

Vznik Merkur, Venuše, Země a Marsu v prachoplynovém disku

Miroslav Brož, Ondřej Chrenko

Vznik planet patří mezi fundamentální problémy, jednak ve fyzice sluneční soustavy a jednak ve fyzice exoplanetárních soustav. Pozorování rádiovými interferometry (ALMA; Andrews a kol. 2018) nebo optickými dalekohledy s adaptivní optikou (VLT/SPHERE; Avenhaus a kol. 2018) nade vší pochybnost potvrzují, že planety vznikají v prachoplynových discích okolo mateřských hvězd. V posledních letech ovšem došlo ke značnému pokroku také na poli teoretickém, když se podařilo zjistit několik mechanismů, které vznik planet zásadně ovlivňují. Protože není možné psát přehled veškeré předchozí literatury, vybrali jsme tři klíčové práce, které ostatně byly motivací i pro naši práci, která byla nedávno publikována v časopise Nature Astronomy (Brož a kol. 2021).

Především Chambers & Wetherill (1998), což je klasický N -částicový model pro vznik terestrických planet. Protoplanety v něm vznikají z *lokálního* materiálu, který je vymezen izolovanou hmotností, jak plyne z omezeného problému tří těles, $m_i = [8(3)^{1/2} \pi]^{3/2} (3M_\odot)^{-1/2} r^3 \Sigma_p^{3/2}$, kde Σ_p označuje povrchovou hustotu pevné látky v disku, r vzdálenost od Slunce, M_\odot hmotnost Slunce. Předpokládáme-li obvyklou povrchovou hustotu plynu, odhadnutou dle současných drah planet (viz Hayashi 1981)¹, $\Sigma_{\text{MMSN}} = 17\,000 \text{ kg m}^{-2} [r/(1 \text{ au})]^{-3/2}$, a obvyklou metalicitu $\Sigma_p/\Sigma = 0,01$, v terestrické zóně vznikne asi 10^2 protoplanet. Ty se srážkami shlukují do planet, avšak bez plynu to trvá poměrně dlouho, 1 až $2 \cdot 10^8$ roků. Navíc je zde několik problémů, zejména podle modelu vychází velký Merkur, velký Mars, velká vzájemná vzdálenost mezi Venuší a Zemí. Hansen (2009) se pokusil první a druhý problém řešit tak, že na počátku soustředil tělesa do úzkého prstence (jen 0,7 až 1 au). Otázkou je, proč se měl formovat tak úzký prstenec?

¹ 1 au odpovídá současné vzdálenosti Země od Slunce.

Walsh a kol. (2011) diskutují pokročilý model, nazývaný „Grandiózní obrát“ (angl. Grand Tack). Předpokládají, že nejprve vznikaly planety Jupiter a Saturn. Protože planety v plynném disku vytvářejí spirální ramena, migrují směrem ke Slunci. Jedná se o migraci typu II, tzn. s mezerou (nižší Σ) podél dráhy planety. Protože rychlost migrace je různá (pro různé m), planety se přiblíží a zachytí ve vzájemné gravitační rezonanci středního pohybu 3:2. Přitom ovšem dojde k překrytí mezer, takže na soustavu dvou planet působí vnitřní rameno Jupiteru a vnější rameno Saturnu; pak migrují směrem od Slunce. Při vhodném načasování obrátu se terestrická zóna, resp. její vnější část, ochudí o planetesimály, čímž vznikne malý Mars ($0,1 M_\oplus$). Stále však vzniká velký Merkur ($>0,05 M_\oplus$). Model je dosti populární v meteoritické komunitě, neboť Jupiter zde slouží jako neprostupná bariéra mezi vnitřní a vnější částí sluneční soustavy, což udrží izotopické anomálie pozorované v meteoritech (viz Warren 2010, Kruijer a kol. 2017).

Konečně Lambrechts & Johansen (2012) se zabývají balvany, které spirálují (driftují) ke Slunci kvůli aerodynamickému tření. Důvodem je plyn, který obíhá pomaleji, neboť jej od Slunce odpuzuje gradient tlaku, čili zrychlení $\mathbf{f} = (1/\rho) \nabla P$. Rozměr balvanů bývá různý (mm, cm, dm), v závislosti na tom, zda převažuje fragmentace nebo driftování. To ovšem znamená, že je k dispozici *nelokální* materiál. V blízkosti dostatečně hmotných protoplanet se navíc plyn pohybuje spolu s protoplanetou, zejména v oblasti vymezené Hillovou sférou, jak plyne z omezeného problému tří těles, $R_H = r [m/(3M)]^{1/3}$. Pak ovšem aerodynamické tření nutí balvany spirálovat k planetě, čímž se dramaticky zvětšuje účinný průřez akrece. Původně byl určen pouze πR^2 , pak se zvětšil gravitačním fokusováním na $\pi R^2 [1 + (v_{\text{esc}}/v_{\text{rel}})^2]$, kde v_{esc} označuje únikovou rychlost, v_{rel} vzájemnou rychlost (Bondiho režim),

v přítomnosti plynu až na πR_H^2 (Hillův režim). Nové mechanismy (migrace, driftování, Hill) si vynucují posouzení, zda se také nepodílely na vzniku terestrických planet.

Za prvé je třeba si ujasnit, *kdy* planety mohly vzniknout? V případě Jupiteru to je jasné, že před rozplynutím plynu, protože jinak by neměl plynnou obálku.² V případě Země to není jasné, ale budeme předpokládat, že také. Pro posouzení lze použít obr. 1, kde ukazujeme podíl hvězd s přebytkem záření v infračerveném oboru (IR) a stáří příslušné hvězdokupy určené z Hertzsprungova–Russelova diagramu. Často se závislostí prokládá exponenciála, $e^{-t/\tau}$, a její parametr $\tau = 3$ milióny roků (My) se zkratkovitě čte jako „doba života disku“. Čist bychom to ovšem měli takto: (i) v čase 3 My průměrně $1/e \doteq 37\%$ hvězd má disky, které jsou (budou) starší; (ii) odlehlé body (TW Hya, η Cha, NGC 1960) evidentně značí existenci starých disků; (iii) o hvězdách v poli (mimo hvězdokupy) nelze říci nic. Čili je možné, že plynný disk ve sluneční soustavě mohl existovat i ≥ 10 My.

² Kritická hmotnost pro hmotnost jádra je asi $20 M_\oplus$ a celková hmotnosti Jupiteru dosahuje asi $300 M_\oplus$.

Za druhé je třeba si uvědomit, že pokud je k dispozici nelokální materiál, disk nemusel mít minimální hmotnost, čili profil popsáný $\Sigma_{\text{MMSN}}(r)$. Dokonce by mohl být **profil $\Sigma(r)$ obrácený** pro $r < 1$ au. Například z důvodu magneto-rotací nestability (MRI; Flock a kol. 2017), aktivních vrstev (Kretke & Lin 2012), nebo větru z atmosféry disku (Ogihara a kol. 2018). Profil $\Sigma(r)$ obvykle nepředepisujeme přímo, nýbrž bývá určen profilem viskozity $\nu(r)$. Zároveň platí, že v pozdních stádiích bylo zřejmě Σ nízké, či velmi nízké. I tyto možnosti je nutné zkusit. Proto používáme radiačně–hydrodynamický (RHD) model Fargo (Masset 2000, Chrenko a kol. 2017), zahrnující následující soustavu rovnic: rovnici kontinuity pro plyn, pohybovou rovnici pro plyn (též Navierovu–Stokesovu), rovnici tepelné rovnováhy (též 1. větu termodynamickou), stavovou rovnici, rovnici kontinuity pro balvany, pohybovou rovnici pro balvany, rovnici pro jejich akreci a pohybovou rovnici pro planety.

Plyn, balvany i planety se ovlivňují navzájem. Zajímá nás především zrychlení působící na planety, tzn. gravitace Slunce, gravitace ostatních planet, gravitace plynu, aerodynamické tření, případně akrece plynu, akrece balvanů nebo srážky s planetami. Zejména lze rozlišit: (i) Lindbladovo zrychlení od spirálních ramen vyvolaných planetami; (ii) korotační zrychlení od plynu obíhajícího podél dráhy planety; (iii) ohřevné zrychlení od plynu nerovnoměrně zahřátého horkou planetou. Jejich velikost a směr závisí zejména na *exponentech* profilů $\Sigma(r) \propto r^\alpha$, $T(r) \propto r^\beta$ (viz Paardekooper a kol. 2011, Benítez-Llambay a kol. 2015). Situaci pro merkurové až marsovské protoplanety, rozmístěné mezi 0,4 až 1,8 au, názorně ukazuje obr. 2.

Momenty zrychlení $\mathbf{\Gamma} = \mathbf{r} \times \mathbf{f}$ způsobují migraci protoplanet. Z Gaussovy rovnice lze spočítat časovou změnu velké poloosy $da/dt = 2\Gamma/(rn)$, kde n označuje úhlovou rychlost (též střední pohyb). Když tuto změnu extrapolujeme, zjistíme, že protoplanety migrují k $r \approx 1$ au během doby trvání plynného disku (obr. 3; Brož a kol. 2021, viz též Raymond 2021). V oblasti terestrických planet se tímto mechanismem vytváří **konvergentní zóna**.

Abychom mohli konvergenci protoplanet snadněji studovat, připravili jsme také zjednodušený N -částicový model. Vyšli jsme ze symplektického integrátoru Symba (Duncan a kol. 1998), do kterého jsme doplnili migrační zrychlení i růst hmotnosti. Mezi volné parametry patří kromě rychlosti migrace, konvergentního poloměru, tlumení excentricity, nucené excentricity apod., také tok balvanů dM_p/dt z vnější části sluneční soustavy, který jsme uvažovali v rozmezí 10^{-7} až $10^{-4} M_\oplus/\text{y}$. Samozřejmě, že ne všechny jsou akretovány na planetu; relativní podíl určuje filtrační faktor $f(M)$. Počáteční podmínky určuje celková hmotnost protoplanet, okolo $2 M_\oplus$, a jejich rozmístění, jakožto násobek vzájemné hillovské vzdálenosti, $R_{\text{HH}} = (a_1 + a_2)/2 [(q_1 + q_2)/3]^{1/3}$, kde $q_i = M_i/M_\odot$.

Dlouhodobý vývoj (po dobu 10 My) ukazuje, jak protoplanety konvergují, zároveň se srážejí, zároveň nabírají balvany, až narostou do podoby několika málo planet. Jedná se přitom o klasický málo- N -částicový *stochastický* systém. To znamená, že výsledek citlivě závisí na geometrii každého z blízkých přiblížení — při němž buď dojde ke srážce, nebo nikoliv. Například pro námi uvažované $N \approx 28$ je třeba alespoň 50 simulací, abychom získali příslušná rozdělení pravděpodobnosti.

Co je „nad Slunce“ jasné, že konvergence přirozeně soustřeďuje protoplanety mezi 0,7 až 1 au. Největší tělesa nejčastěji vznikají právě poblíž středu konvergentní zóny (obr. 4). Vysvětluje se tím **malá separace Venuše a Země**. Plyn je potřeba až do 10 My, dokud nevznikne Venuše a (skoro celá) Země; jinak by se totiž zbývající protoplanety od sebe „odpuďily“. Jedná se o důsledek zmiňovaných blízkých přiblížení bez plynu (Deienno a kol. 2019).

Také je jasné, že malá tělesa přirozeně zůstávají na okrajích konvergentní zóny, kde je pomalejší migrace. Pomáhá tomu i závislost rychlosti migrace na hmotnosti planety, $da/dt \propto M$. Proto vzniká **malý Merkur a zároveň Mars**. Úbytek hmotnosti pomocí externího mechanismu pak není potřeba (cf. Walsh a kol. 2011). Poznamenejme, že pro vysoké a dlouho trvající toky balvanů (nad $10^{-5} M_{\oplus}/y$) by planety v terestrické zóně přerostly a vznikly by „horké Neptuny“.

Pokud bychom navíc předpokládali, že Merkur vznikl v horkém plynném disku, poblíž evaporační čáry železa a Mg-silikátů (obr. 5), z balvanů driftujících k 0,4 au z větších r , bylo by tak možné vysvětlit jeho nadměrné **železné jádro Merkuru**. Balvany se totiž neustále přizpůsobují lokálním podmínkám (srážejí se, rozpadají, opět spojují, vypařují). To je velmi odlišné od starých nebulárních hypotéz, kde byl zdroj omezen na lokální materiál, mezi určitými evaporačními čarami, čili úzký prstenec (cf. Weidenschilling 1978). Potom odtržení silikátového pláště při srážce není třeba (cf. Benz 1988, Asphaug & Reufer 2014).

Merkur je také překvapivě bohatý na *středně* těkavé látky Na, S, K, Cl (dle sondy Messenger; Nittler a kol. 2018). To se zdá v rozporu s výše uvedeným, dokud si neuvědomíme, že v pozdní fázi vývoje disku je T nízká; dokonce nižší než rovnovážná T dnes. Slunce bylo totiž zastíněno **neprůhledným plynem**. Pak by těkavé látky mohly být dopraveny balvany driftujícími z větších r , které se (zase) přizpůsobují lokálním podmínkám. Alternativně lze uvažovat o transportu planetesimálami, neboli „pozdním závoji“.

Obdobně by bylo možné dopravit **vodu na Zemi** ledovými balvany v chladném disku (se sněžnou čarou dočasně na 1 au). Pokud by pocházely z $r < 5$ au, byl by jejich počet omezený. Pokud z $r > 5$ au, sice by nebyl omezen, ale zcela zablokovan Jupiterem. Důvodem je tlakový hrbol **v plynném disku**, vznikající za planetou o hmotnosti větší než asi $20 M_{\oplus}$, který otáčí směr driftování balvanů (**Bitsch a kol. 2018**). Otázkou je, zda jej nelze překonat při hromadění pevné látky, právě na tlakovém hrbolu? Kvantitativně, 1 zemský oceán $\approx 2,3 \cdot 10^{-4} M_{\oplus}$ vody; dopravit je třeba 2 až 8 oceánů, protože zemský plášť obsahuje dost vody (Peslier a ko. 2017). Podle našich simulací chladného disku je filtrační faktor $f = 1$ až 1,5 %. Při podílu ledu 0,1 a toku balvanů $2 \cdot 10^{-6} M_{\oplus}/y$, by potřebný čas dosahoval pouhých 10^5 y. To je na jednu stranu dobře (jde to), na druhou stranu špatně (jde to příliš snadno). Pokud bychom přece jen zvažovali velký tok, mohl být jen dočasný, přechodný; například náhlé překonání zmiňované bariéry po hromadění balvanů (při $\Sigma_p \approx \Sigma$).

Kromě migrace v plynném disku nastává též jev *horké stopy* (Chrenko a kol. 2017), způsobující růst excentricity. Funguje tak, že se planeta s nepatrnou výstředností neustále pohybuje vzhledem k plynu (jako po epicyklu), ohřívá své okolí, zanechává zředěný plyn za sebou, tudíž ji nezředěný plyn táhne

vpřed. Velmi pozoruhodné je, že při určitých podmínkách roste excentricita až na hodnoty 0,015–0,020 (viz obr. 6), což odpovídá současné **excentricitě Venuše a Země**. Jev nastává poměrně snadno pro nižší Σ a vyšší dM_p/dt ; tzn. spíše v pozdní fázi, snad při přechodném zvýšení toku balvanů (viz výše). Pozdní excitace excentricity externím mechanismem pak není třeba (cf. Brasser a kol. 2009).

Výhodou brzkého vzniku planet je též snazší vysvětlení, proč jsou jejich **orbity oddělené**. Jsou totiž oddělované třemi mechanismy: 1. srážkami (klasicky); 2. diferenciální migrací; 3. tlumením excentricity. Nevýhodou by byla neustávající migrace směrem ke Slunci, kdyby ovšem nebyla potlačována také třemi mechanismy: 1. blízkými přiblíženími (klasicky), 2. obráceným profilem $\Sigma(r)$, 3. buzením excentricity (horkou stopou). Ostatně lze ověřit, že excentricitu Merkuru je možné zvýšit jediným blízkým přiblížením k Venuši, a to až na současnou hodnotu 0,206 (oskulační), resp. 0,167 (vlastní). Venuše pak migruje mnohem rychleji směrem od Slunce (obr. 7). Totéž platí pro rozptýlení Marsu na Zemi, resp. 0,5-Zemi; jeho hodnota je 0,093 (oskulační), 0,052 (vlastní).

Na konci plynné fáze (po 10 My) v našem modelu běžně vzniká 4 až 6 planet (obr. 8); v závislosti na předepsané rychlosti migrace a trvání plynného disku. Jako nejpravděpodobnější se nám jeví **systém pěti planet**, protože musíme vysvětlit důležité geochemické pozorování — wolframovou anomálii pláště + kůry Země, jejíž současná hodnota je $\varepsilon_2 \equiv (N_{182W,2}/N_{183W,2})/(N_{182W,1}/N_{183W,1}) - 1 = 1,9 \pm 0,1$, kde indexy odpovídají rezervoárům: 1 ... mlhovina, 2 ... plášť + kůra. Důvodem, proč anomálie vzniká, jsou radioaktivní rozpady $^{182}\text{Hf} \rightarrow ^{182}\text{Ta} + e^+ + \nu$, $^{182}\text{Ta} \rightarrow ^{182}\text{W} + e^+ + \nu$, s poločasem rozpadu asi 9 My (izotop ^{183}W je stabilní) a zásadní odlišnost prvků: W ... siderofilní, Hf ... litofilní.

Kdyby akrece (vč. předměsíčního impaktu) ustala v čase do 10 My, Země by se diferencovala na jádro a plášť, nestabilní ^{182}Hf by se dostalo do pláště a následně by zde jeho rozpadem vznikl ^{182}W , čili příliš velká anomálie. Pozdější **předměsíční impakt** ovšem anomálii opět sníží, dojde-li k ekvibraci materiálu impaktoru a zemského pláště, při níž skoro všechen wolfram klesne do jádra. Náš jednoduchý geochemický model (Yu & Jacobsen 2011) ukazuje, že k impaktu by mělo dojít v čase okolo 45 My.

Neméně pozoruhodným důsledkem konvergence je, že impakty dvou 0,5-Zemí jsou stejně pravděpodobné jako kanonické (tzn. 0,9 a 0,1 M_\oplus). Dříve se soudilo, že jiné než kanonické nejsou možné, ale to již neplatí, neboť moment hybnosti lze přenášet evekční rezonancí v soustavě Slunce–Země–Měsíc (Čuk & Stewart 2012). Taková větší srážka by vedla k rychle rotující Zemi (Canup 2012). Protože jsou si 0,5-Země podobné, a jejich materiál pochází z podobné oblasti disku, je snazší splnit podmínku podobnosti Země a Měsíce. Výhodou také je, že by mezi souměřitelným projektilem a terčem měla být snazší úplná ekvibrace, neboli promísení látky (na škále cm).

Co znamená existence konvergentní zóny jinde? Je-li druhá konvergentní zóna také okolo 5 au, musí mezi nimi být **divergentní zóna**. Úzce souvisí s jedním fázovým přechodem, konkrétně vodní pára \rightarrow led (čes. sněžná čára; viz Bitsch a kol. 2014). Právě tam, kde se dnes nachází pás asteroidů.

Mezi 2 a 3 au bychom přitom očekávali existenci o něco větších protoplanet; marsovské až zemské. Tyto však migrují pryč v plynném disku (Brož a kol. 2018), což přirozeně znamená **úbytek hmotnosti v pásu asteroidů** faktorem až 10^2 , protože látka je soustředěna právě v protoplanetách. Zatímco pro tělesa protoplanetárních hmotností je zóna divergentní, pro tělesa menších hmotností (asteroidy, balvany) to vůbec platit nemusí. Naopak, balvany mohly okolo sněžné čáry klidně konvergovat.

Asteroidy se ovšem chovaly odlišně, protože byly **rozptýleny (skloněny)** protoplanetami migrujícími pryč. Naším hydrodynamickým modelem (a jeho extrapolací) jsme ověřili, že sklony drah asteroidů by

mohly dosáhnout i více než 10° a že aerodynamické tření od plynu působící na asteroidy je dostatečně slabé, takže je neztlumí zpět k $i \doteq 0$ (viz obr. 9). Potom excitace drah pomocí externího mechanismu není třeba (cf. Morbidelli a kol. 2010).

Není však v rozporu **existence suchých asteroidů** (typu S) ve vnitřním hlavním pásu a doprava vody na Zemi? Ne nutně. Pokud byla dopravována voda na Zemi v podobě ledových balvanů, musely přitom prolétávat i pásem asteroidů, ale účinnost jejich akrece (viz Ormel 2017) velmi klesá pro malá M a velká i . Obzvláště nízká by byla, pokud by disk balvanů byl tenký ($H_p/r \ll i$).

Obdobně by snad mohla zůstat **suchá Venuše**, pokud by sněžná čára vždy zůstala na $r > 0,7$ au. Pak by totiž nebyl žádný problém s překotným skleníkovým jevem a s chybějícím kyslíkem v její současné atmosféře (pozůstalém po disociaci H_2O a úniku H; Chassefière 1997, Gillmann a kol. 2020).

Závěrem shrňme, že tento model terestrického systému vysvětluje jeho vlastnosti výhradně místními hydrodynamickými jevy; žádné vnější vlivy nevyžaduje. To je poměrně radikální představa. Naznačuje nám to, že pro pochopení vzniku planet bude třeba testovat ještě mnoho hypotéz...

Andrews, S. M., Huang, J., Pérez, Laura, M., Isella, A., Dullemond, C. P., Kurtovic, N. T., Guzmán, V. V. a kol. The disk substructures at high angular resolution project (DSHARP). I. Motivation, sample, calibration, and overview. *Astrophys. J. Lett.*, **869**, 2, L41, 2018.

Asphaug, E., Reufer, A. Mercury and other iron-rich planetary bodies as relics of inefficient accretion. *Nat. Geo.*, **7**, s. 564–568, 2014.

Avenhaus, H., Quanz, S. P., Garufi, A., Perez, S., Casassus, S., Pinte, Ch., Bertrang, G. H.-M. a kol. Disks around T Tauri stars with SPHERE (DARTTS-S). I. SPHERE/IRDIS polarimetric imaging of eight prominent T Tauri disks. *Astrophys. J.*, **863**, 1, 44, 2018.

Benítez-Llambay, P., Masset, F., Koenigsberger, G., Szulágyi, J. Planet heating prevents inward migration of planetary cores. *Nature*, **520**, s. 63–65, 2015.

Benz, W., Slattery, W. L., Cameron, A. G. W. Collisional stripping of Mercury's mantle. *Icarus*, **74**, s. 516–528, 1988.

Bitsch, B., Morbidelli, A., Lega, E. Stellar irradiated discs and implications on migration of embedded planets. II. Accreting-discs. *Astron. Astrophys.*, **564**, A135, 2014.

Bitsch, B., Morbidelli, A., Johansen, A., Lega, E., Lambrechts, M., Crida, A. Pebble-isolation mass: Scaling law and implications for the formation of super-Earths and gas giants. *Astron. Astrophys.*, **612**, A30, 2018.

Brasser, R., Morbidelli, A., Gomes, R., Tsiganis, K., Levison, H. F. Constructing the secular architecture of the solar system II: the terrestrial planets. *Astron. Astrophys.*, **507**, s. 1053–1065, 2009.

Brož, M., Chrenko, O., Nesvorný, D., Dauphas, N. Early terrestrial planet formation by torque-driven convergent migration of planetary embryos. *Nat. Astron.*, **5**, s. 898–902, 2021.

Brož, M., Chrenko, O., Nesvorný, D., Lambrechts, M. Dynamics of multiple protoplanets embedded in

- gas and pebble discs and its dependence on Σ and v parameters. *Astron. Astrophys.*, **620**, A157, 2018.
- Canup, R. Forming a Moon with an Earth-like composition via giant impact. *Science*, **338**, s. 1052–1055, 2012.
- Ćuk, M., Stewart, S. T. Making the Moon from a fast-spinning Earth: A giant impact followed by resonant despinning. *Science*, **338**, s. 1047–1052, 2012.
- Deienno, R., Walsh, K. J., Kretke, A., Levison, H. F. Energy dissipation in large collisions — No change in planet formation outcomes. *Astrophys. J.*, **876**, 103, 2019.
- Duncan, M. J., Levison, H. F., Lee, M. H. A multiple time step symplectic algorithm for integrating close encounters. *Astron. J.*, **116**, s. 2067–2077, 1998.
- Fedele, D., van der Ancker, M. E., Henning, T., Jayawardhana, R., Oliveira, J. M. Timescale of mass accretion in pre-main sequence stars. *Astron. Astrophys.*, **510**, A72, 2010.
- Flock, M., Fromang, S., Turner, N. J., Benisty, M. 3D radiation nonideal magnetohydrodynamical simulations of the inner rim in protoplanetary disks. *Astrophys. J.*, **835**, 230, 2017.
- Gillmann, C., Golabek, G. J., Raymond, S. N. Dry late accretion inferred from Venus's coupled atmosphere and internal evolution. *Nat. Geo.*, **13**, s. 265–269, 2020.
- Chambers, J. E., Wetherill, G. W. Making the terrestrial planets: N -body integrations of planetary embryos in three dimensions. *Icarus*, **136**, s. 304–327, 1998.
- Chassefière, E. Loss of water on the young Venus: The effect of a strong primitive solar wind. *Icarus*, **126**, s. 229–232, 1997.
- Chrenko, O., Brož, M., Lambrechts, M. Eccentricity excitation and merging of planetary embryos heated by pebble accretion. *Astron. Astrophys.*, **606**, A114, 2017.
- Kretke, K. A., Lin, D. N. C. The importance of disk structure in stalling Type I migration. *Astrophys. J.*, **755**, 74, 2012.
- Kruijer, T. S., Burkhardt, Ch., Budde, G., Kleine, T. Age of Jupiter inferred from the distinct genetics and formation times of meteorites. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **114**, 26, s. 6712–6716, 2017.
- Lambrechts, M., Johansen, A. Rapid growth of gas-giant cores by pebble accretion. *Astron. Astrophys.*, **544**, A32, 2012.
- Morbidelli, A., Brasser, R., Gomes, R., Levison, H. F., Tsiganis, K. Evidence from the asteroid belt for a violent past evolution of Jupiter's orbit. *Astron. J.*, **140**, s. 1391–1401, 2010.
- Nittler, L. R., Chabot, N. L., Grove, T. L., Peplowski, P. N. The chemical composition of Mercury. in Mercury, The view after Messenger, Cambridge Univ. Press, s. 30–51, 2018.
- Ogihara, M., Kokubo, E., Suzuki, T. K., Morbidelli, A. Formation of the terrestrial planets in the solar system around 1 au via radial concentration of planetesimals. *Astron. Astrophys.*, **612**, L5, 2018.

Ormel, C. W. The emerging paradigm of pebble accretion. *Astrophys. Space Sci. Lib.*, **445**, s. 197–228, 2017.

Paardekooper, S.-J., Baruteau, C., Kley, W. A torque formula for non-isothermal Type I planetary migration — II. Effects of diffusion. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, **410**, s. 293–303, 2011.

Raymond, S. N. Terrestrial convergence. *Nat. Astron.*, **5**, s. 875–876, 2021.

Walsh, K. J., Morbidelli, A., Raymond, S. N., O'Brien, D. P., Mandell, A. M. A low mass for Mars from Jupiter's early gas-driven migration. *Nature*, **475**, s. 206–209, 2011.

Warren, P. H. Stable-isotopic anomalies and the accretionary assemblage of the Earth and Mars: A subordinate role for carbonaceous chondrites. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **311**, s. 93–100, 2011.

Weidenschilling, S. J. Iron silicate fractionation and the origin of Mercury. *Icarus*, **35**, s. 99–111, 1978.

Yu, G., Jacobsen, S. B. Fast accretion of the Earth with a late Moon-forming giant impact. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **108**, 43, s. 17604–17609, 2011.

Obr. 1 Podíl hvězd s infračerveným excesem nebo emisí v závislosti na stáří příslušné hvězdokupy. Data převzata z prací Fedele a kol. (2010), Fang a kol. (2013), Haisch & Lada (2001).

Obr. 2 Relativní změny povrchové hustoty Σ způsobované merkurovskými až marsovskými protoplanetami; patrná jsou spirální ramena.

Obr. 3 Rychlost migrace da/dt v disku s obráceným profilem Σ , v závislosti na velké poloose a a hmotnosti protoplanety m a její extrapolace v čase t .

Obr. 4 Nahoře: Rozdělení velkých poloos a a hmotností m pro 50 simulací konvergentní migrace. Sluneční soustava je vyznačena zeleně. Dole: Vývoj velkých poloos a v závislosti na čase t pro jednu z úspěšných simulací, při níž vznikl systém pěti planet.

Obr. 5 Nahoře: Profily teploty T plynu pro různé disky (raný a pozdní); Merkur se nachází v oblasti, kde dosahovala evaporační teploty $T_{ev} \approx 1\,400$ K. Dole: Změny teploty $T - T(r)$ vyvolané horkou stopou za planetami zahřátými při akreci balvanů.

Obr. 6 Časový vývoj velkých poloos a a radiálních vzdáleností r pro 5 planet; růst excentricity e odpovídá oscilacím v r .

Obr. 7 Velká poloosa a a excentricita e pro Merkur rozptýlený na Venuši pro 50 simulací. Nákres rozptýlené dráhy Merkuru a migrace Venuše směrem od Slunce.

Obr. 8 Rozdělení počtu planet N_{pl} a poměru hmotností M_2/M_1 předměsíčního impaktu pro 50 simulací.

Obr. 9 Nahoře: Objemová hustota ρ plynu ve vertikálním směru v oblasti pásu asteroidů, kde protoplanety (kroužky) rozptylují asteroidy (křížky). Dole: Velká poloosa a a sklon I pro protoplanety

a asteroidy. Za dobu 24 ky dosahují $I \approx 3^\circ$, což lze extrapolovat s předpokladem úměry $t^{1/2}$.