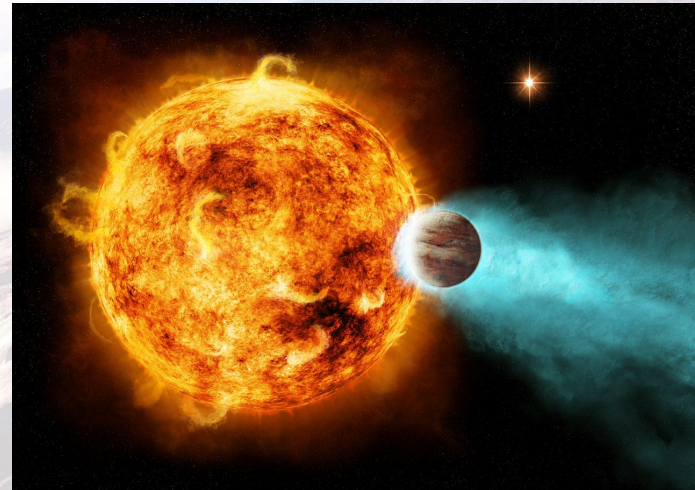
Co hraje roli:

- Kompaktnost systému
- Excentricita dráhy
- Velikost přiblížení
- Blízkost rezonance s jiným tělesem

Proč jsou některé dráhy stabilní a jiné ne?

# Vývoj soustav

- Vlivem tření dochází k migraci planetesimál směrem k centru soustavy
- Srážky mohou vést k destrukci či vychylování těles - různý sklon rotačních os planet a jejich oběžných drah, vznik Měsíce
- Gravitační ovlivňování může vést k migraci planet (horcí Jupiteri, prohození drah Uran-Neptun), zachycování těles (měsíce), velkému bombardování
- Rezonance mohou vést k migraci či uzamknutí těles na určitých drahách (pás asteroidů, Trojané)
- Blízké hvězdy mohou odfouknout atmosféry planet (např. HD 209458 b)





# Otázky k řešení

- Proč je uspořádání planet Sluneční soustavy (SS) jaké je?
- Je skutečně SS výjimečná ve srovnání s ostatními soustavami?
- Proč jsou takové rozdíly mezi planetami?
- Proč je rozdílné chemické složení planet SS i jejich stavba?
- Proč se obří plynné planety SS nacházejí dále než terestrické planety?
- Proč jsou dráhy velkých těles SS téměř kruhové?
- Proč obíhají všechna tělesa SS zhruba ve stejné rovině?
- Proč planety obíhají ve stejném smyslu?
- Proč jsou rotační osy některých planet SS skloněny a jiných ne?
- Jak vznikají horcí Jupiteri a proč je nemáme ve SS?
- Proč nejsou žádné planety uvnitř Merkurovy dráhy?
- Co definuje horní mez hmotnosti konkrétní planety?
- Proč nejsou známy planety větší a hmotnější než Země v určité vzdálenosti od mateřské hvězdy?
- Proč je více planet u hvězd s vyšší metalicitou?
- Jak moc ovlivňují naše metody naše výsledky?

# Otázky k řešení

- Proč je uspořádání planet Sluneční soustavy (SS) jaké je?
- Je skutečně SS výjimečná ve srovnání s ostatními soustavami?
- Proč jsou takové rozdíly mezi planetami?
- Proč je rozdílné chemické složení planet SS i jejich stavba?
- Proč se obří plynné planety SS nacházejí dále než terestrické planety?
- Proč jsou dráhy velkých těles SS téměř kruhové?
- Proč obíhají všechna tělesa SS zhruba ve stejné rovině?
- Proč planety obíhají ve stejném smyslu?
- Proč jsou rotační osy některých planet SS skloněny a jiných ne?
- Jak vznikají horcí Jupiteri a proč je nemáme ve SS?
- Proč nejsou žádné planety uvnitř Merkurovy dráhy?
- Co definuje horní mez hmotnosti konkrétní planety?
- Proč nejsou známy planety větší a hmotnější než Země v určité vzdálenosti od mateřské hvězdy?
- Proč je více planet u hvězd s vyšší metalicitou?
- Jak moc ovlivňují naše metody naše výsledky?