

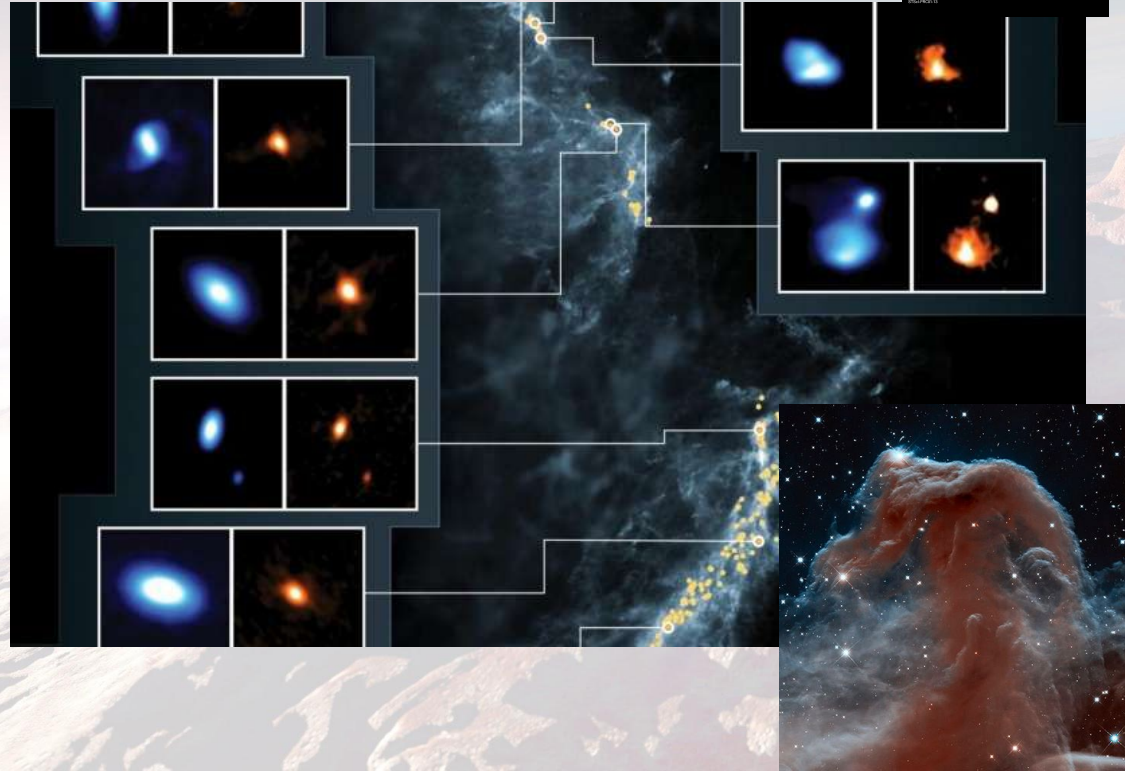
# F7514 Exoplanety

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

Marek Skarka

# Kolaps mezihvězdného mračka

- Hvězdy vznikají v obřích molekulových mračcích



# Kolaps mezihvězdného mračna

- Hvězdy vznikají v obřích molekulových mračnách

$$2K + U = 0$$

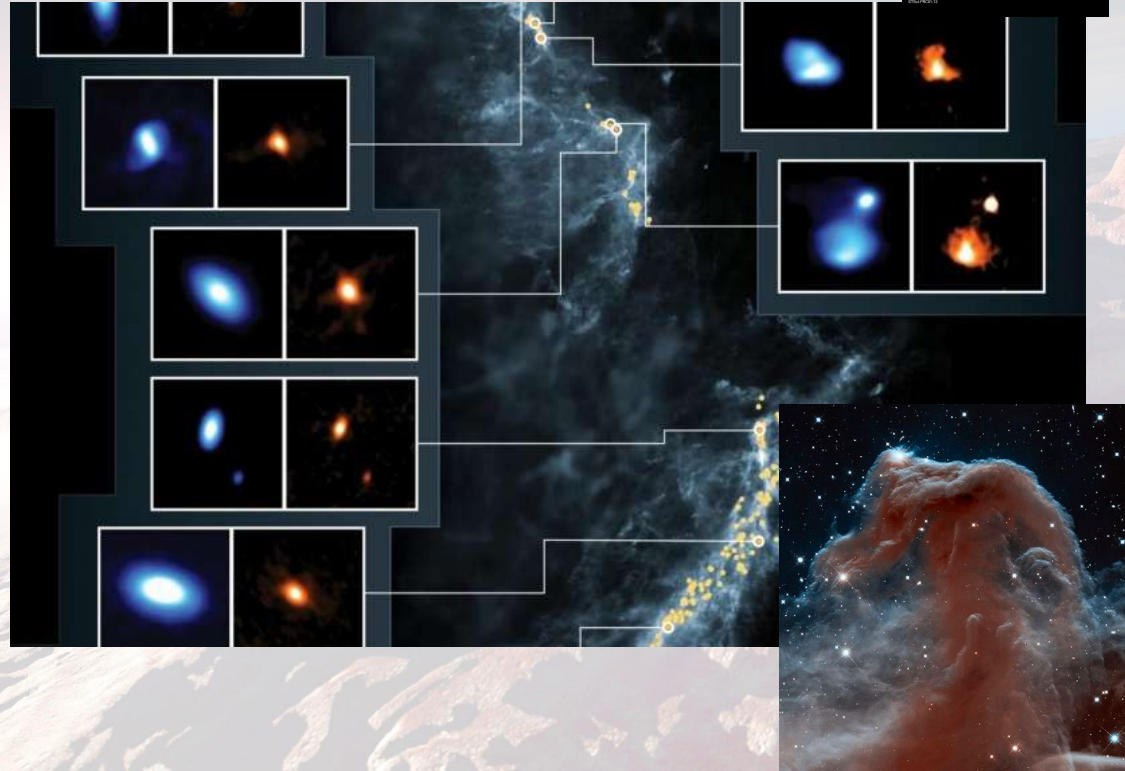
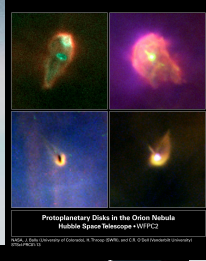
$$U \sim -\frac{3}{5} \frac{GM^2}{R} \quad K = \frac{3}{2} NkT = \frac{3}{2} \frac{M}{\bar{m}} kT$$

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

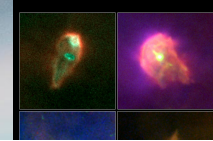
$$\rho > \frac{3}{4\pi M^2} \left( \frac{5kT}{G\bar{m}} \right)^3 \equiv \rho_J$$

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

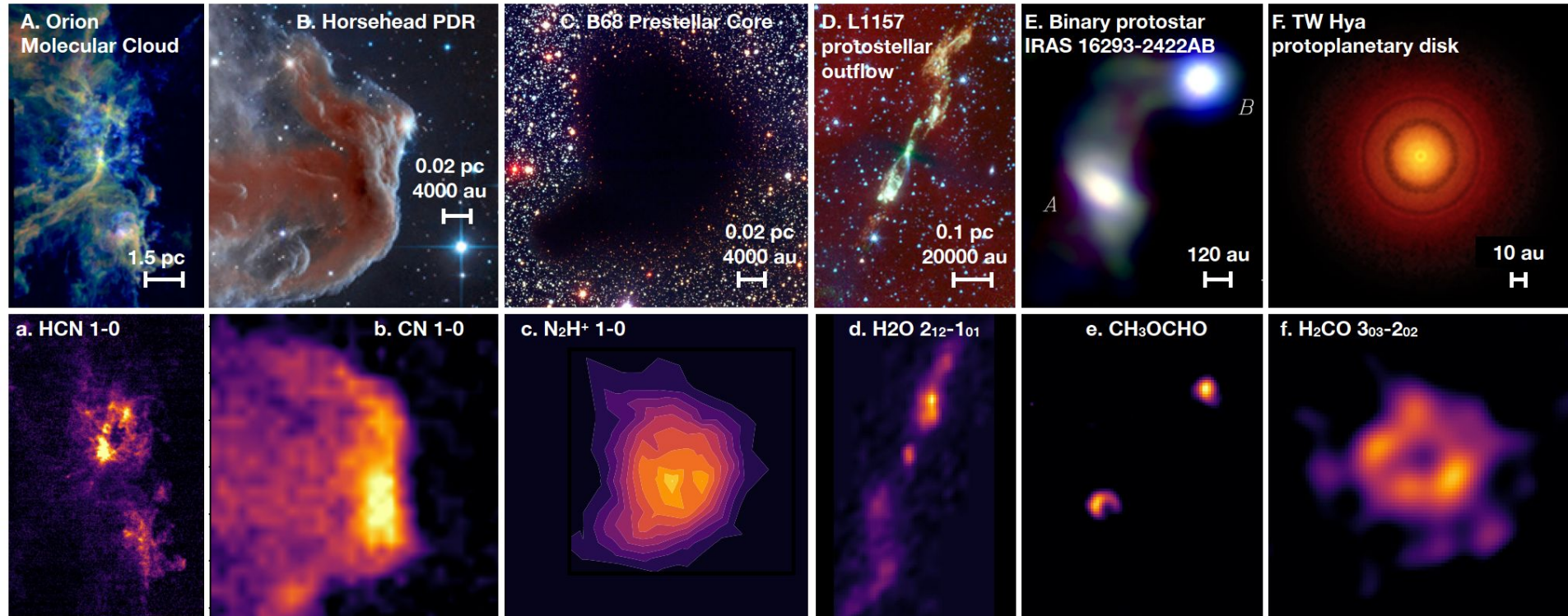
Pro  $T \sim 20 \text{ K}$  a  $n \sim 100 \text{ cm}^{-3}$  je  $M \sim 1000 M_{\odot}$



# Kolaps mezihvězdného mračka

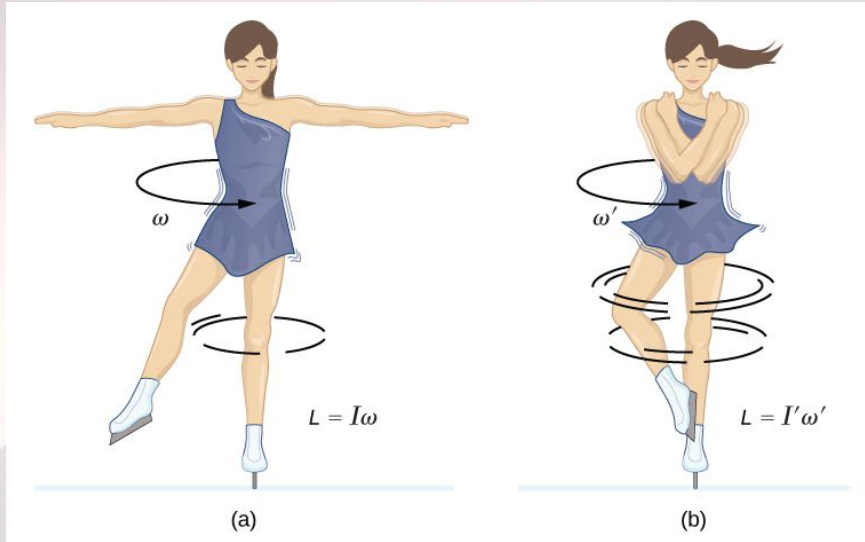


- Hvězdy vznikají v obřích molekulových mračcích

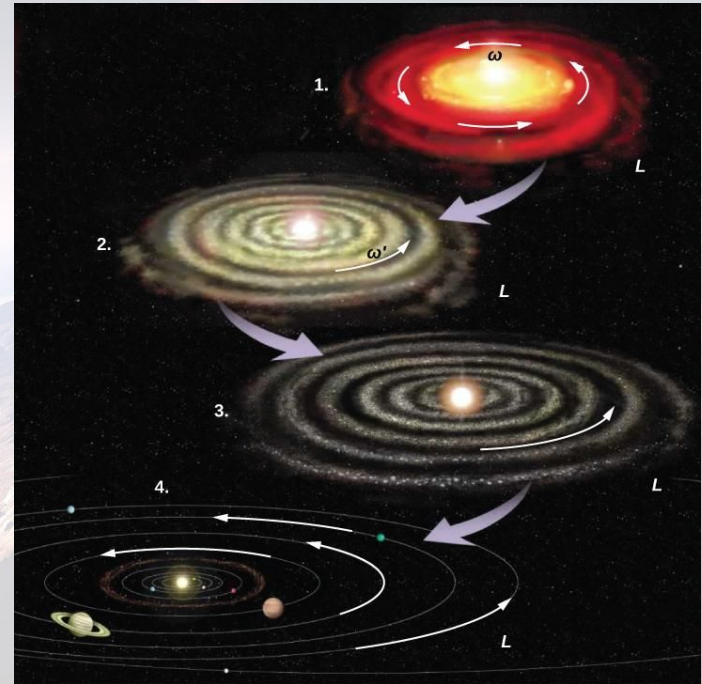


# Kolaps mezihvězdného mračna

- 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 přisunu hmoty do centrálních oblastí



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

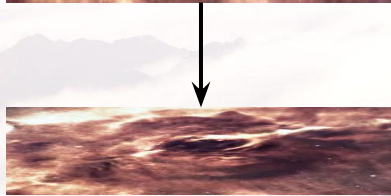


# Kolaps mezihvězdného mračna

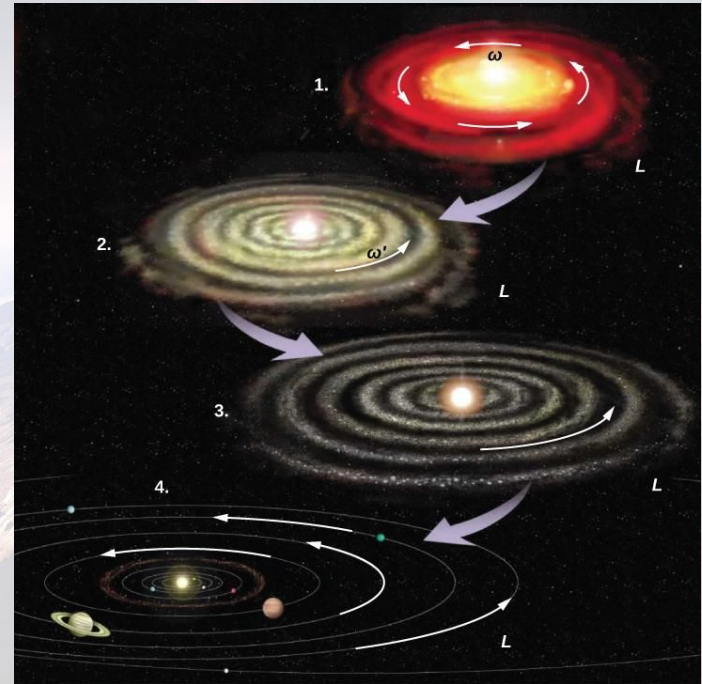
- Do centrálních oblastí padá volným pádem hmota, oblast se stává neprůhlednou a zahřívá se
- Mrak se při smršťování roztáčí díky zákonu zachování momentu hybnosti -> vznik disku, zpomalení přísunu hmoty do centrálních oblastí



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

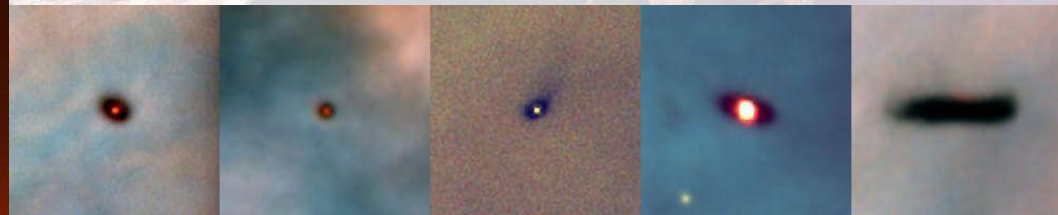
TW HYDRAE

ELIAS 2-27

Specimens exhibiting rings, gaps, & spirals

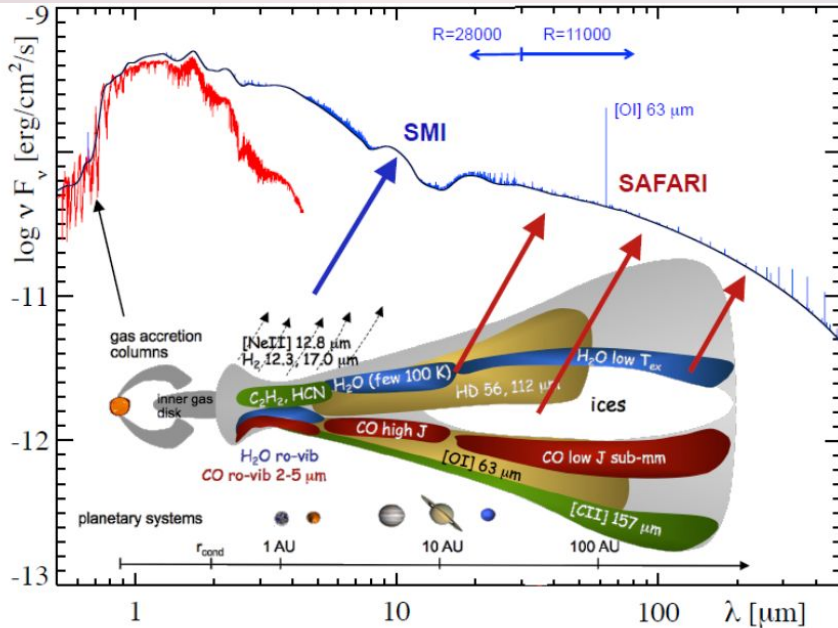
# hvězdného mračka

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



# Vznik planet I - akrece

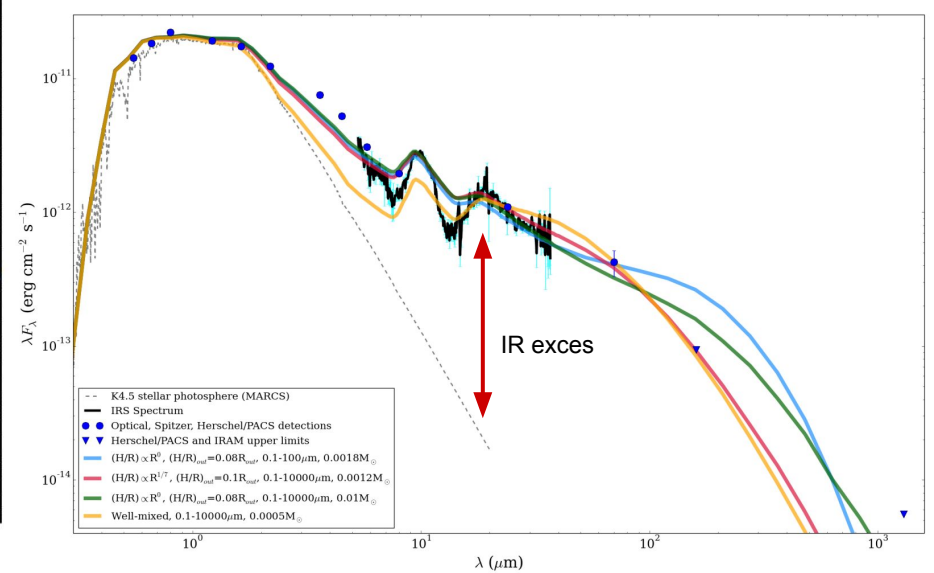
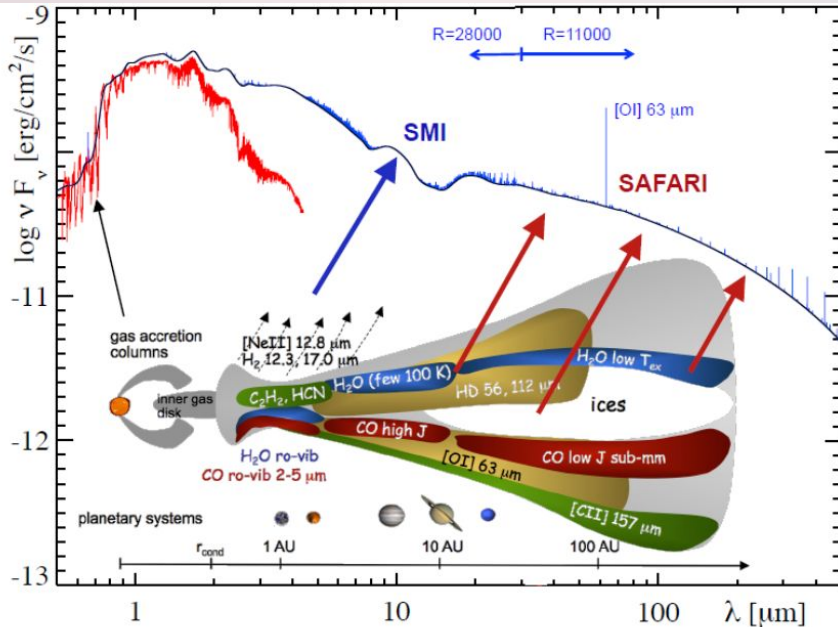
- Do hry vstupují gravitace, odstředivé síly, gradient tlaku, magnetická pole, viskozita materiálu, později srážky a gravitační ovlivňování těles navzájem, migrace.
- Na póly hvězdy padá materiál, vznikají výtrysky z disku ve směru pólů, hvězda začíná zářit jako hvězda typu T Tau - infračervený exces.





# Vznik planet I - akrece

- 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.



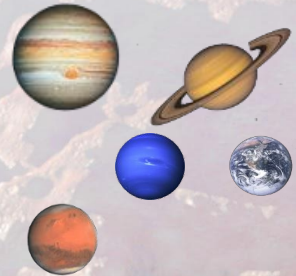
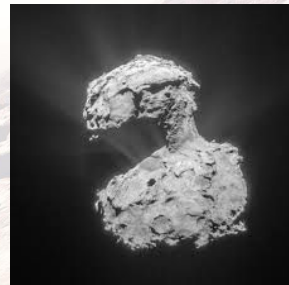
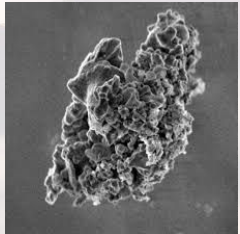
# Vznik planet I - akrece

- 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 I - akrece

- 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

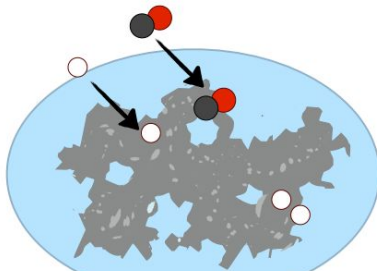


# Vznik planet I - akrece

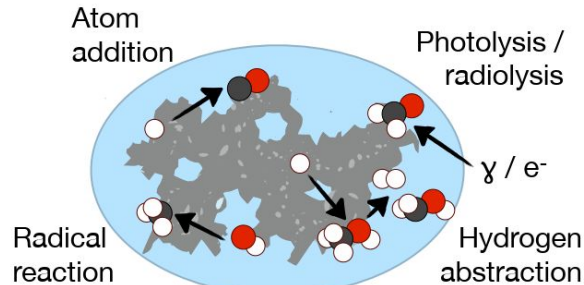
- Do hry vstupují gravitace, odstředivé síly, gradient tlaku, magnetická pole, viskozita materiálu, později srážky a gravitační ovlivňování těles navzájem, migrace.
- Na póly hvězdy padá materiál, vznikají výtrysky z disku ve směru pólů, hvězda začíná zářit jako hvězda typu T Tau - infračervený exces.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



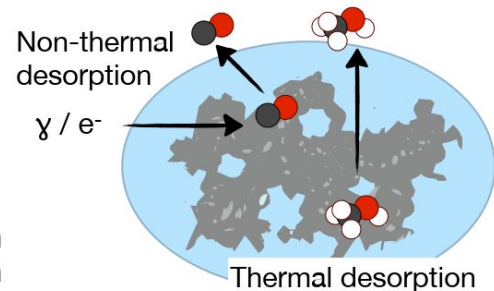
Freeze-out / adsorption



Grain surface and ice chemistry

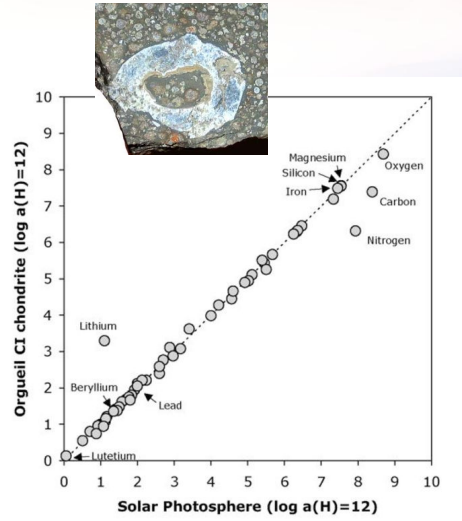
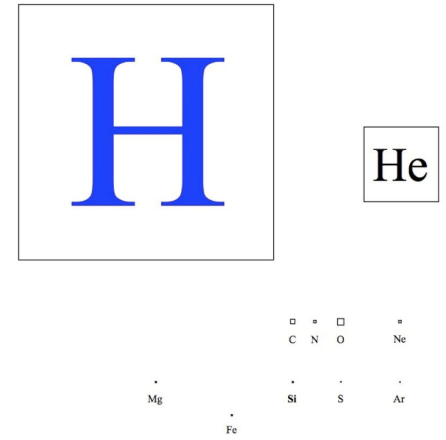


Ice sublimation / desorption

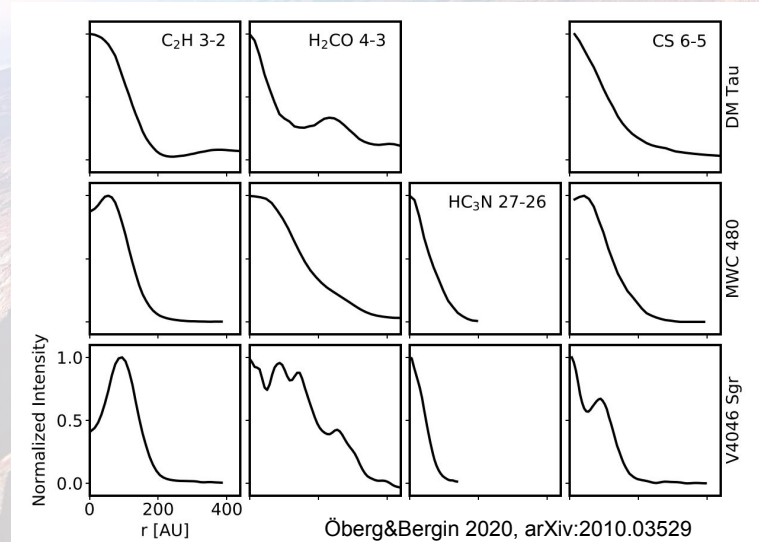


# Vznik planet I - akrece

- 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

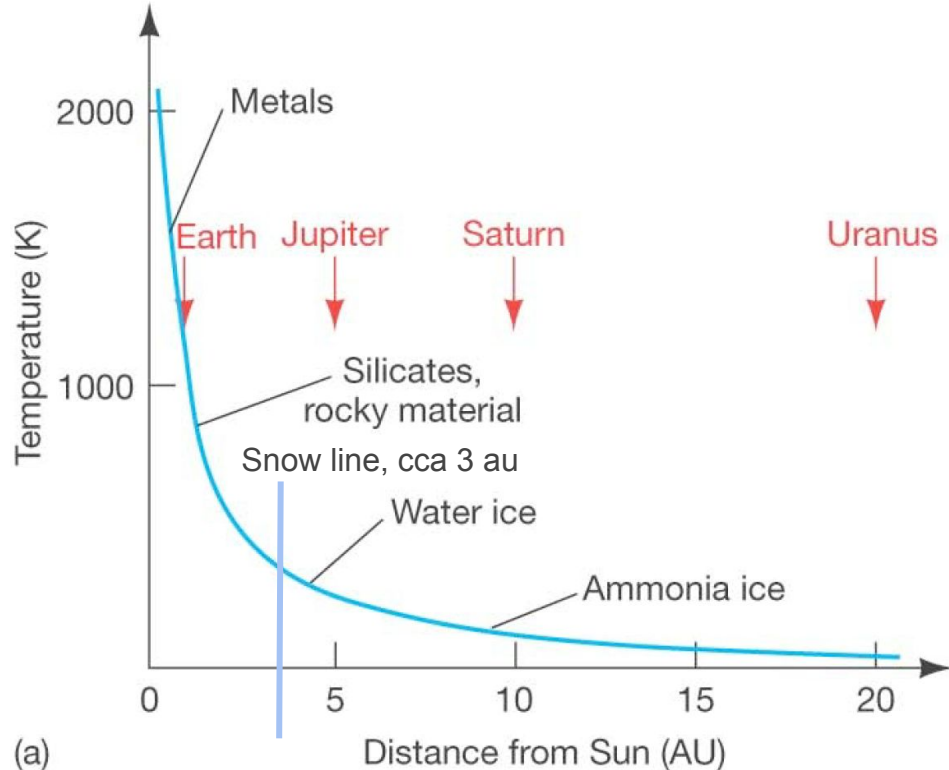


V disku i složitější molekuly



# Vznik planet I - akrece

- Do hry vstupují gravitace, odstředivé síly, gradient tlaku, magnetická pole, viskozita materiálu, později srážky a gravitační ovlivňování těles navzájem, migrace
- Na póly hvězdy p... jako hvězda typu
- Centrální horké c... do okrajových částí
- Kondenzují prvni



(a)

, hvězda začíná zářit  
ů, které jsou odsunuty

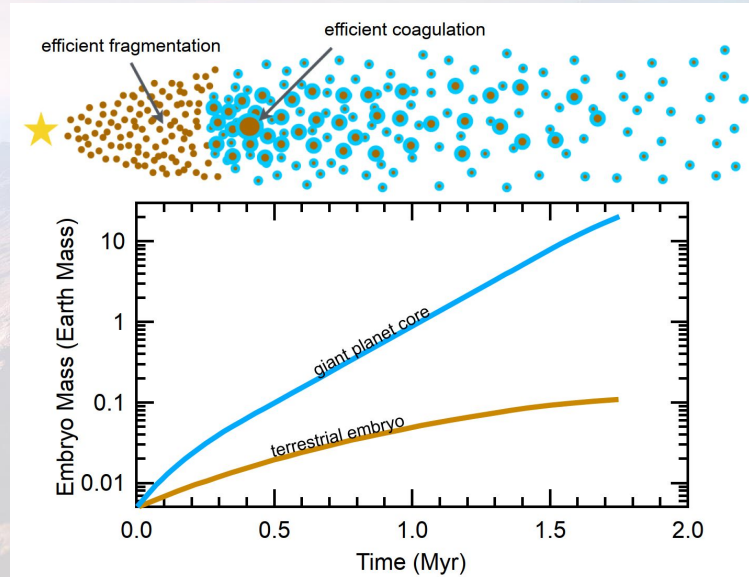
# Vznik planet I - akrece

- 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

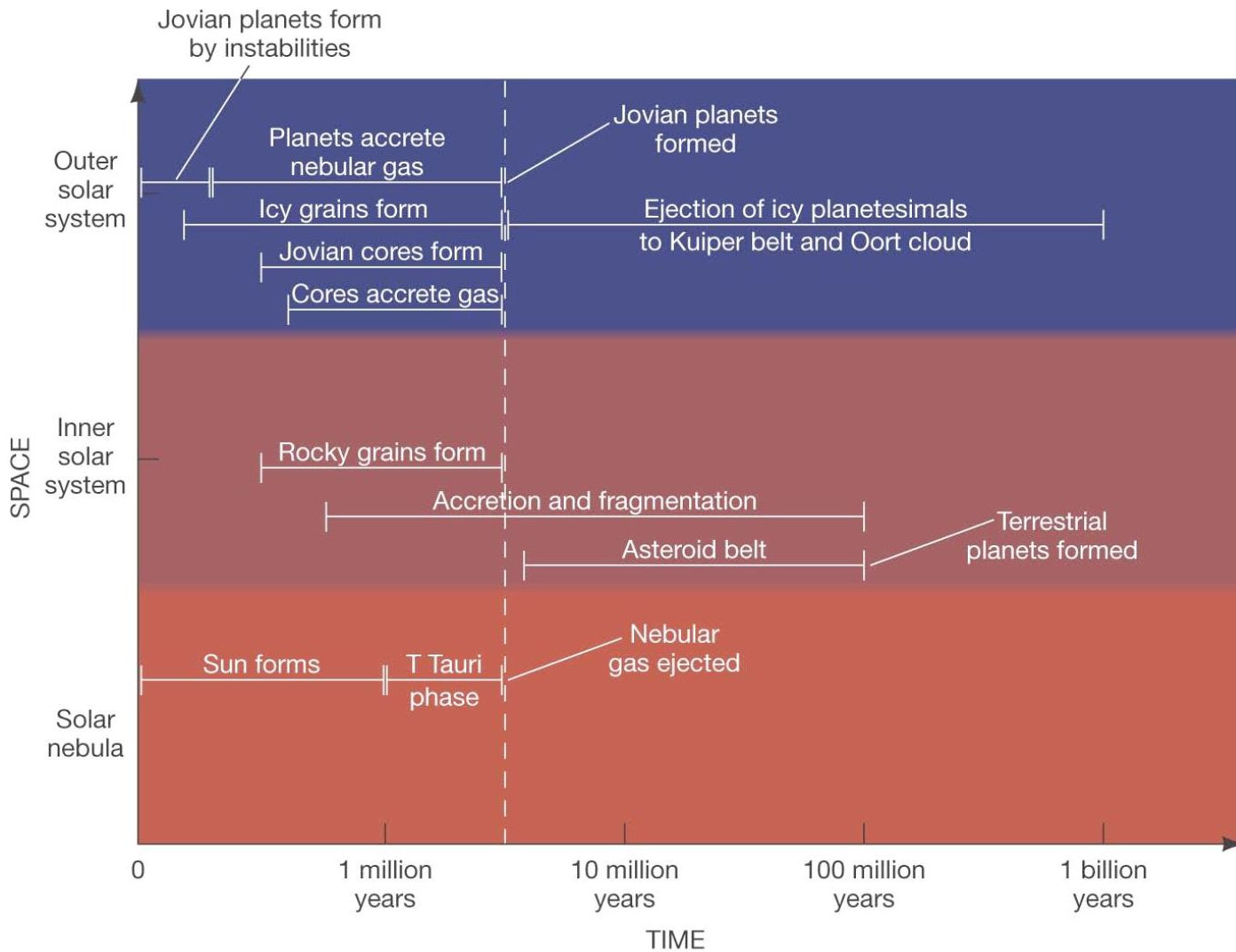
vzdálenost

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

Hillova sféra - převládne gravitace planety



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



materiálu,  
ná zářit  
odsunuty





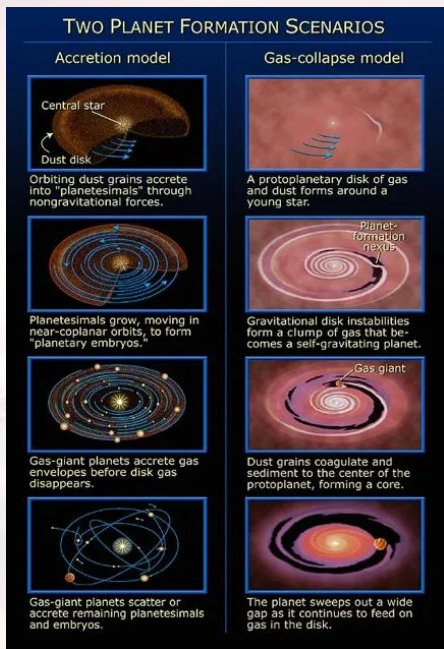
# Vznik planet II - gravitační nestabilita

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

Safronov-Toomreho  
nestabilita:

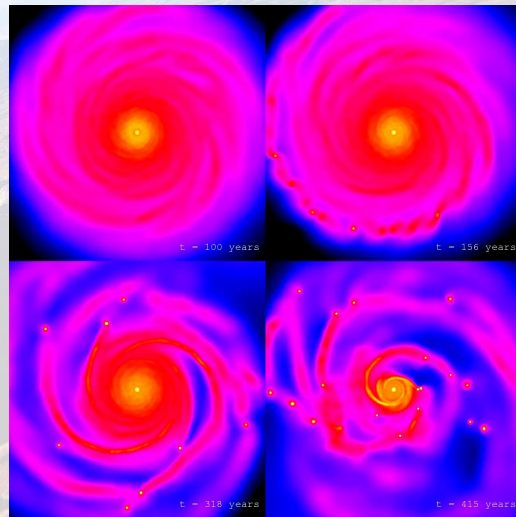
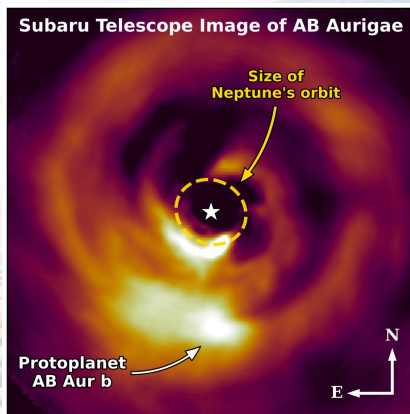
$$Q \equiv \frac{c_s \Omega}{\pi G \Sigma} > Q_{\text{crit}} \simeq 1$$

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  $\Sigma \sim 54 \text{ g/cm}^{-2}$



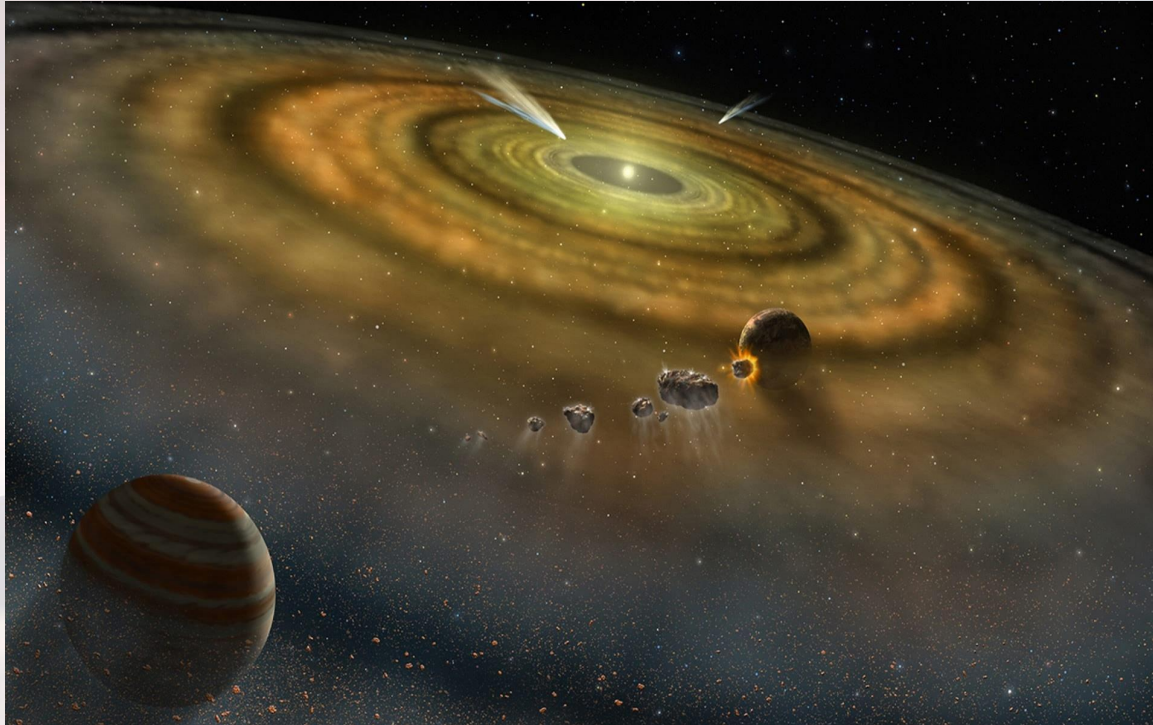
Tento proces může fungovat jen ve velmi hmotných a hustých discích

Currie et al. 2022, NatAs, 6, 751



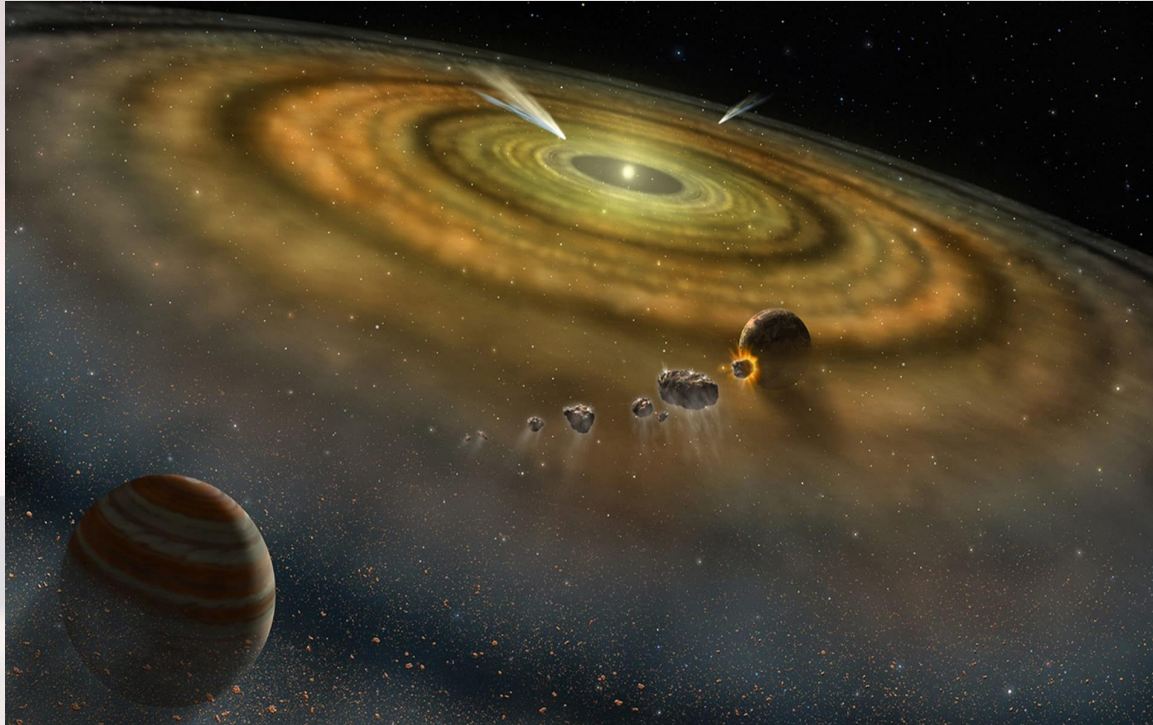
# Vývoj soustav

- Vlivem tření dochází k migraci planetesimál směrem k centru soustavy



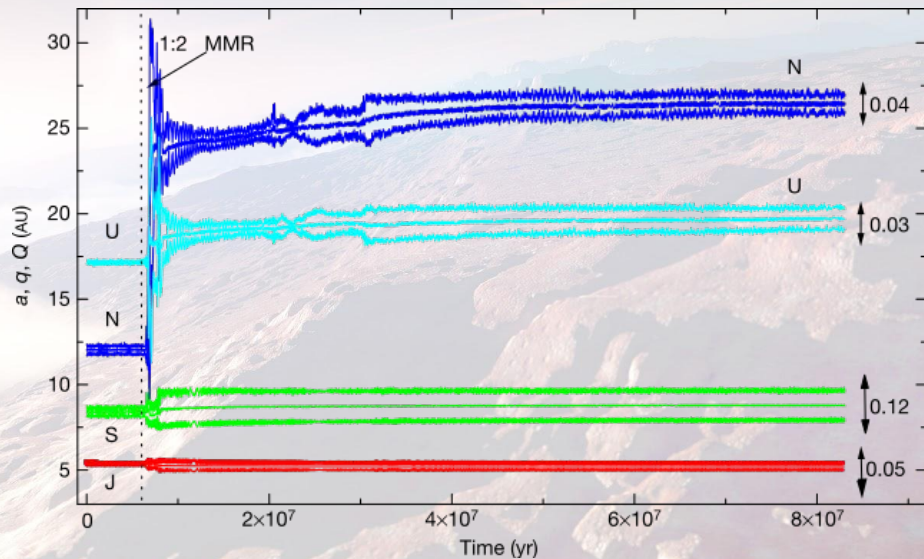
# Vývoj soustav

- 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

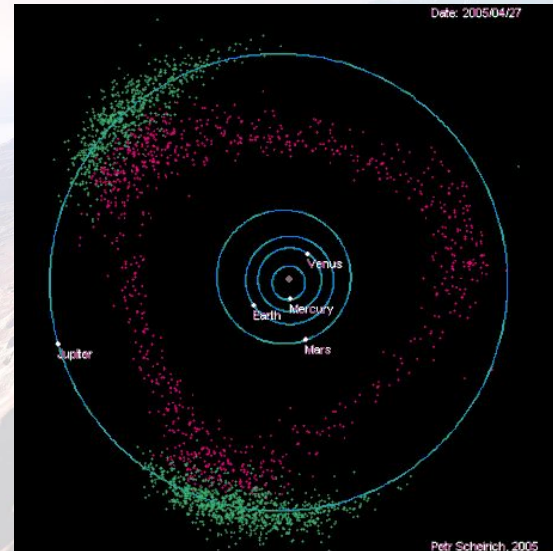
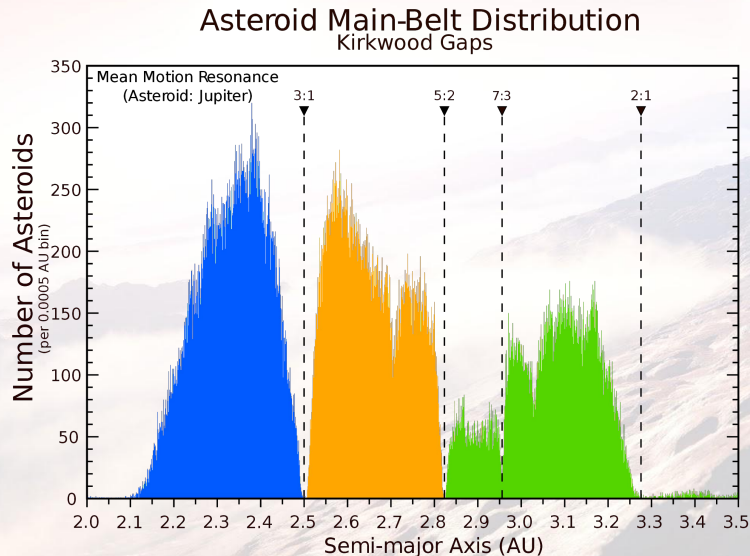
- Vlivem tření dochází k migraci planetesimál směrem k centru soustavy
- Srážky mohou vést k destrukci či vychylování těles - různý sklon rotačních os planet a jejich oběžných drah, vznik Měsíce
- Gravitační ovlivňování může vést k migraci planet (horkí Jupiteri, prohození drah Uran-Neptun), zachycování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



Tsiganis et al. 2005, Nature, 435, 26

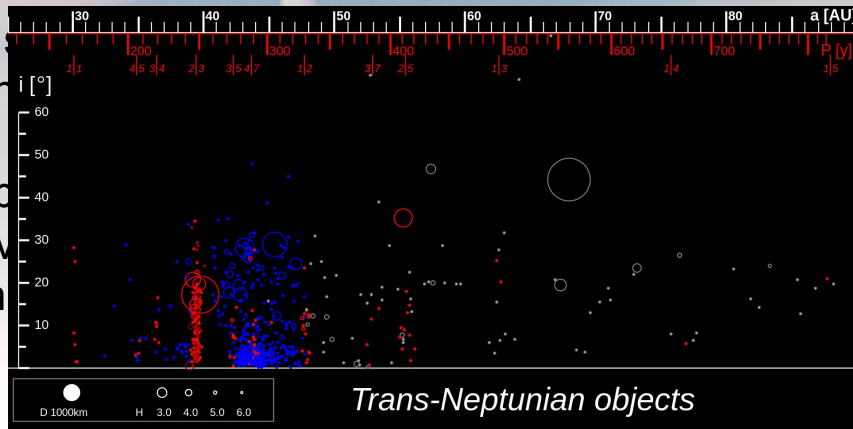
# Vývoj soustav

- 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 (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)

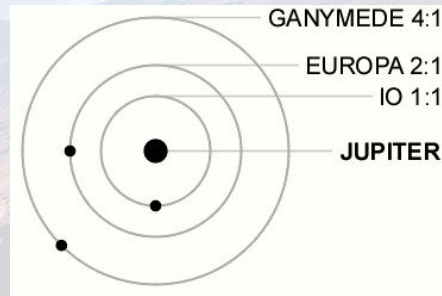
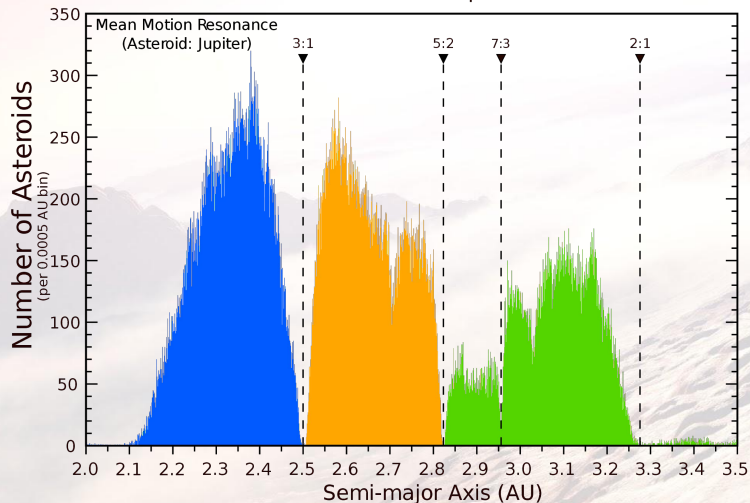


# Vývoj soustav

- 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)



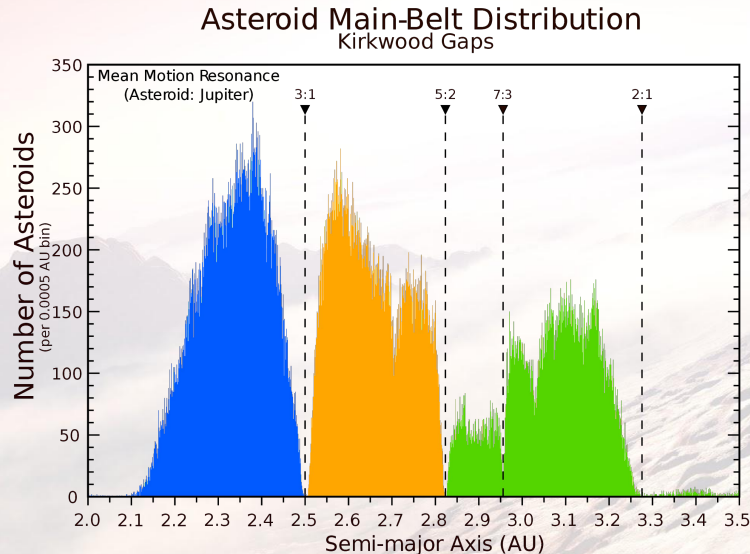
Asteroid Main-Belt Distribution  
Kirkwood Gaps



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)



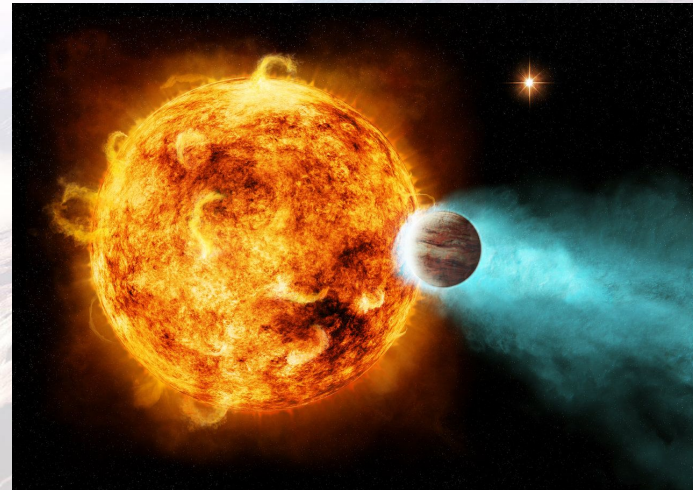
Co hraje roli:

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

Proč jsou některé dráhy stabilní a jiné ne?

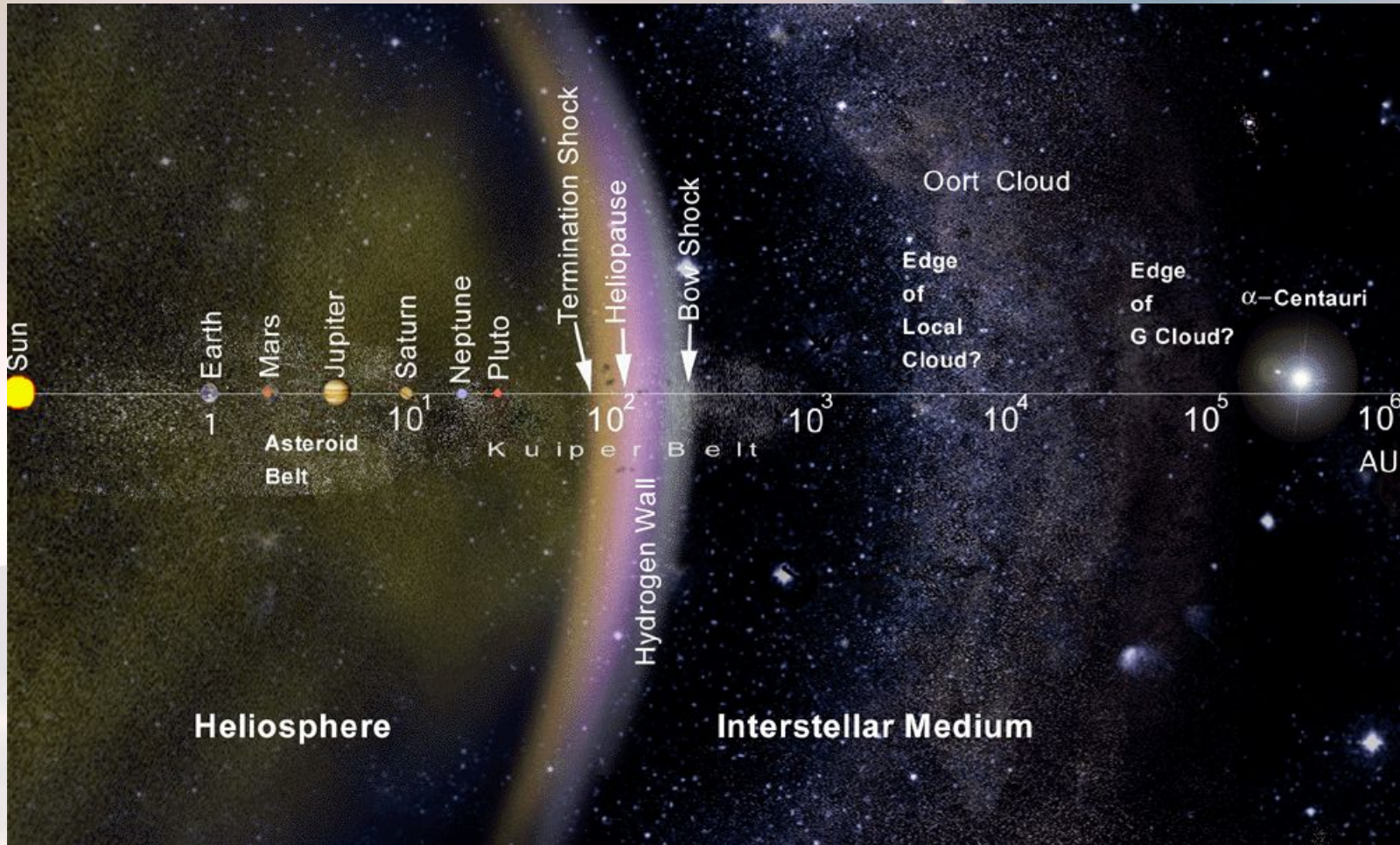
# Vývoj soustav

- 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)

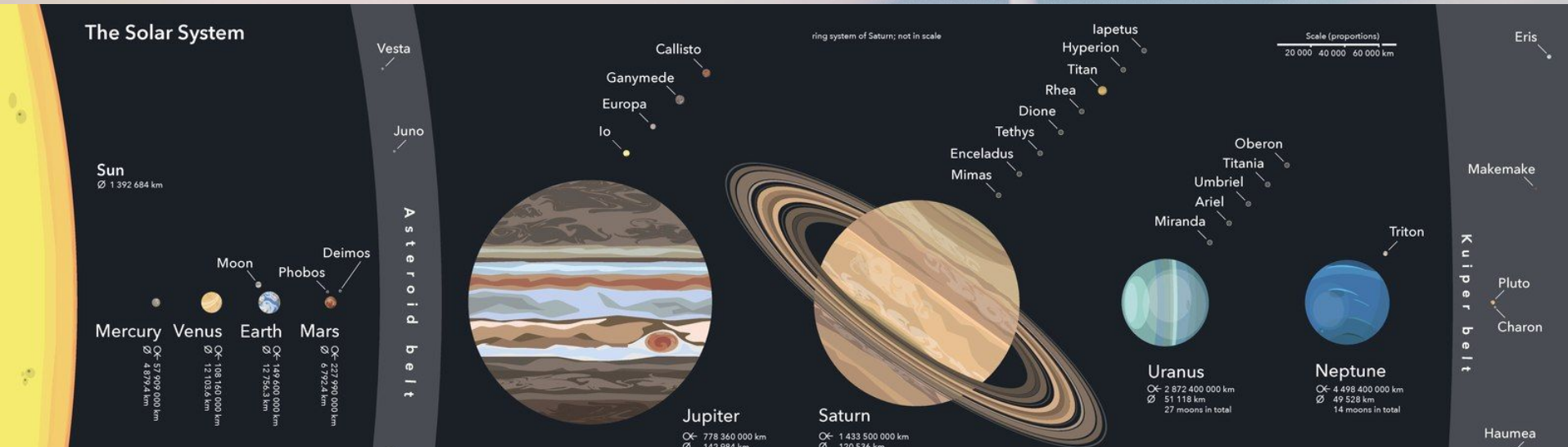




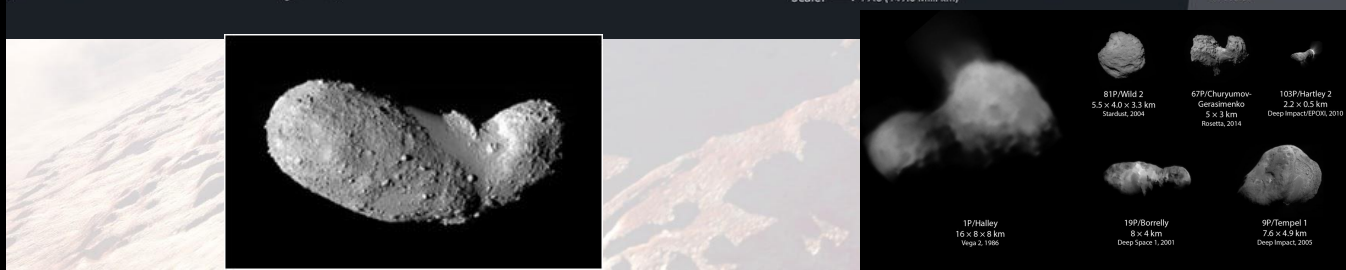
# Sluneční soustava



# Sluneční soustava

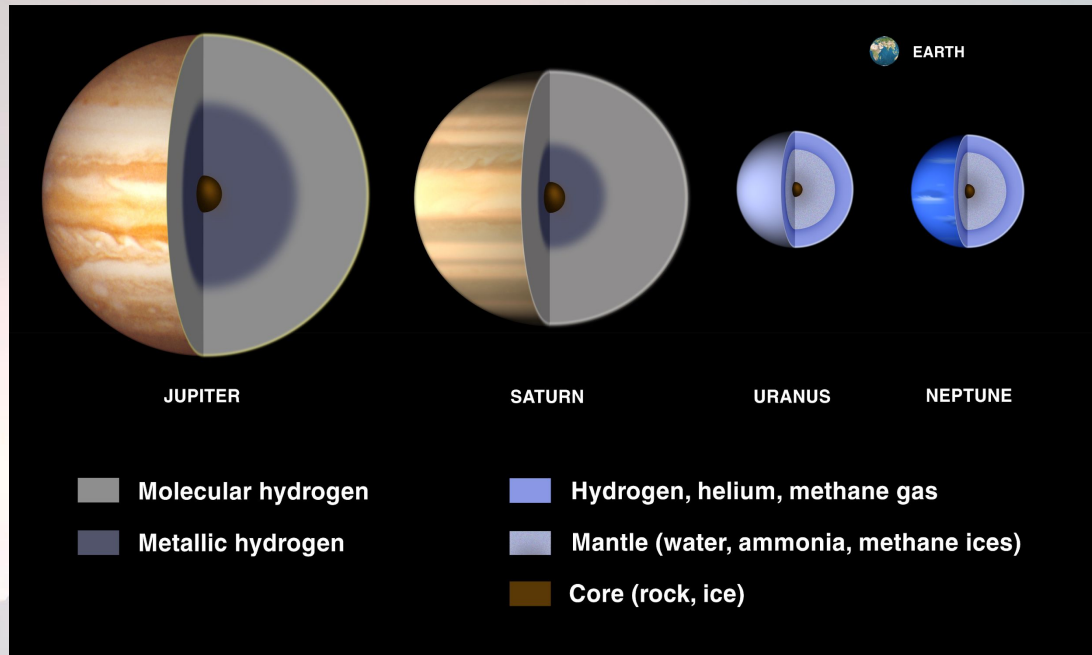


## Largest known trans-Neptunian objects (TNOs)

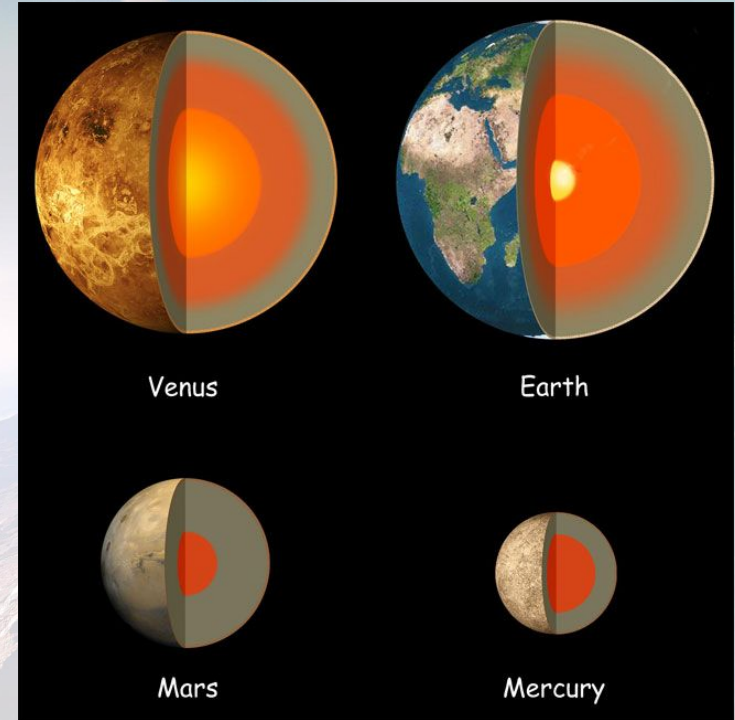


The major dwarf planets (including the biggest moon of Pluto); in scale.

# Sluneční soustava



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

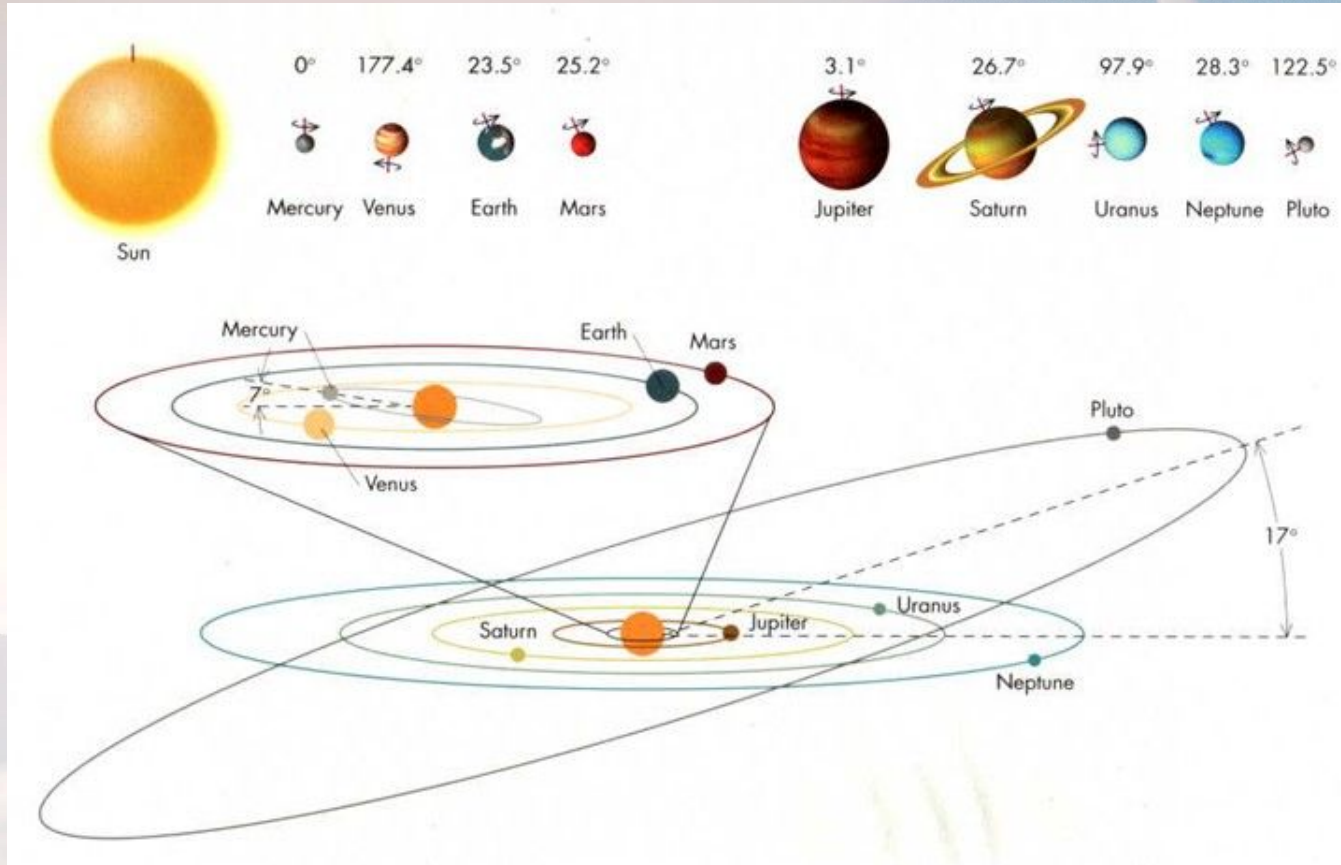


Jádro z prvků skupiny železa  
+ obal z těžších sloučenin

# 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



Planety obíhají zhruba v jedné rovině a ve stejném smyslu

Planety nemají osy rotace kolmé k rovině oběhu!

# 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	$1.99 \times 10^{30}$					$1.993 \times 10^{35}$	$-3.96 \times 10^{35}$	$3.10 \times 10^{43}$

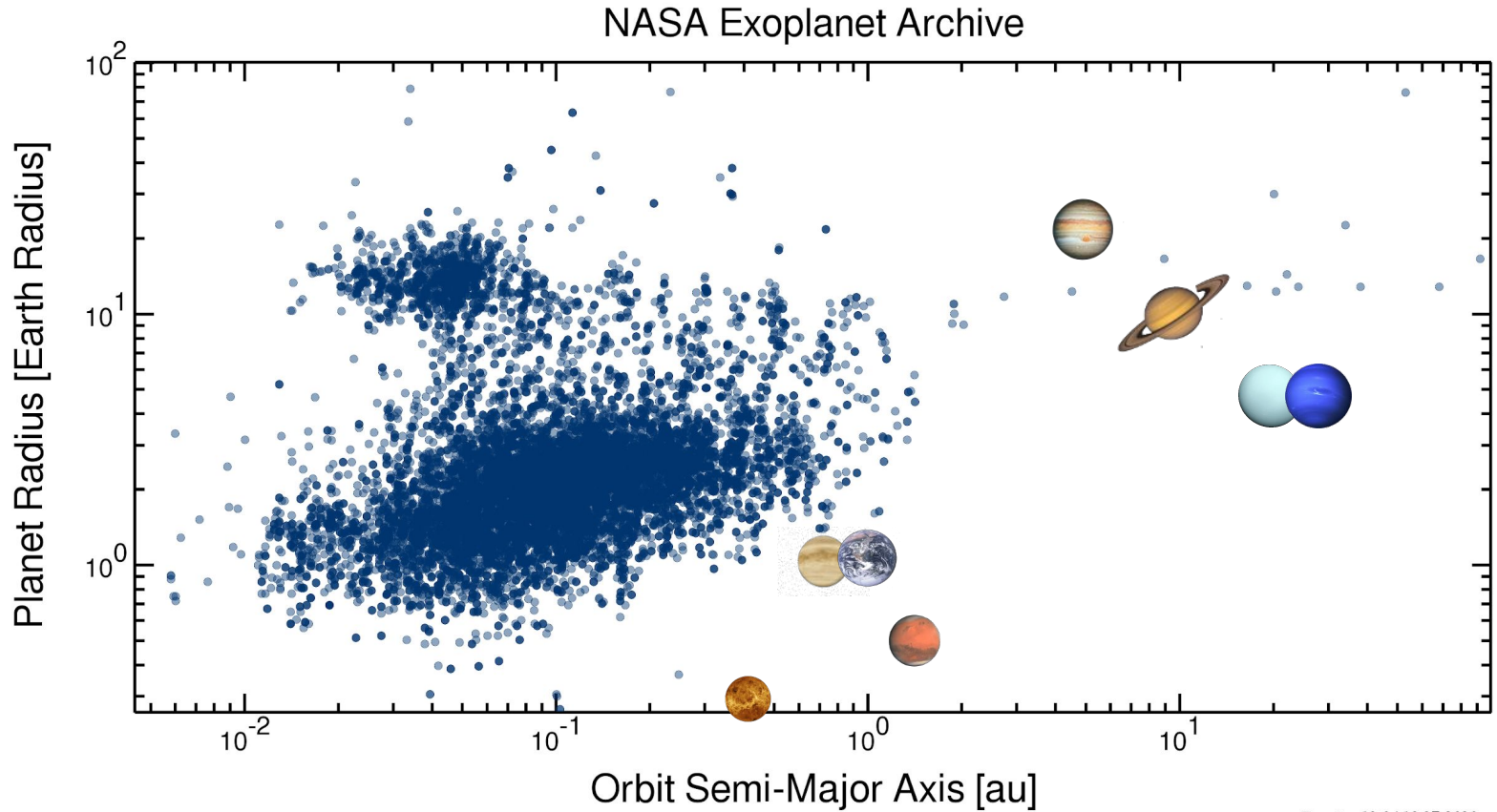
Table 1.0 Energy and Angular Momentum of the Planets

# Sluneční soustava

The background of the slide features a high-angle view of a rocky, cratered celestial body, likely the Moon, under a pale, hazy sky. A prominent, large crater is visible in the lower right quadrant, and a thin crescent moon is seen in the upper right corner of the frame.

- 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?

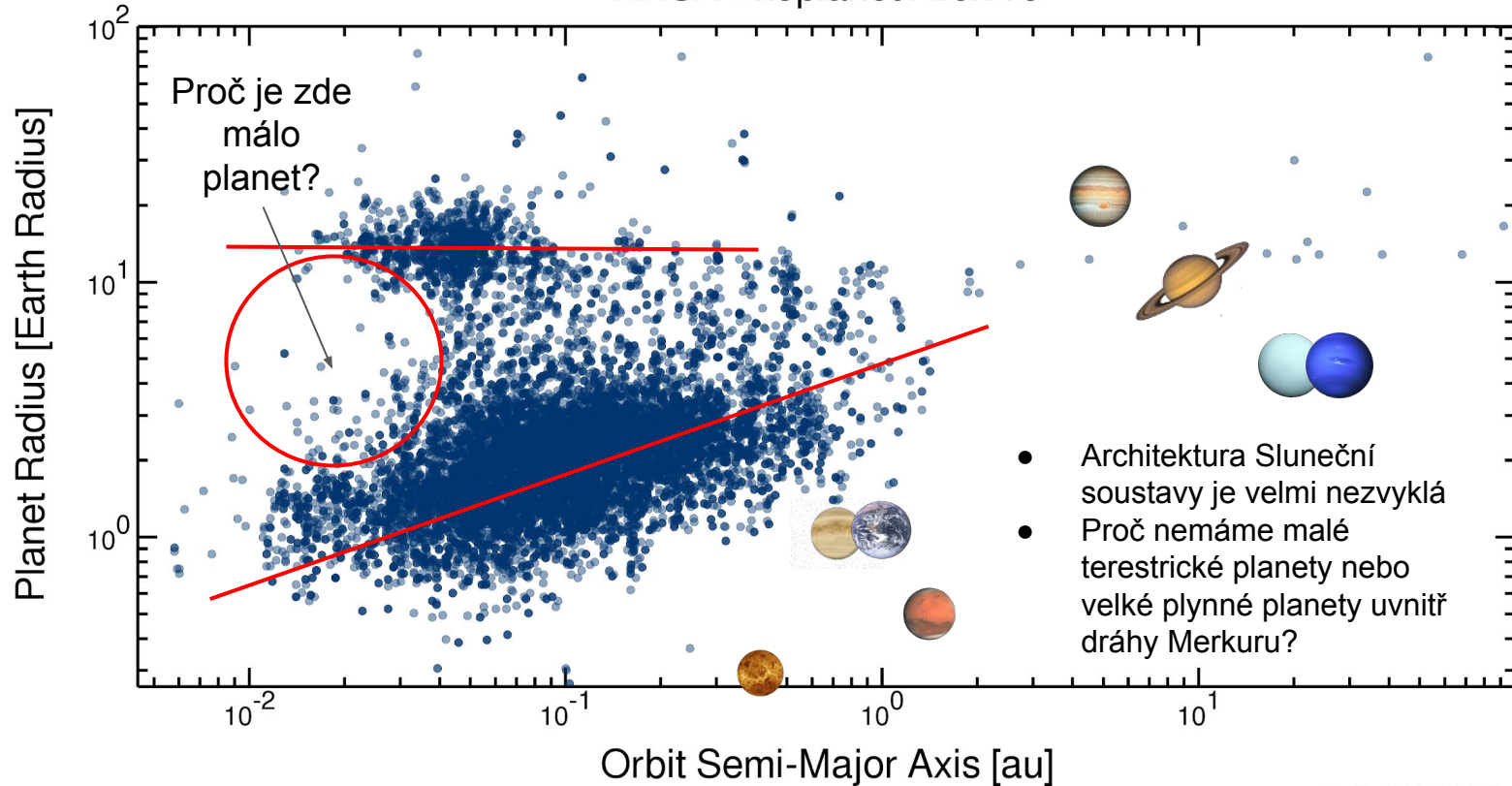
# Sluneční soustava vs exoplanetární soustavy





# Sluneční soustava vs exoplanetární soustavy

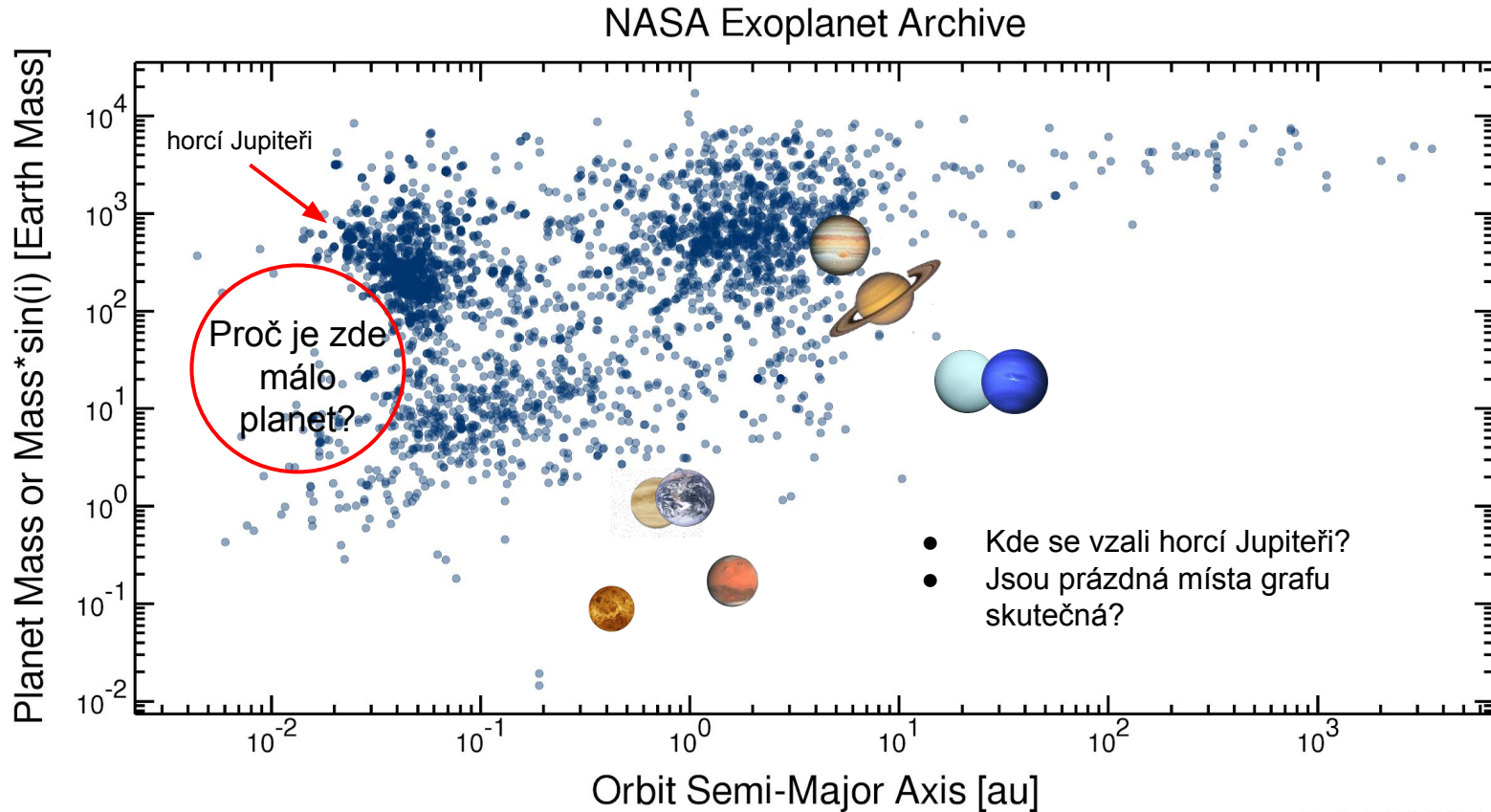
NASA Exoplanet Archive



Tue Oct 13 04:13:37 2020

Pozor na pozorovací bias!

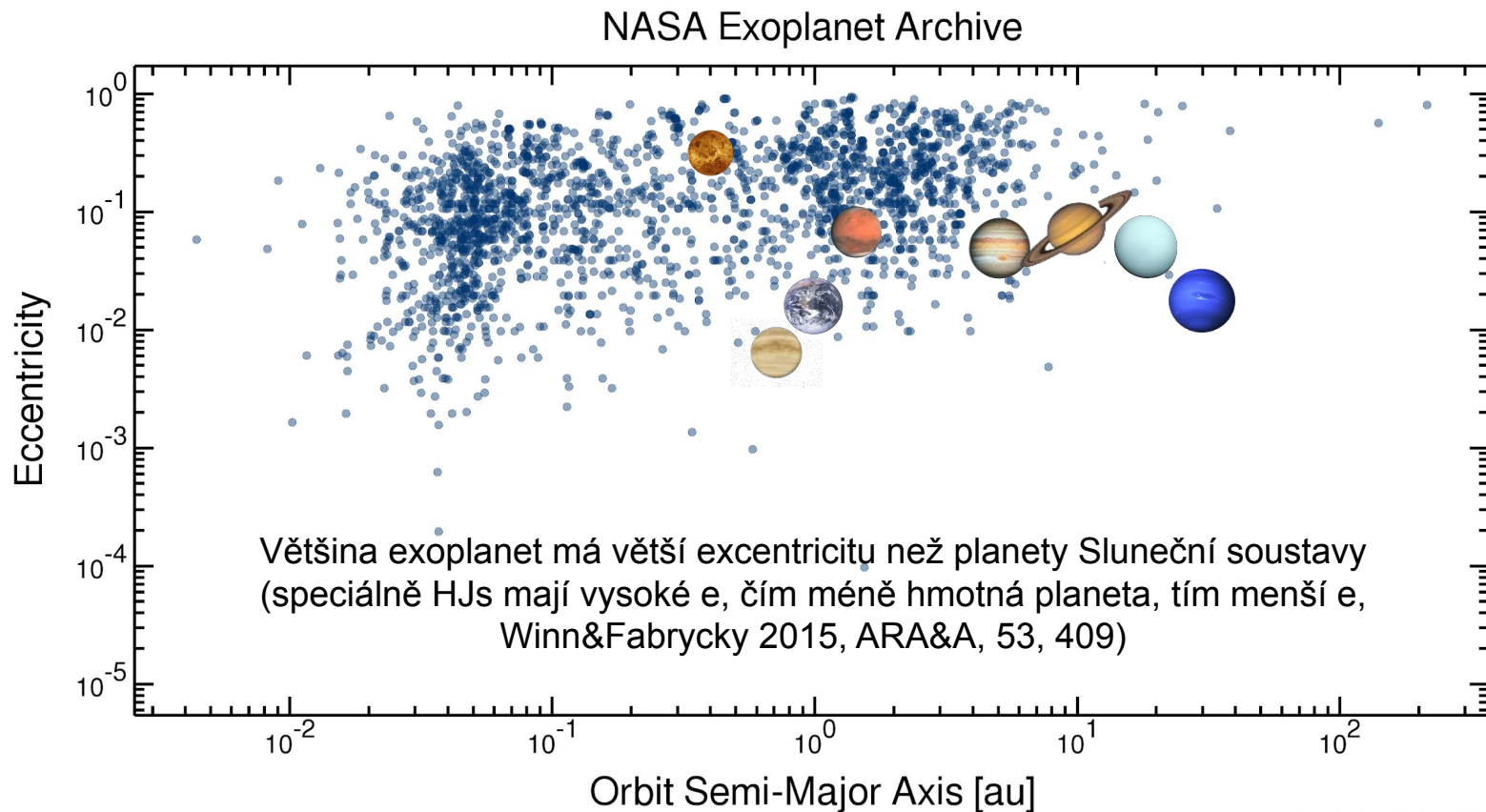
# Sluneční soustava vs exoplanetární soustavy



Tue Oct 13 04:17:07 2020

Pozor na pozorovací bias!

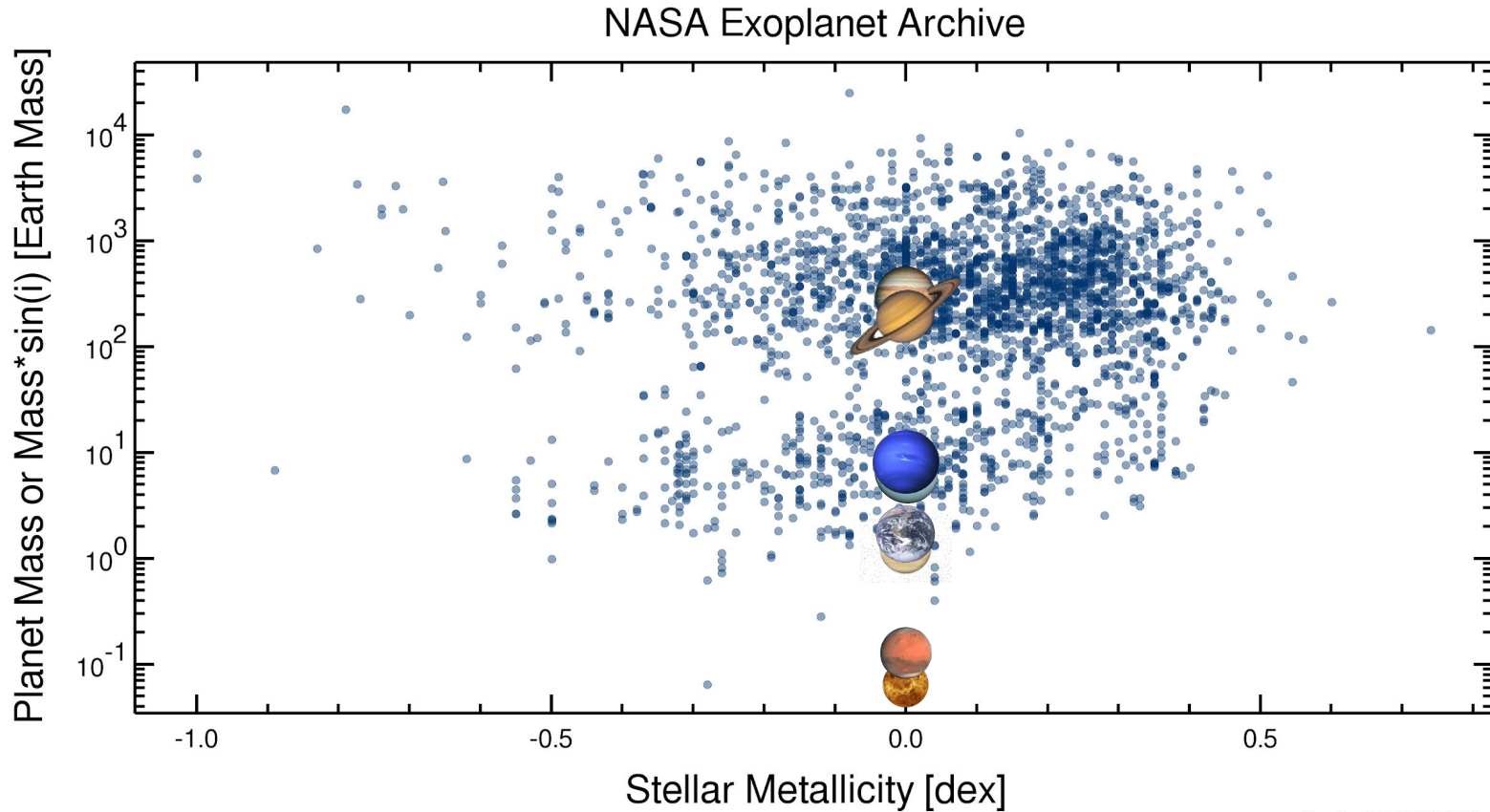
# Sluneční soustava vs exoplanetární soustavy



Tue Oct 13 07:36:01 2020

Pozor na pozorovací bias!

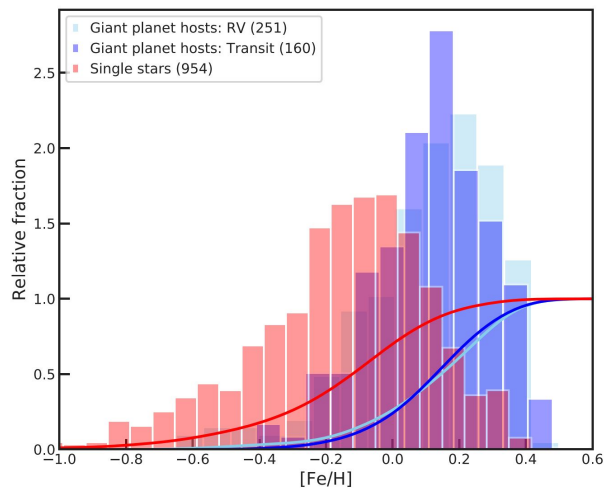
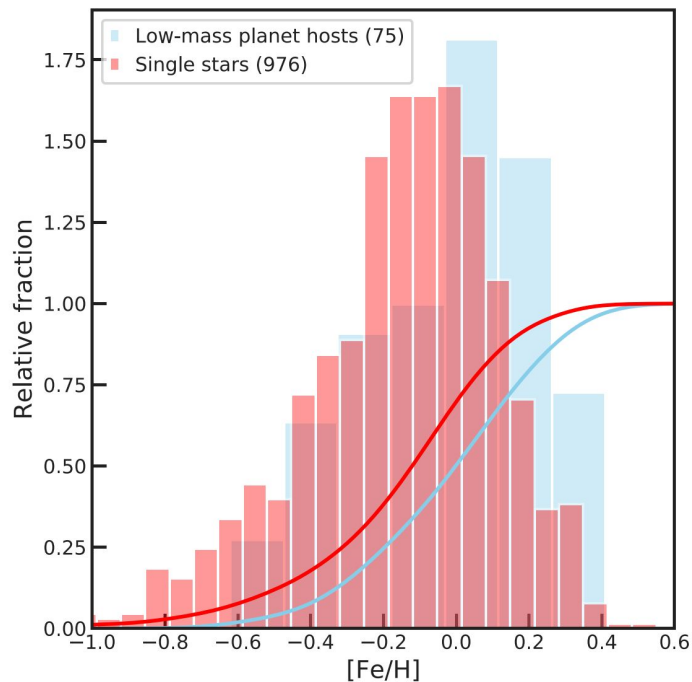
# Sluneční soustava vs exoplanetární soustavy



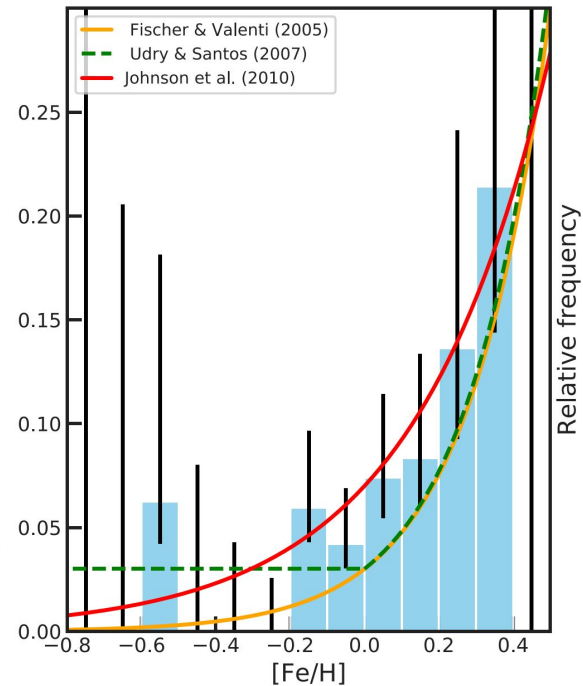
Tue Oct 13 06:35:27 2020

Pozor na pozorovací bias!

# Sluneční soustava vs exoplanetární soustavy



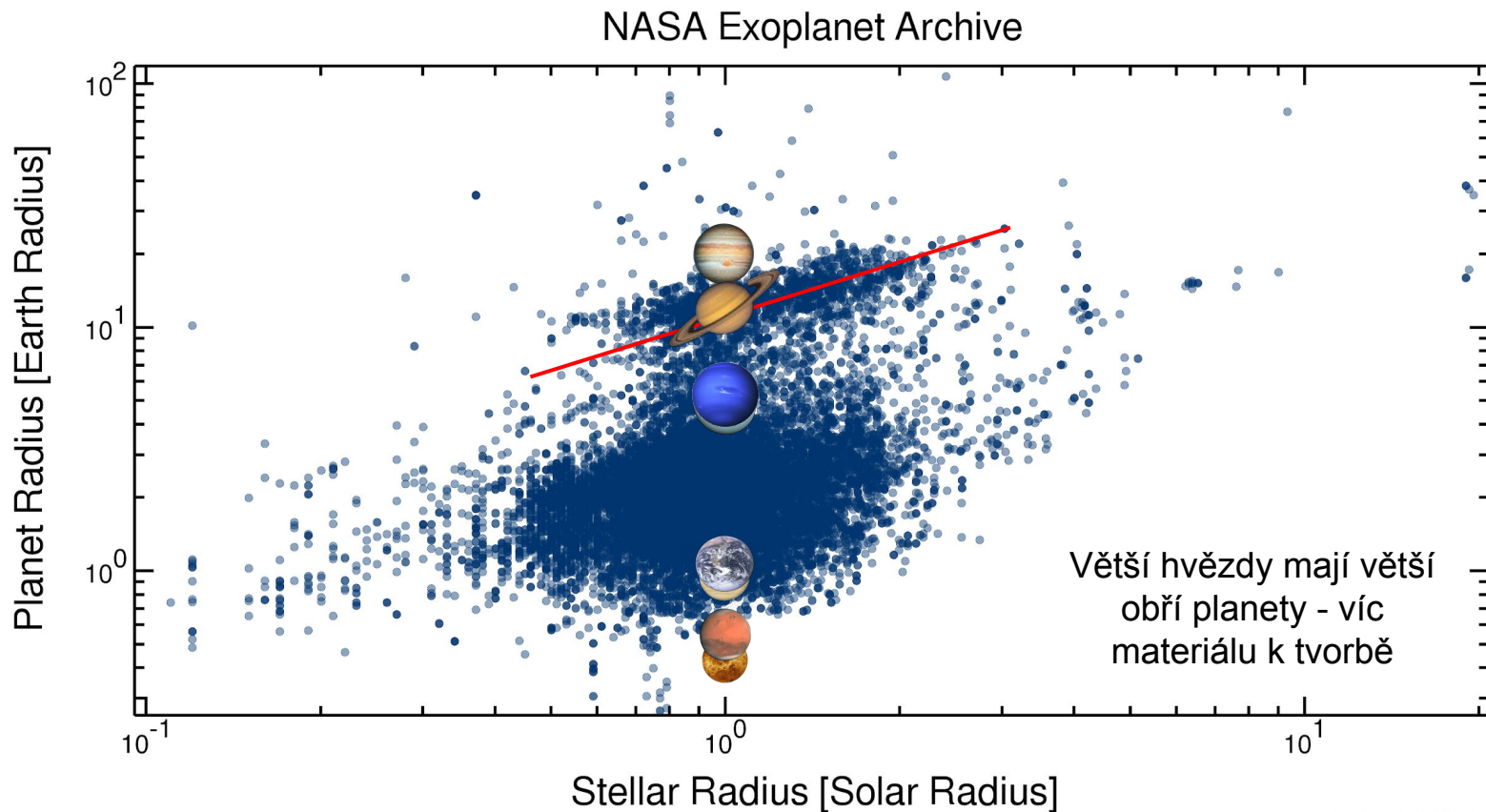
Adibekyan 2019, Geosc, 9, 105



Čím větší metalicita, tím více planet všech typů

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

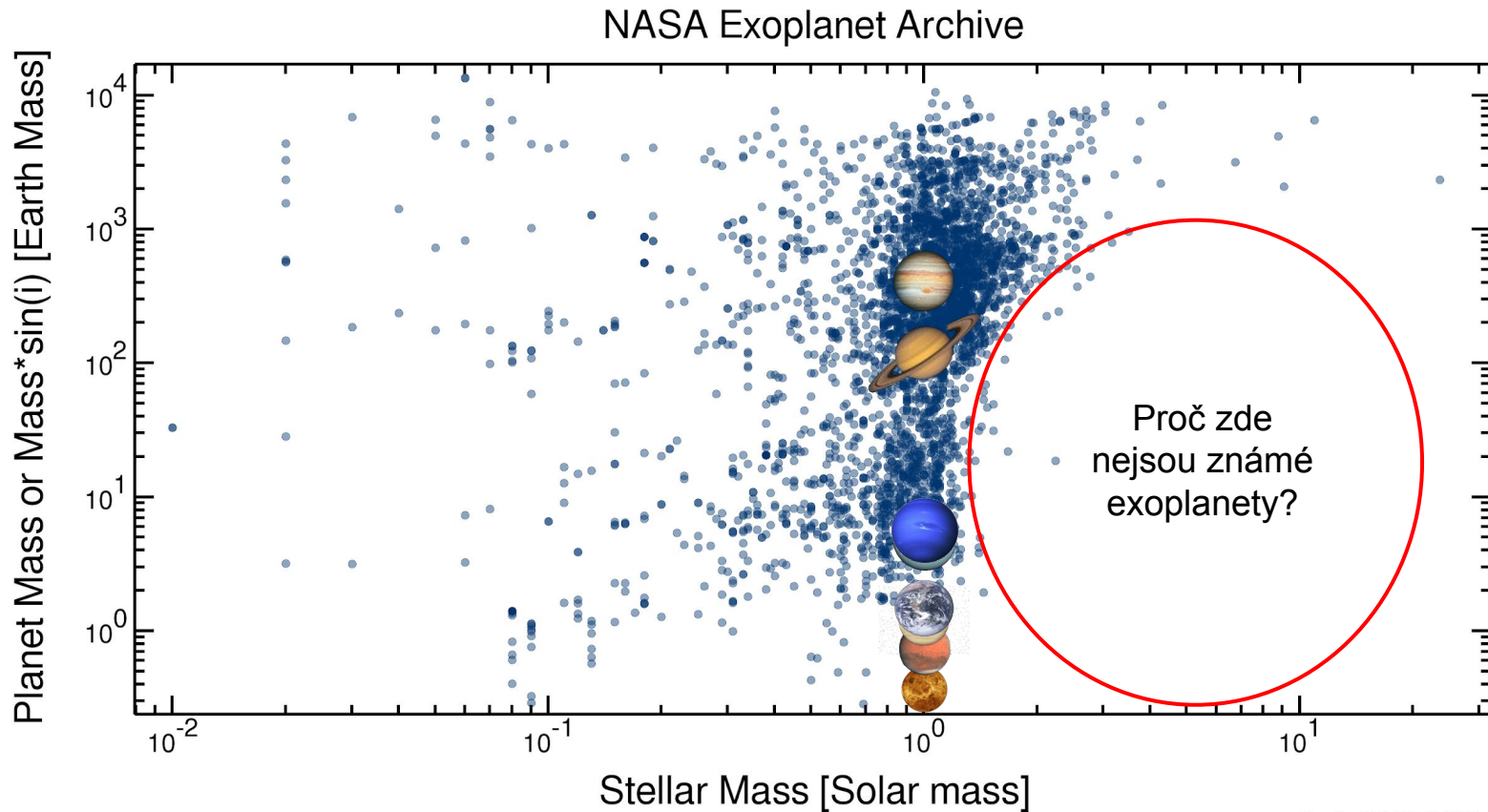
# Sluneční soustava vs exoplanetární soustavy



Tue Oct 13 04:34:05 2020

Pozor na pozorovací bias!

# Sluneční soustava vs exoplanetární soustavy

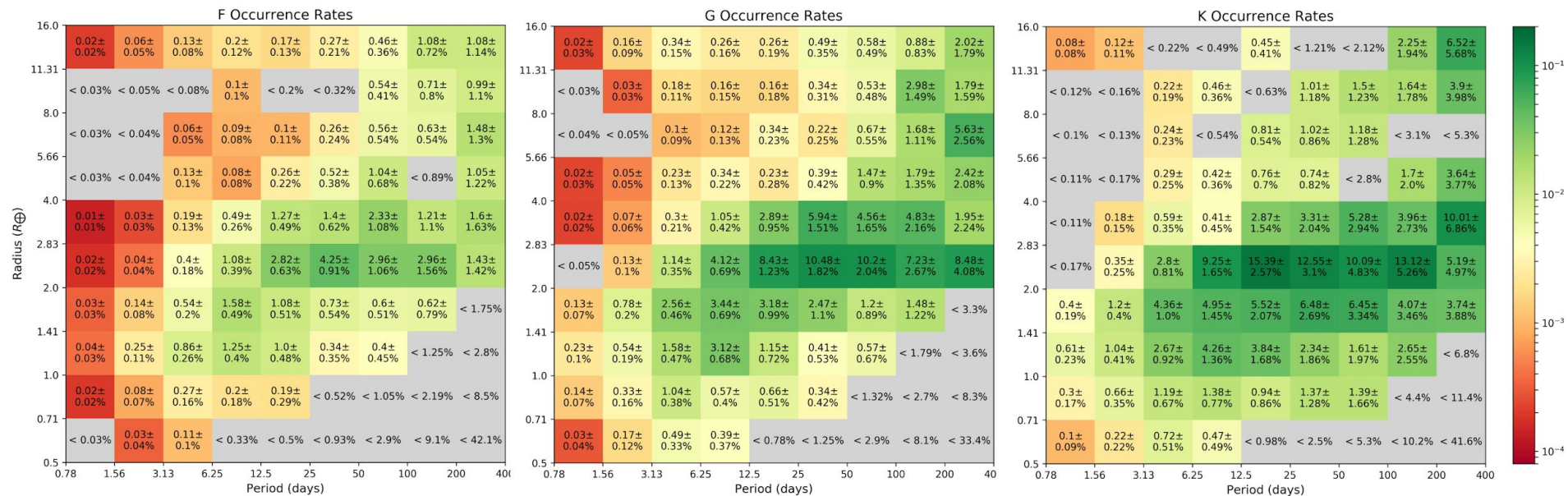


Tue Oct 13 04:32:30 2020

Pozor na pozorovací bias!

# Sluneční soustava vs exoplanetární soustavy

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

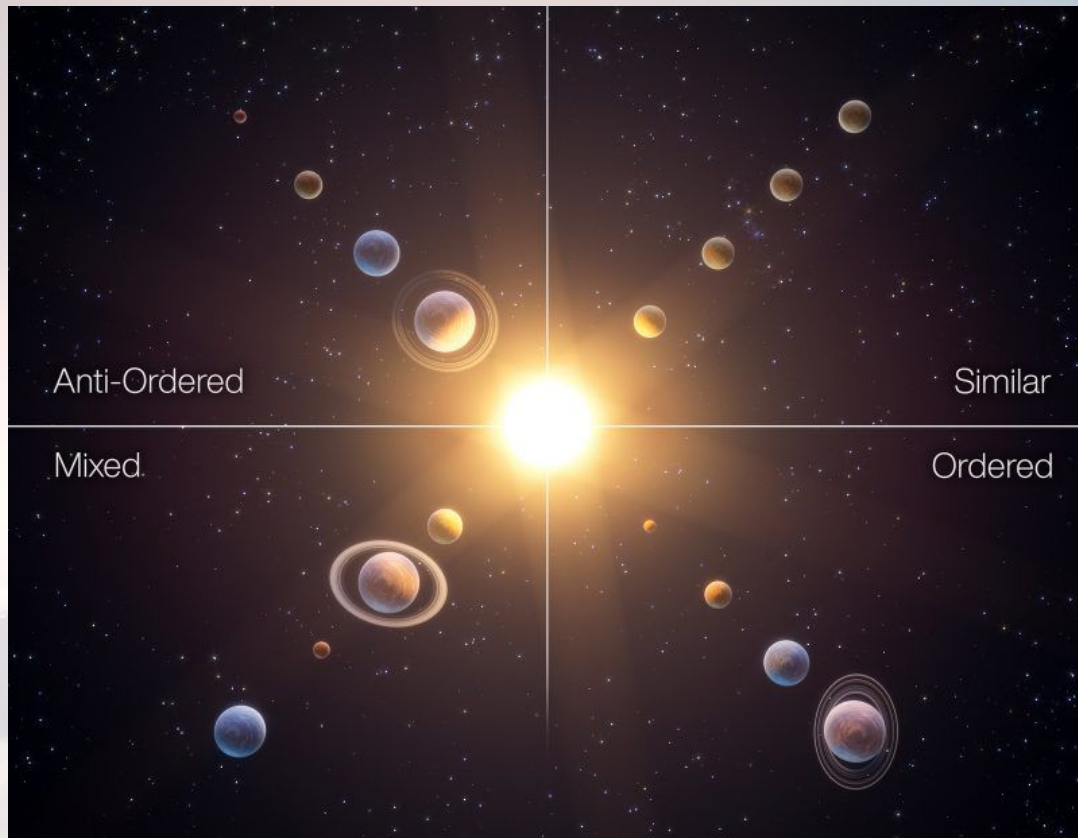


# Otázky k řešení

- 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 jsou rotační osy některých planet SS skloněny a jiných ne?
- Jak vznikají horcí Jupiteri a proč je nemáme ve SS?
- Co definuje architekturu systému?
- Proč nejsou žádné planety uvnitř Merkurovy dráhy?
- Co definuje horní mez hmotnosti konkrétní planety?
- Proč je více planet u hvězd s vyšší metalicitou?
- Jak moc ovlivňují naše metody naše výsledky?

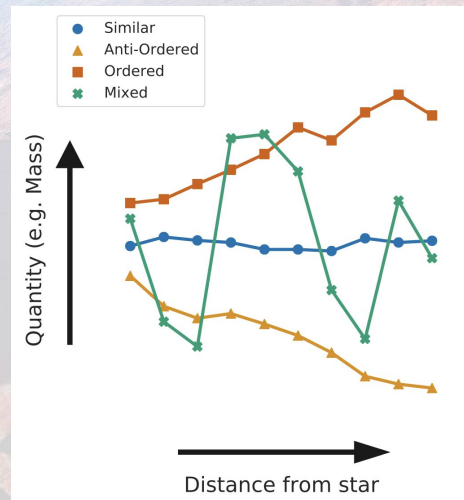
# Architektura planetárních systémů

Mishra et al. 2023, A&A, 670, 68 - 4 základní typy planetárních systémů



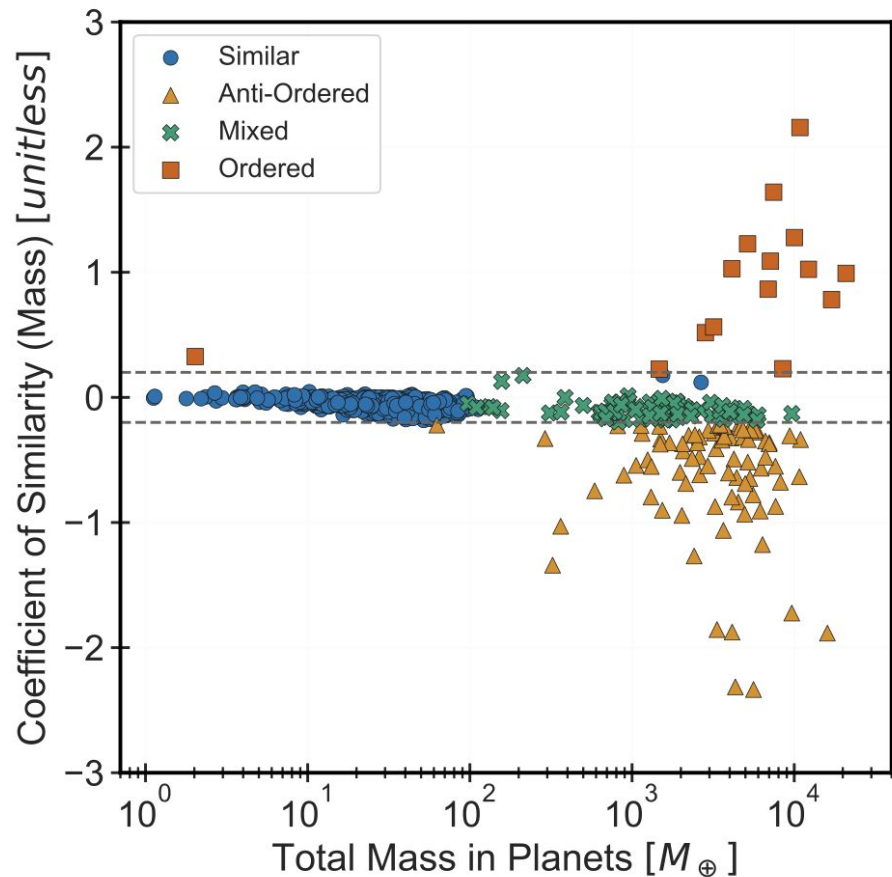
Porovnání III. generace modelů BERN se 44 dobře popsány systémy mající minimálně 4 planety

1D star-disk-embryo system. These include: stellar and disk physics (evolution of and interaction between star and viscous disk, condensation of volatile and refractory species, etc.), planetary formation physics (accretion of planetesimals and gases, internal structure calculations, etc.), and additional physics (orbital and tidal migration, planet-planet  $N$ -body interactions, planet-disk interactions, atmospheric escape, deuterium fusion, etc.).



# Architektura planetárních systémů

Mishra et al. 2023, A&A, 670, 68



## Architecture class

Anti-ordered

$$C_S(M) < -0.2$$

Ordered

$$C_S(M) > +0.2$$

Similar

$$|C_S(M)| \leq 0.2 \text{ and } C_V(M) \leq \frac{\sqrt{n-1}}{2}$$

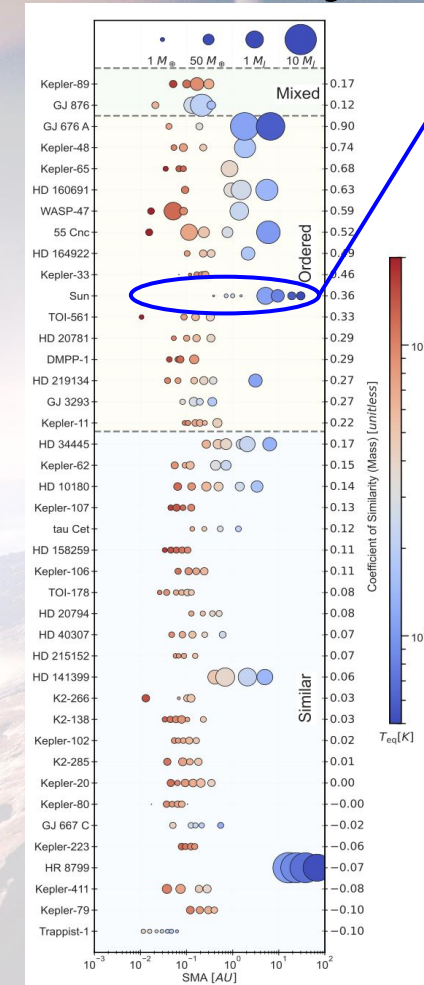
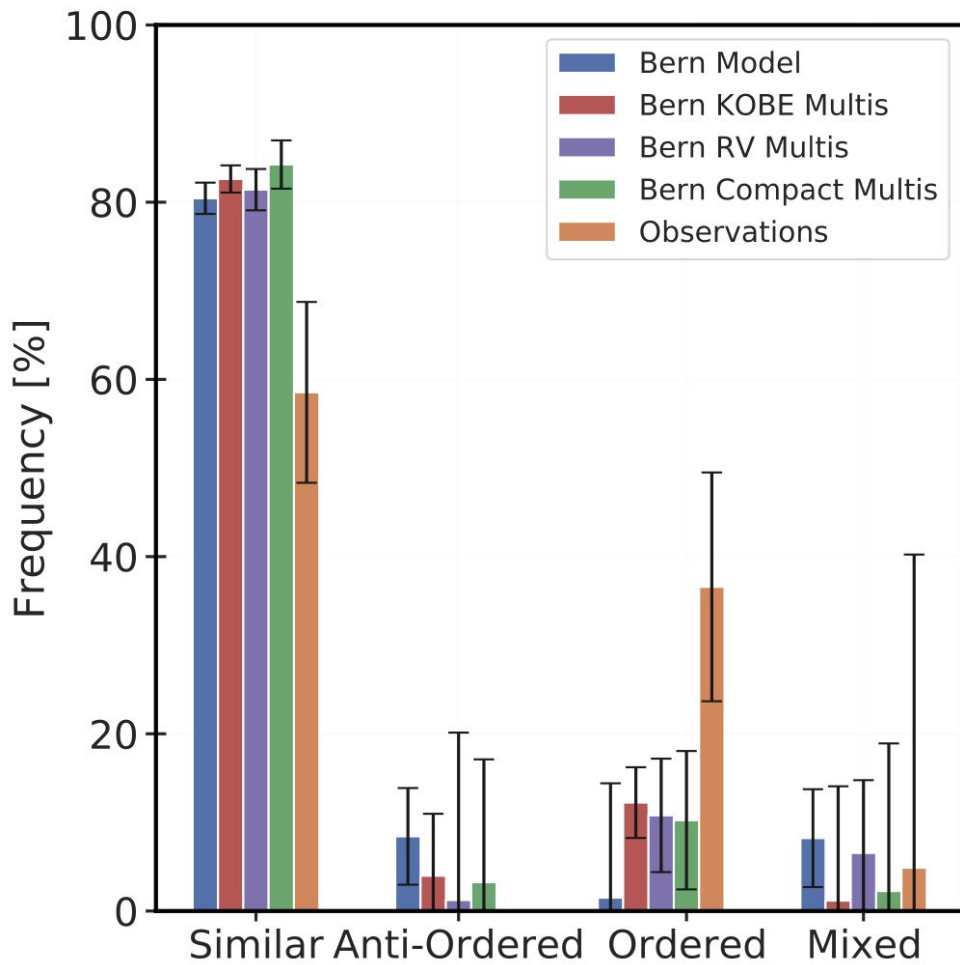
Mixed

$$|C_S(M)| \leq 0.2 \text{ and } C_V(M) > \frac{\sqrt{n-1}}{2}$$

$$C_S(q) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{i=n-1} \left( \log \frac{q_{i+1}}{q_i} \right) \quad C_V(q) = \frac{\sigma(q)}{\bar{q}}$$

Koeficienty podobnosti a variace z evolučních a genealogických metod

# Architektura planetárních systémů



Sluneční soustava  
ordered/similar/anti-ordered

Syntetické modely s různým počátečními parametry:

- Hmotnost, životnost, metalicita protoplanetárního disku
- Poměr plynu a prachu
- Rychlost fotoevaporace
- Pozice planetárních embryí ( $100 M_{\text{Měsíc}}$ )
- Vnitřní okraj disku

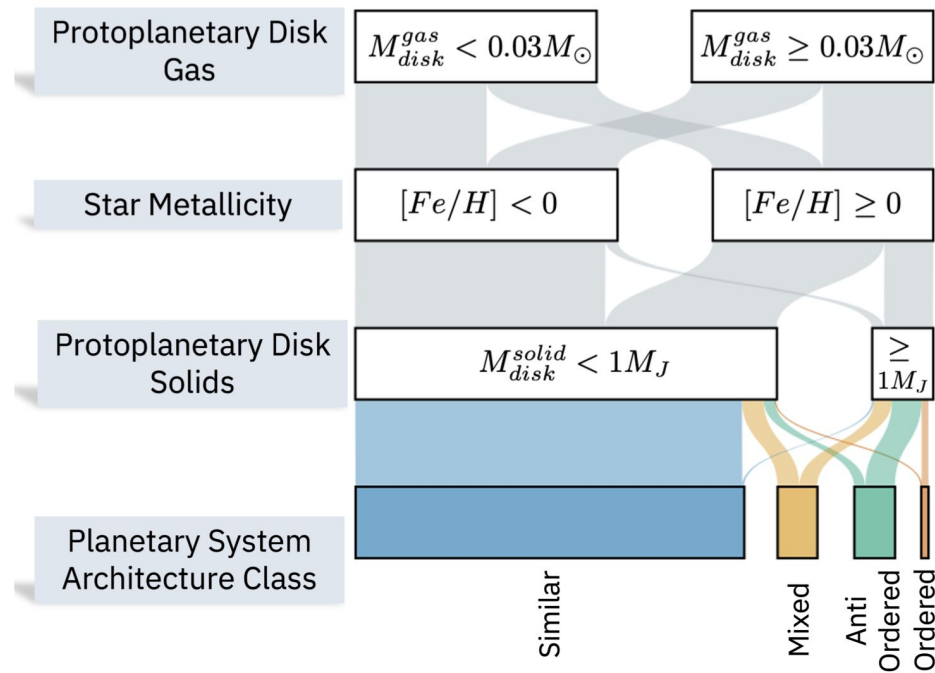
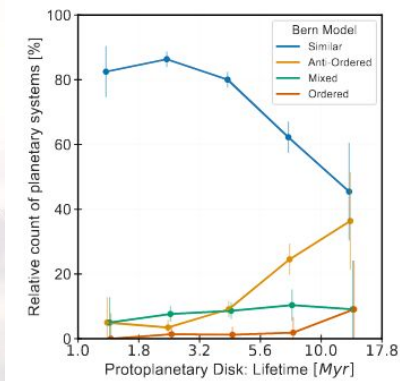
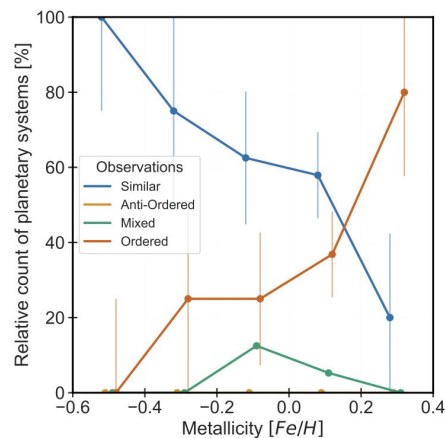
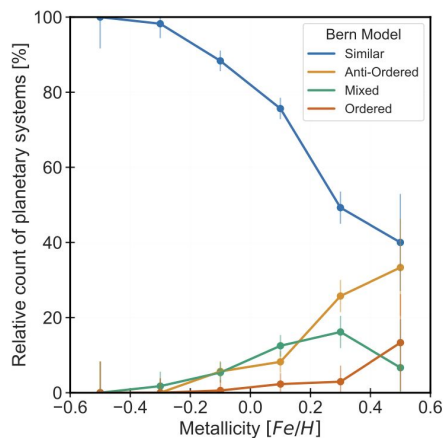
Konstanty:

- 1 Msun, viskozita materiálu, 100 300m planetesimal s danou hustotou

Výsledky:

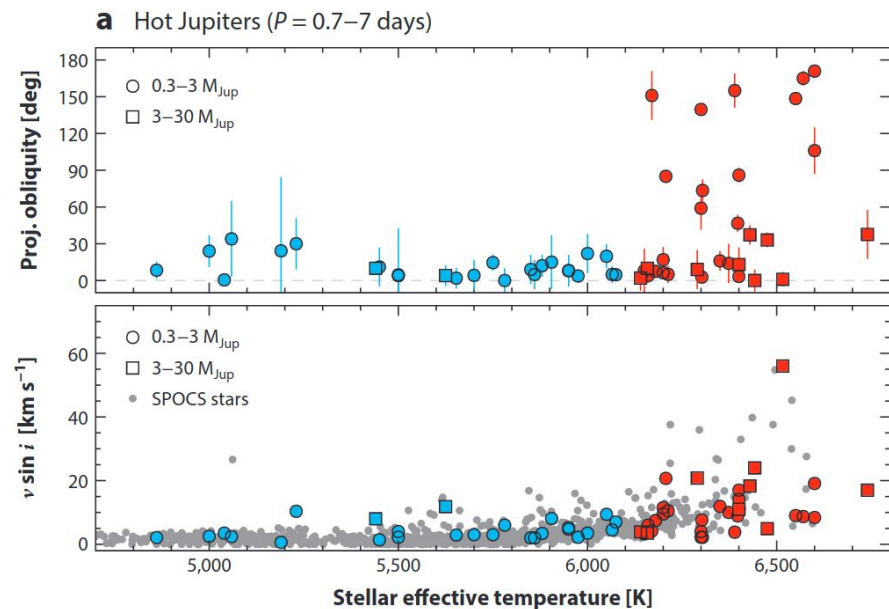
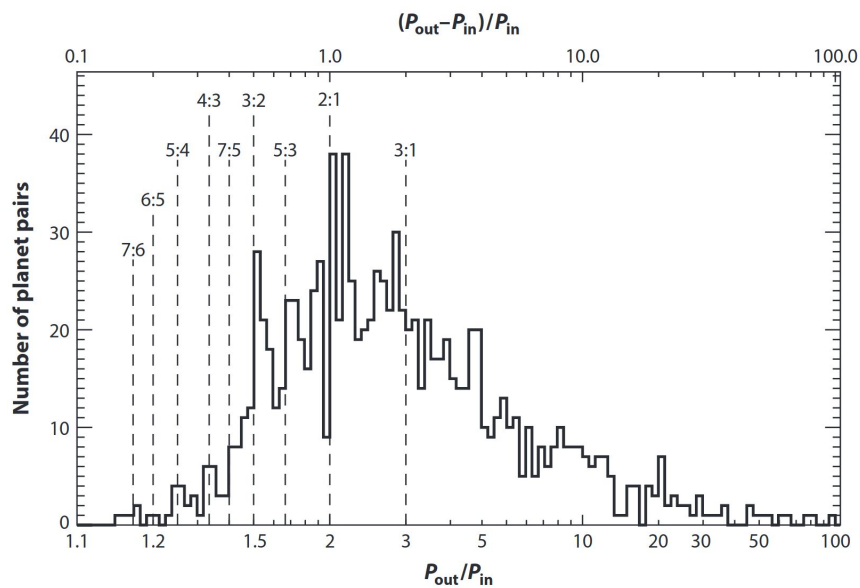
- “Similar” systémy jsou nejčastější
- Celková architektura závisí na hmotnostech embryí
- Planety v systémech “Similar” vznikly uvnitř sněhové linie (SL)
- Planety ostatních typů systémů nacházející se blíže než je SL vykazují tendenci k migraci dovnitř
- Planety daných hmotností mají podobnou architekturu i v rámci poloměrů a hustot
- Planety za SL obsahují mnohem více vody

# Architektura planetárních systémů



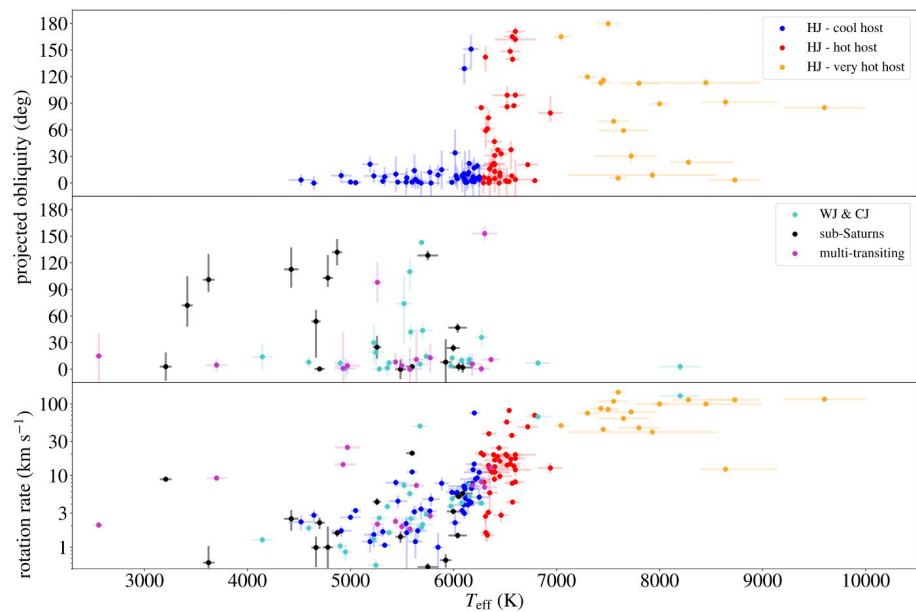
Mishra et al. 2023, A&A, 670, 69 - Velkou roli při formování systémů hrají srážky (v "similar" systémech naprosto klíčové) a migrace planet. Konečná architektura silně závisí na hmotnosti disku, jeho životnosti a metalicitě

# Architektura planetárních systémů



Winn&Fabrycky 2015, ARA&A, 53, 409 - rezonance jsou spíše výjimečné; planety u chladnějších hvězd obíhají kolmo k ose rotace hvězdy

# Sklon dráhy planet



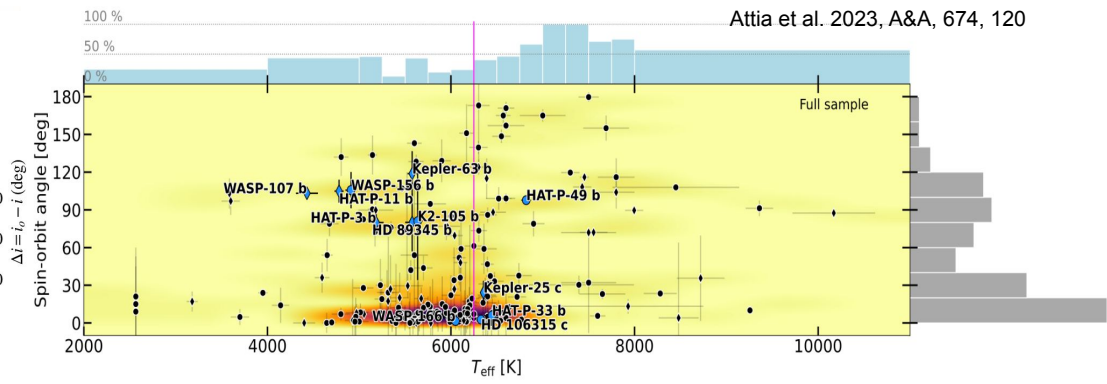
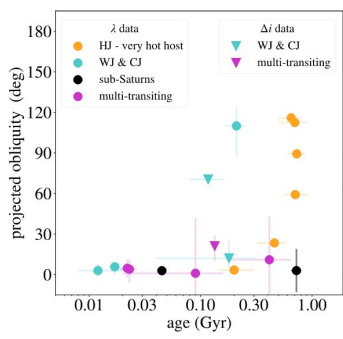
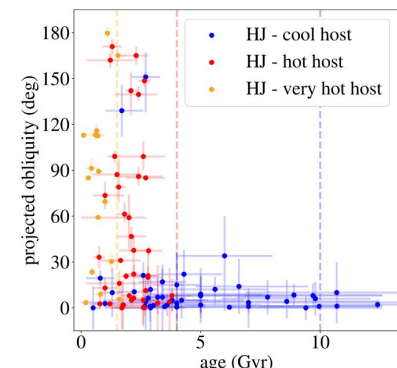
Albrecht et al. 2022, PASP, 134h2001

Attia et al. 2023, A&A, 674, 120

- Planety okolo teplejších hvězd mohou mít větší sklony
- Chladné planety jsou spíše zarovnané
- Planety okolo mladých hvězd mívají různé sklony drah

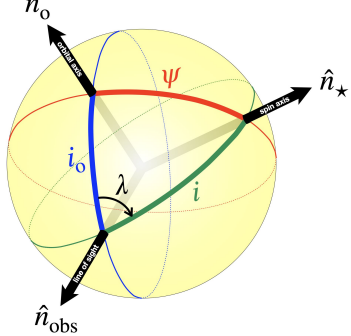
Winn&Fabrycky 2015, ARA&A, 53, 409

- Kompaktní systémy s kamennými planetami jsou většinou dobře zarovnané s malými excentricitami



Attia et al. 2023, A&A, 674, 120

# Sklon dráhy planet

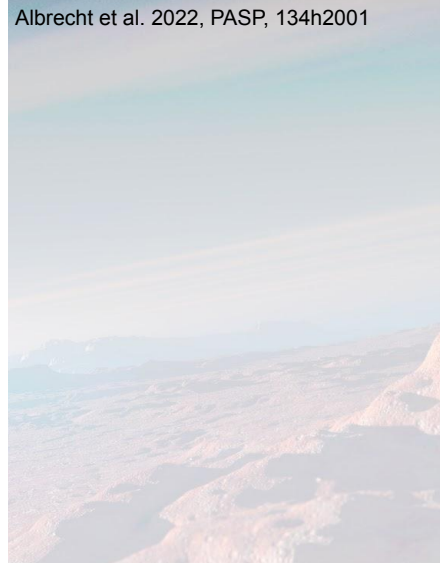
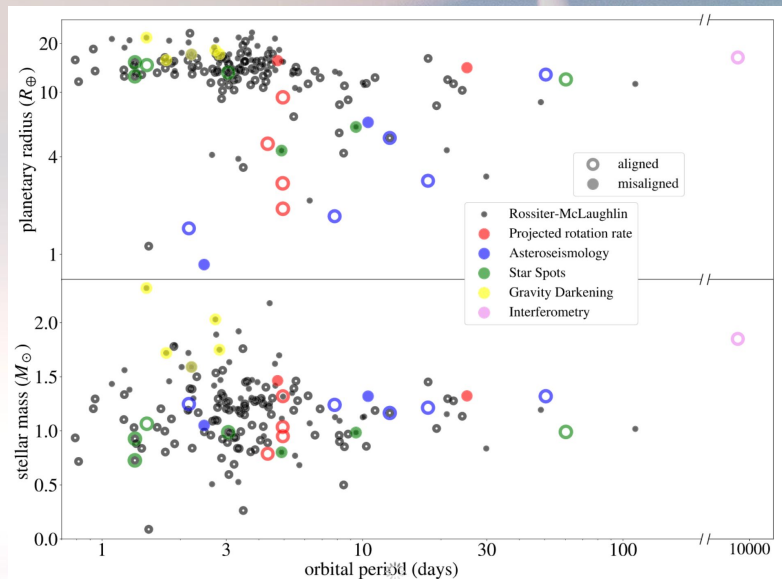


$$\hat{n}_* \cdot \hat{n}_o = \cos \psi = \cos i \cos i_o + \sin i \sin i_o \cos \lambda$$

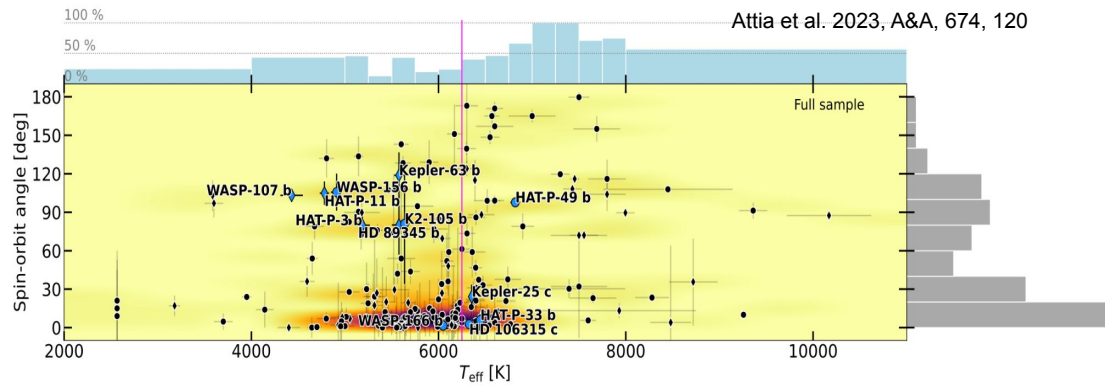
Potřeba zjistit inklinaci dráhy a inklinaci a projekci sklonu  $\lambda$

$$i = \sin^{-1} \left( \frac{v \sin i}{v} \right) = \sin^{-1} \left( \frac{v \sin i}{2\pi R / P_{\text{rot}}} \right)$$

$v \sin i$  ze spekter,  $P_{\text{rot}}$  z fotometrie,  $R$  z katalogu  $i \sim 90^\circ$  pro tranzitující planety



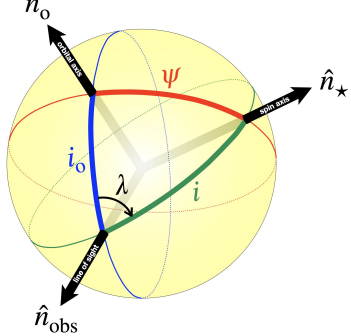
Albrecht et al. 2022, PASP, 134h2001



Attia et al. 2023, A&A, 674, 120



# Sklon dráhy planet

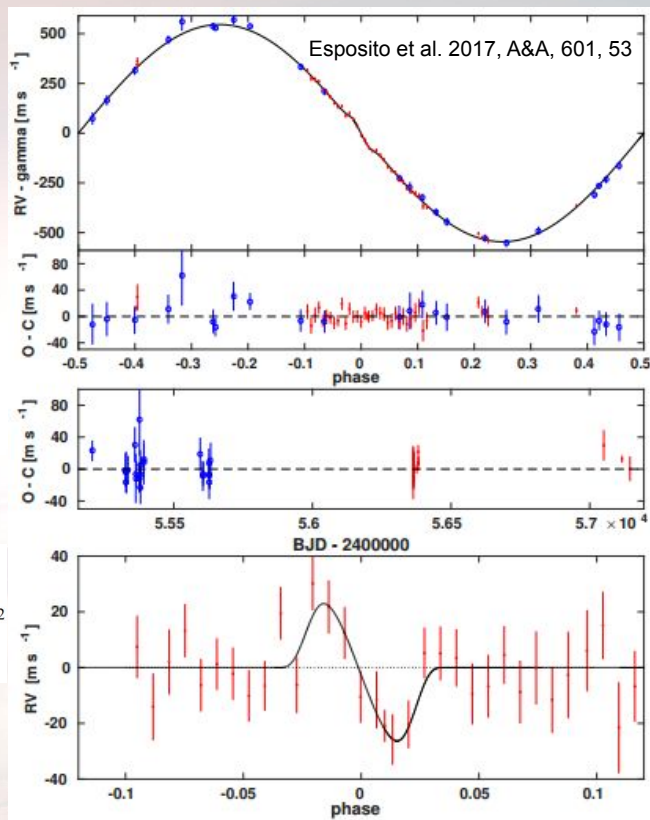


## Rossiter-McLaughlinův efekt

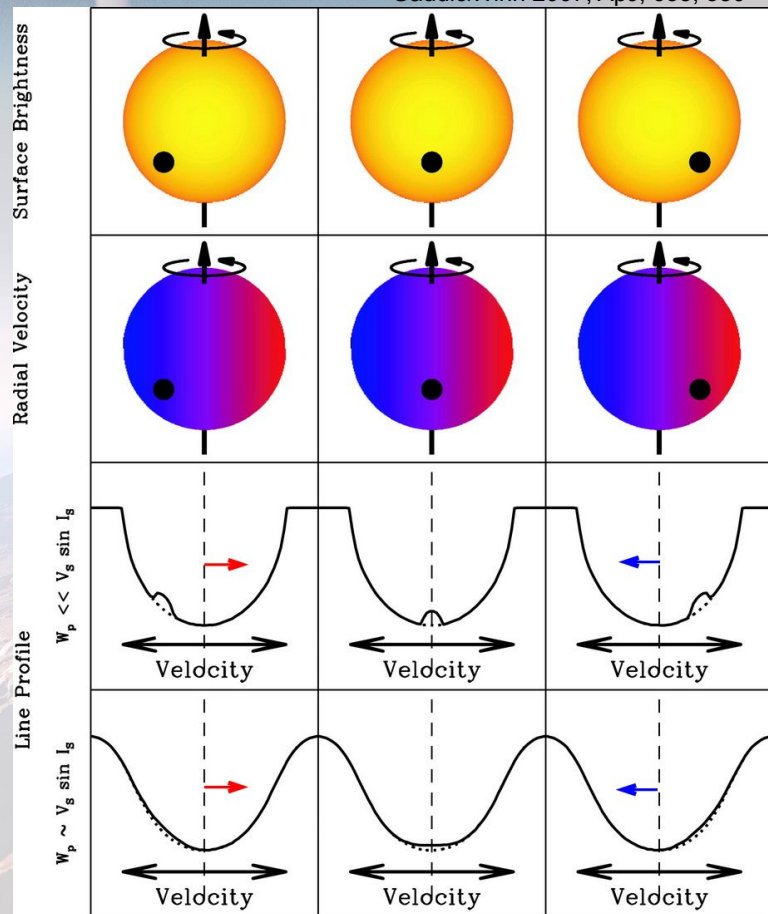
- Změna profilu křivky radiálních rychlostí při tranzitu - určení  $\lambda$

$$K_R \equiv V_S \sin I_S \frac{\gamma^2}{1 - \gamma^2}$$

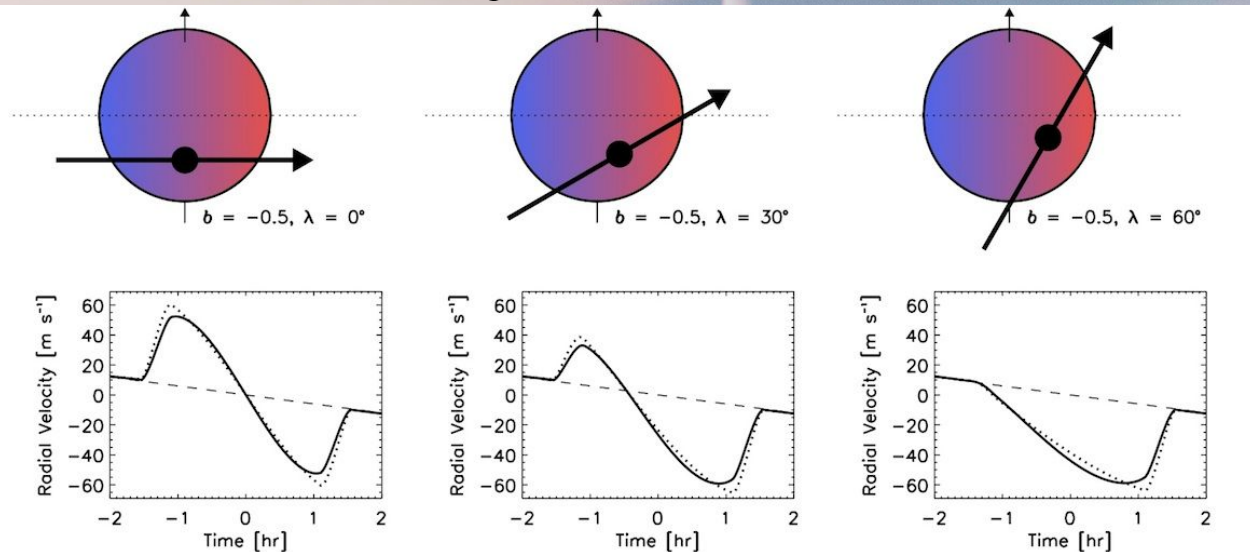
$$= 52.8 \text{ m s}^{-1} \left( \frac{V_S \sin I_S}{5 \text{ km s}^{-1}} \right) \left( \frac{r}{R_{\text{Jup}}} \right)^2 \left( \frac{R}{R_{\odot}} \right)^{-2}$$



Gaudi&Winn 2007, ApJ, 655, 550



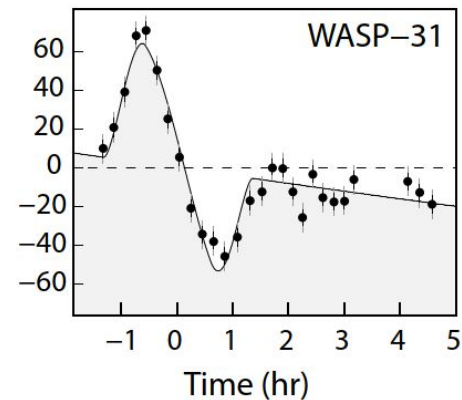
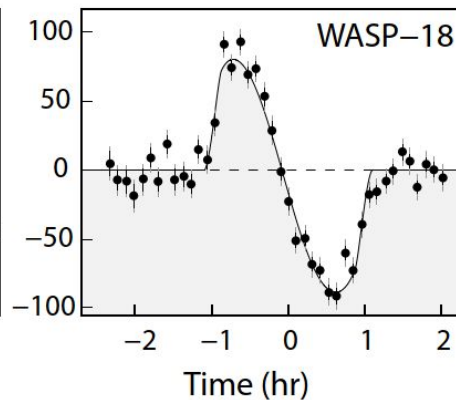
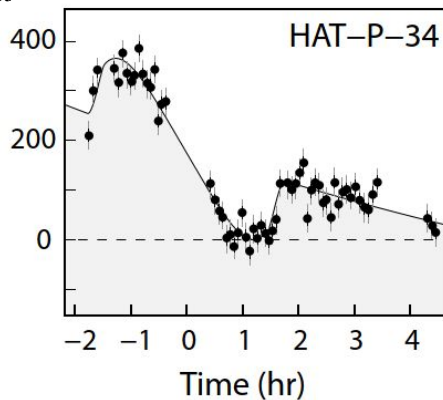
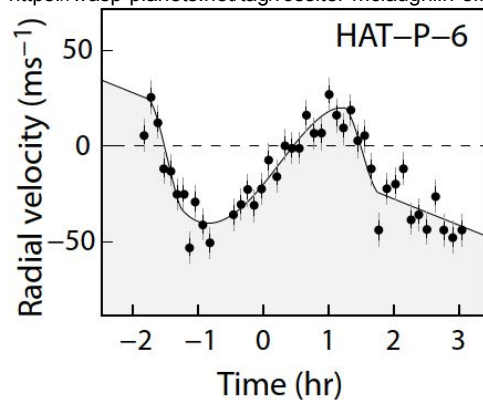
# Sklon dráhy planet



## Rossiter-McLaughlinův efekt

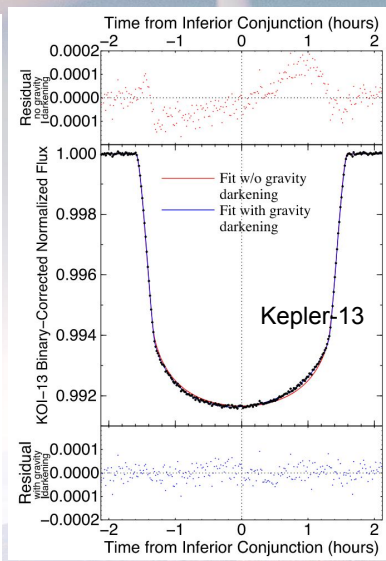
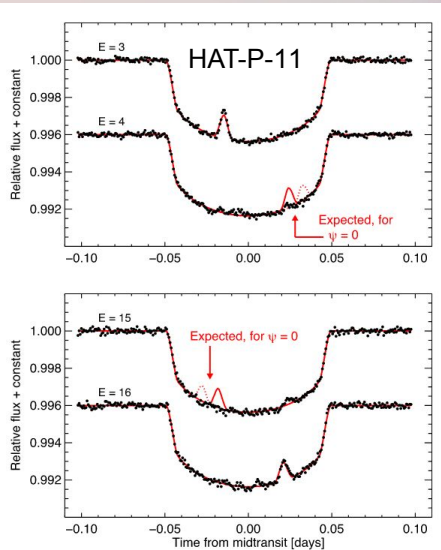
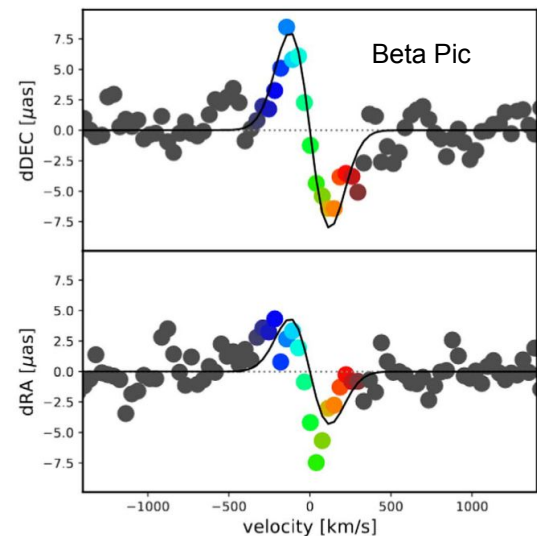
- Změna profilu křivky radiálních rychlostí při tranzitu - určení  $\lambda$

<https://wasp-planets.net/tag/rossiter-mclaughlin-effect/>

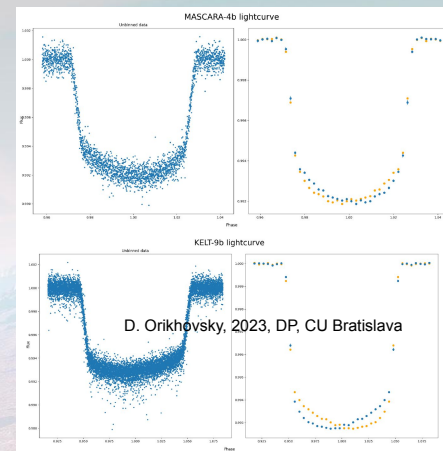


# Sklon dráhy planet

Albrecht et al. 2022, PASP, 134h2001



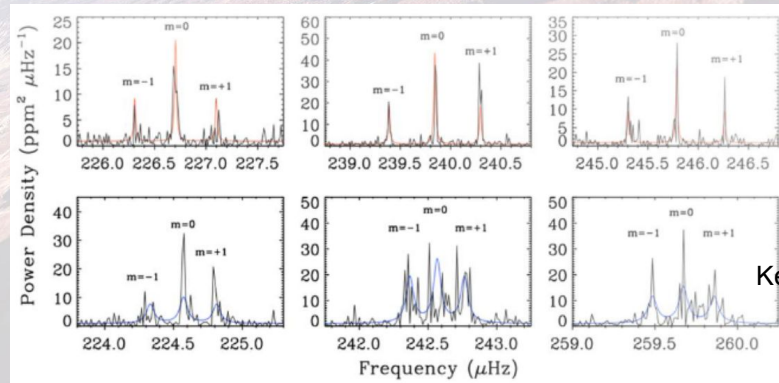
## Gravitační ztemnění u rychlých rotátorů



Interferometrie - v různých místech hvězdy různé rychlosti

Skvrny - okamžik pozorování skvrny záleží na sklonu dráhy

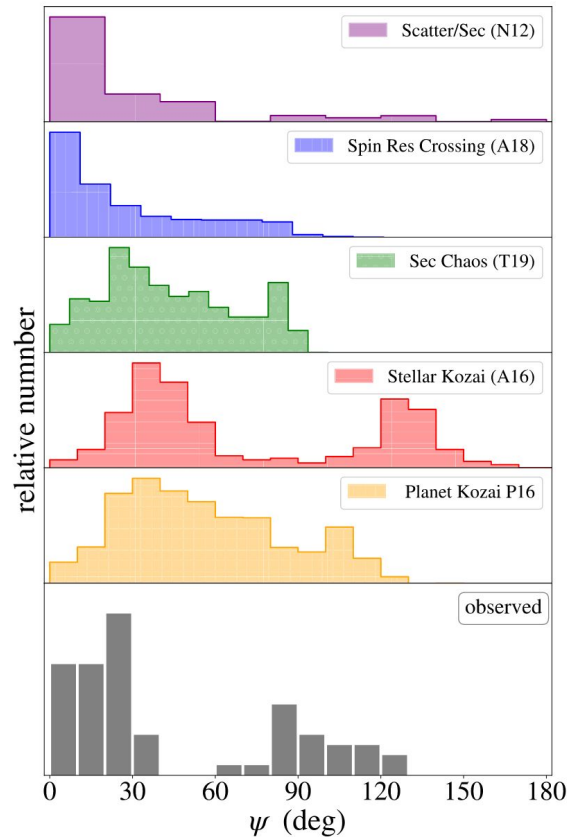
Asteroseismologie - rotační rozštěpení sektorálních módů pulzací



Kepler-56

# Dynamické interakce

Albrecht et al. 2022PASP..134h2001A



Původ HJs v dynamických interakcích vs původ in situ - rozlišení pomocí C/O  
 Dawson et al. 2018, ARA&A, 56, 175D

- Slapová migrace má za následek nepřítomnost malých planet v přítomnosti HJ
- HJ na excentrických drahách nemohou být vysvětleny pomocí migrace v disku nebo in situ vzniku
- Závislost přítomnosti excentrických HJ na metalicitě implikuje slapovou migraci spíše než K-L efekt (hvězdná multiplicita není závislá na metalicitě)
- Některé HJs a WSs mají vnější obří planety, které je mohou ovlivňovat pomocí K-L efektu, případně implikují interakci mezi planetami

