

## Bouřlivý vznik planet

Miroslav Brož

Na první pohled by se mohlo zdát, že původ planet sluneční soustavy musí být dobře prozkoumaný a v podstatě vyřešený problém. Není tomu tak. V posledním desetiletí bylo učiněno několik překvapivých objevů, které zcela změnily pohled na vznik planet jako na ustálený proces. Navíc existují zcela zásadní nevyřešené problémy, například nevíme přesně, jak vzniklo jádro Jupiteru, proč mají obří planety skloněné rotační osy, kde přesně se planety formovaly nebo kdy vznikl hlavní pás asteroidů.

Současný stav sluneční soustavy, to jest jediný přímo pozorovatelný stav, je samozřejmě východiskem pro jakékoliv teorie vzniku. Připomeňme si jej alespoň prostým výčtem důležitých těles, respektive skupin těles, a to v přibližném pořadí dle vzdálenosti od centra: Slunce, Kreutzova skupina komet, Merkur, Venuše, Země a Měsíc, blízkozemní planetky, Mars, křížiči Marsu, hlavní pás asteroidů, oblast Cybele, skupina Hilda, komety Jupiterovy rodiny, Jupiter (plus jeho regulární a iregulární satelity), Trojané, Saturn, Uran, Neptun, Trojané Neptunu, Kentauři, komety typu Halley, Kuiperův pás, Plutina, rozptýlený disk, oddělený disk, dlouhoperiodické komety, vnitřní a vnější Oortův oblak (viz obr. 1).

Kromě samotného uspořádání je určující také celková hmotnost těles. Mějme proto na paměti, že Slunce má hmotnost  $M_S \approx 2 \cdot 10^{30}$  kg, Jupiter (jakožto zástupce plynných obřích planet)  $10^{-3} M_S$ , Uran (ledový obr)  $5 \cdot 10^{-5} M_S$ , Země (za terestrické planety)  $10^{-6} M_S$ , hlavní pás asteroidů  $5 \cdot 10^{-4}$  hmotnosti Země, Trojané  $10^{-5} M_Z$ , transneptunická tělesa (tzn. Kuiperův pás, rozptýlený a oddělený disk)  $0,1 M_Z$ , Oortův oblak 1 až  $10 M_Z$ . Hmotnost ostatních je v tomto kontextu zanedbatelná. Ve výčtu explicitně nezmiňujeme meteoroidy, jejichž rozdělení do určité míry kopíruje rozdělení planetek, ani nediskutujeme rozložení prachu, protože prachové částice tak rychle spirálují ke Slunci (působením Poyntingova-Robertsonova jevu), že nemohou být původní.

Podle současných poznatků je scénář vzniku sluneční soustavy možno shrnout následovně:

**1. Gravitační kolaps.** Soustava vznikla před  $(4,56 \pm 0,01)$  miliardami let gravitačním kolapsem mezihvězdného plynoprachového oblaku; kolaps byl možná spuštěn blízkým výbuchem supernovy. Podle spektroskopie sluneční atmosféry soudíme, že materiál obsahoval 2 % prvků hmotnějších než helium, které předtím vznikly v nitru jiných hvězd. Zmiňované stáří odvozujeme z radiometrické analýzy meteoritů, velký počet obyčejných chondritů utuhl právě před 4,56 miliardami let a *žádný* není starší. Jejich struktura navíc svědčí o náhlém zahřátí a rychlém ochlazení, čili o horkém počátku. Odhlédneme-li od těkavých prvků (vodíku, helia aj.) mají Slunce, planety i meteority *totožné* prvkové složení, což jasně prokazuje společný původ (obr. 2).

**2. Protoplanetární disk.** Při smršťování se přeměňuje gravitační potenciální energie na teplo (tj. vnitřní energii látky). Střední část oblaku se zhustila a zahřála natolik, že v ní začaly termonukleární přeměny jader vodíku na jádra helia - vzniklo Slunce. Díky energii uvolňované při těchto reakcích kolaps ustal a v nitru Slunce se ustavila hydrostatická rovnováha. Vnější část rotující mlhoviny se kvůli zachování momentu hybnosti zploštila do disku. Jeho celkovou hmotnost můžeme odhadnout ze současné hmotnosti planet (0,1 % hmotnosti Slunce), ale musíme ji zvětšit kvůli zmiňovaným těkavým prvkům, tudíž dosahovala nejméně 2 % hmotnosti Slunce.

**3. Akrece → planetesimály, planetární embrya.** Planety rozhodně nemohly vzniknout přímo gravitačním kolapsem, na to byl disk příliš řídký a horký (viz Jeansovo kritérium). Při postupném chladnutí plynu infračerveným vyzařováním nejprve vznikala prachová zrna z refraktorních (netěkavých) prvků a jejich sloučenin, např. oxidů vápníku, hliníku. Protoplanetární disk byl nejhustší ve středové rovině, kde srážky a gravitační fokusování vedly k postupnému spojování prachu do větších těles - planetesimál a planetárních embryí, a to na časové škále tisíců až statisíců let, jak víme podle počítačových simulací. Uplatňovaly se i negravitační síly, zejména aerodynamické tření prachu o plyn, který obíhá kolem Slunce *pomaleji*, neboť je v gravitačním poli „nadlehčován“ gradientem tlaku. Důležitou úlohu sehrála *turbulence* plynu, který s sebou strhává prach nebo balvany, a může tak významně zvýšit koncentraci pevné látky v daném místě.

**4. Částečné kolapsy → obří planety.** Ve větší vzdálenosti od Slunce ( $> 3$  astronomické jednotky) byly příhodnější podmínky pro vznik planet. Hustota plynu byla sice nižší, ale vzhledem k nižší teplotě zde mohly kondenzovat i *ledové* částice. Růst hmotnosti embrya byl urychlen přítomností plynu, neboť aerodynamické brzdění při průletu balvanů okolo embrya způsobuje jejich spirálování a následnou akreci. Díky přítomnosti hmotného planetárního embrya došlo efektivně k „zahuštění“ plynu a k lokálním kolapsům, jež daly vzniknout obřím plynným planetám, Jupiteru a Saturnu, i s jejich systémy regulárních satelitů. Časová škála tohoto procesu je pouhých 10 miliónů let, jak víme z pozorování disků okolo cizích mladých hvězd a z modelů hvězdného vývoje. Uran a Neptun se ovšem tvořily *pomaleji*, neboť ve větší vzdálenosti jsou delší oběžné periody, a proto u nich ke kolapsu plynu nemohlo dojít. Nabalily jen relativně tenkou vrstvu plynu a zůstaly ledovými obřími planetami.

**5. Migrace v plynném disku.** Planety vnořené v plynném disku migrovaly kvůli gravitačním interakcím se spirálními vlnami v disku a každá se jinou rychlostí přibližovala ke Slunci (obr. 3). Přitom se mohly zachytit ve vzájemných gravitačních rezonancích. Soudě podle současné polohy Jupiteru a Saturnu, je pravděpodobné jejich zachycení v rezonanci 3:2 (tzn. oběžné periody  $P_S:P_J$  byly v poměru 3:2) a následně *společná* migrace směrem od Slunce. Jupiter při tomto „exkurzu“ navštívil okraj terestrické zóny, odkud vymetl embrya, což se zdá v souladu s malým rozměrem Marsu. Zbývající plyn byl slunečním větrem rozfoukán zpět do mezihvězdného prostoru.

Za nepřímý důkaz, že taková migrace probíhá, lze považovat pozorování horkých jupiterů a kompaktních extrasolárních systémů (jako je např. Kepler-11). Tato tělesa se zřejmě nemohou vytvořit v těsné blízkosti hvězdy, nýbrž pouze ve větších vzdálenostech. Důvodem, proč horký jupiter nespíraluje až ke hvězdě, ale zastaví se několik setin astronomické jednotky daleko, je vnitřní *mezera* v disku. Vzniká tak, že ultrafialové záření hvězdy ionizuje plyn, který je posléze ovlivňován magnetickým polem rotující hvězdy. Pod korotační orbitou, kde je keplerovská oběžná rychlost větší než rychlost pohybu magnetického pole, dochází k brzdění částic plynu a jejich pádu na hvězdu, čímž se ovšem vytváří ona mezera.

**6. Srážky embryí → terestrické planety.** Planety zemského typu vznikly *později* než obří, a to postupnými srážkami několika desítek až stovek planetárních embryí. Trvání takového procesu je dle simulací řádově 100 miliard let, což je v souladu s radiometrickým měřením dob tuhnutí zemských nebo měsíčních hornin. Při poslední velké srážce s diferencovanou Protozemí vznikl Měsíc, čímž mimo jiné vysvětlujeme, proč má Měsíc podobné složení jako *plášť* Země. Anomální velké železné jádro Merkuru lze vysvětlit obdobně, jako odtržení silikátového pláště při impaktu. Impakty se též vysvětlují, proč mají terestrické planety skloněné rotační osy.

**7. Migrace v disku planetesimál.** Nakonec proběhla migrace obřích planet díky interakci s diskem zbývajících planetesimál (komet) za Neptunem, o hmotnosti řádově 30 hmotností Země. Jupiter - jakožto nejmotnější planeta - neúčinněji vymršťuje planetesimály pryč od Slunce, tudíž se sám posouvá směrem ke Slunci. U Saturnu, Uranu a Neptunu naopak převažuje „odebírání“ planetesimál Jupiterem, čili se musejí posouvat směrem od Slunce. Nestabilita systému obřích planet, jejich vzájemná blízká přiblížení (Uranu nebo Neptunu k Saturnu a k Jupiteru; viz obr. 4) a dynamické tření, které tlumilo zvýšené excentricity a sklony drah, vedly až ke dnešní konfiguraci sluneční soustavy.

Zmiňované komety i asteroidy hlavního pásu byly při rekonfiguraci planet rozptýleny a zřejmě mohly způsobit bombardování měsíců obřích planet nebo terestrických těles. Podle radiometrického datování měsíčních hornin odvozujeme stáří posledních pánev a mnoha kráterů na Měsíci na 3,92 až 3,85 miliard let. Toto období *pozdního těžkého bombardování* (700 miliard let po vzniku planet) přirozeně ztotožňujeme s výše uvedenou nestabilitou planetárního systému (obr. 5).

Protože se v simulacích nestability se čtyřmi obřimi planetami často ukazuje, že jeden s ledových obrů může být vypuzen po sérii blízkých přiblížení, zdá se teoreticky možné, že sluneční soustava původně obsahovala *pět* obřích planet. Přestože „naši“ vypuzenou planetu by dnes již nebylo možné identifikovat, je tato představa v logickém souladu s pozorovanou populací *volně plujících planet*, o kterých svědčí pozorování gravitačních mikročoček.

**8. Přiblížení hvězd a galaktické slapy → oddělený disk a Oortův oblak.** Na tělesa rozptýleného disku - s velkou excentricitou a vzdáleností v apocentru - mohou mít vliv občasné blízké přiblížení cizích hvězd, během nichž se pericentrum dráhy vzdálí od Neptunu, a vytvoří se tak oddělený disk. Dále působení galaktických *slapů*, čili rozdílu gravitace působící na Slunce a na těleso, postupně zvyšuje sklony drah, až se stávají izotropní a vytvářejí Oortův oblak. Jeho existenci ostatně potvrzují pozorování dlouhoperiodických komet.

**9. Jarkovského jev, gravitační rezonance a srážky malých těles.** Od rozptýlení disku planetesimál se orbity planet již podstatně nezměnily. Naproti tomu velké poloosy asteroidů se mění významně, a to působením anizotropní emise tepelného záření, čili *Jarkovského jevu*. Ani excentricity nezůstávají konstantní, mění se *chaotickou difuzí*, která je efektivní v místech, kde se překrývají gravitační rezonance. Dochází také ke tříštění asteroidů při vzájemných srážkách a vzniku *rodin asteroidů* s podobnými dráhami. Bez porozumění tomuto dlouhodobému vývoji, trvajícímu bezmála 4 miliardy let, samozřejmě nelze pochopit ani předcházející fáze vzniku planet.

Asteroidy, na něž lze nahlížet jako na „zbytky“ po formování planet, jsou nejdůležitějším zdrojem informací o minulosti planetárního systému a právě sem zaměřujeme výzkum na Astronomickém ústavu UK. Intenzivně se zabýváme například rodinami asteroidů v hlavním pásu [3], asteroidy v rezonancích středního pohybu s Jupiterem [6], obdobím pozdního těžkého bombardování [5], zdrojem bombardování Měsíce [4] nebo původem iregulárních měsíců obřích planet [8].

Co se týká budoucích výzkumných záměrů, tedy alespoň těch, které dokážeme dnes odhadnout, hodláme například zlepšit kolizní model hlavního pásu - využijeme přitom nová observační data z družice WISE i nové hydrodynamické simulace srážek a poznatky o pevnosti asteroidů. Budeme zkoumat vlastnosti Trojanů Jupiteru a jejich vznik v kontextu

nejnovějších scénářů pro migraci planet. Pracujeme též na zpřesnění výpočtů Jarkovského jevu pro nepravidelná tělesa, které spočívá v numerickém řešení rovnice vedení tepla.

--

rámečky:

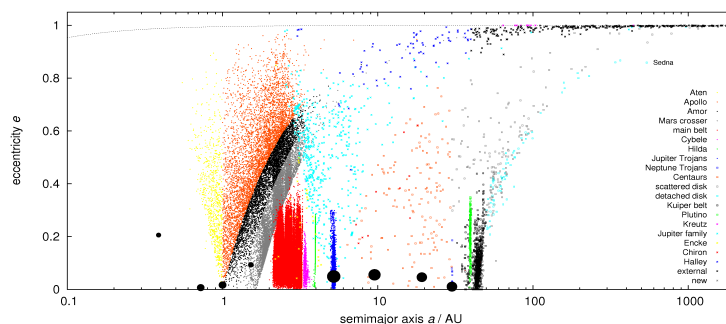
**Jeansovo kritérium.** Pro posouzení, zda může dojít ke gravitačnímu kolapsu oblaku plynu, lze použít Jeansovo kritérium, podle kterého hmotnost  $M$  oblaku musí být větší než kritická hmotnost  $M_J \approx [kT/(G\mu m_u)]^{3/2} \rho^{-1/2}$ , kde  $k$  označuje Boltzmannovu konstantu,  $T$  termodynamickou teplotu,  $G$  gravitační konstantu,  $\mu$  průměrnou hmotnost molekul v atomových hmotnostních jednotkách  $m_u$  a  $\rho$  hustotu. Vidíme, že pro kolaps je příhodná nízká teplota a zároveň vysoká hustota. V průběhu kolapsu se ovšem zmenšuje gravitační potenciální energie oblaku a zároveň se zvětšuje jeho kinetická energie, respektive vnitřní energie látky, čili dochází ke zvyšování hustoty i teploty.

**Mlhovina minimální hmotnosti.** Základní představu o prostředí, ve kterém planety vznikaly, získáme tak, že si hmotu stávajících planet představíme „rozprostřenou“ podél jejich drah. Zároveň však musíme planety doplnit o těžké prvky (především vodík a helium), aby látka mlhoviny měla stejné chemické složení jako Slunce. V praxi to znamená vynásobit hmotnosti terestrických planet přibližně 300krát, plyných obrů 10krát a ledových obrů asi 50krát. Vyneseme-li pak do grafu závislost plošné hustoty  $\sigma$  na vzdálenosti  $r$ , zřetelně uvidíme, že pozvolna klesá přibližně jako  $\sigma(r) \approx 3 \cdot 10^4 \text{ kg/m}^2 [r/(1 \text{ AU})]^{-3/2}$ , ale velký úbytek hmoty je patrný u Merkuru, Marsu, hlavního pásu asteroidů a Kuiperova pásu (viz obr. 6).

**Radiometrická metoda.** Pro datování událostí ve sluneční soustavě je zcela zásadní použití radiometrie, čili měření poměrů stabilních a nestabilních prvků. Radioaktivita, např.  $\beta$ -rozpad rubidium  $^{87}\text{Rb} \rightarrow$  stroncium  $^{87}\text{Sr}$ , se řídí jednoduchým zákonem  $N_{\text{Sr}}(t) = N_{\text{Sr}}(0) + N_{\text{Rb}}(t) \exp(\lambda t) - N_{\text{Rb}}(t)$ , kde  $N(t)$  označuje relativní počet atomových jader v čase  $t$ , poměřovaný vždy stabilním izotopem  $^{86}\text{Sr}$ ,  $N(0)$  počet na počátku (při utužení) a  $\lambda$  je rozpadová konstanta, která jest vnitřní vlastností jader a našťastí nijak nezávisí na vnějších podmínkách. Samozřejmou podmínkou je, že se počty mateřských nebo dceřinných prvků nesmějí měnit jinými procesy, např. konvekce nebo difuze, proto obvykle měříme pevnou látku (horninu). Nemožnost měření v čase  $t = 0$  obejdeme tak, že měření  $N_{\text{Sr}}(t)$  a  $N_{\text{Rb}}(t)$  provedeme ve dvou nebo více minerálech (s různými poměry Rb/Sr) a výše uvedenou rovnici použijeme dvakrát (vícekrát), abychom vypočetli čas  $t$  i poměr  $N_{\text{Sr}}(0)$ , kterážto veličina je pro všechny minerály stejná, neboť izotopy  $^{86}\text{Sr}$  a  $^{87}\text{Sr}$  jsou z chemického hlediska nerozlišitelné.

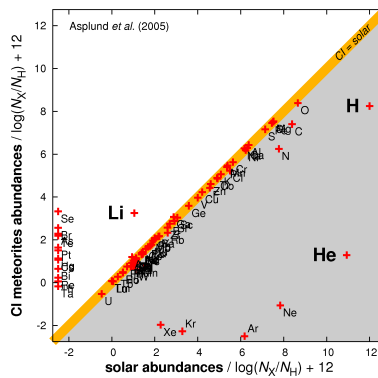
--

popisky obrázků:



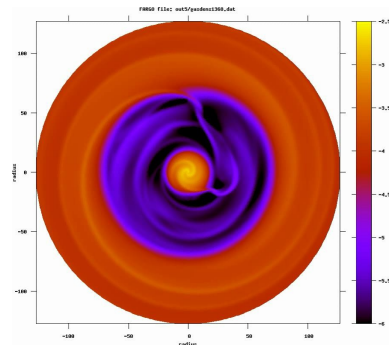
ae.png

Obr. 1 - Pozorovaný stav sluneční soustavy znázorněný na grafu velká poloosa  $a$ , excentricita  $e$ . Symboly a barvami jsou rozlišeny planety a jednotlivé populace malých těles: asteroidy jsou označeny kroužky, transneptunické objekty čtverečky a komety křížky. Tečkovaná linie (nahore) odpovídá perihelové vzdálenosti rovné poloměru Slunce.



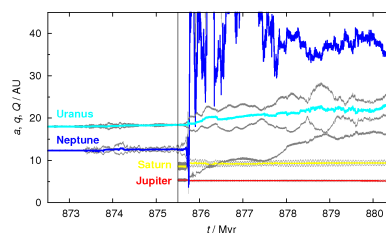
slunce\_meteority\_abundances\_npa.png

Obr. 2 - Relativní zastoupení prvků ve sluneční atmosféře a v chondritických meteoritech typu CI. Většina netěkavých prvků má prakticky stejné abundance ve Slunci i v meteoritech (body leží na přímce  $y = x$ ). Meteority jsou ochuzené pouze o prvky těkavé (H, He, N, C, O) nebo vzácné plyny (Ne, Ar, Xe, Kr), které nevytvářejí sloučeniny. Slunce je naopak ochuzeno o lithium.



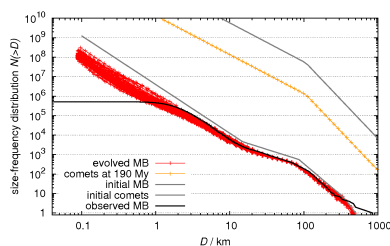
fargo2D1D\_out5\_gasdens\_00001555.jpg

Obr. 3 - Simulace protoplanetárního disku se dvěma planetami o hmotnostech Jupiteru a Saturnu. Na osách jsou souřadnice  $x, y$ , barevně je vyznačena sloupcová hustota disku (v logaritmické škále). Po lokálním gravitačním kolapsu plynu vytvořily planety v disku mezery, jež se překrývají. Spirální vlny za okraji této společné mezery pak mohou vést k migraci planet směrem ke Slunci a po zachycení planet ve vzájemné rezonanci ke společné migraci směrem od Slunce. Výpočet byl proveden hydrodynamickým kódem Fargo.



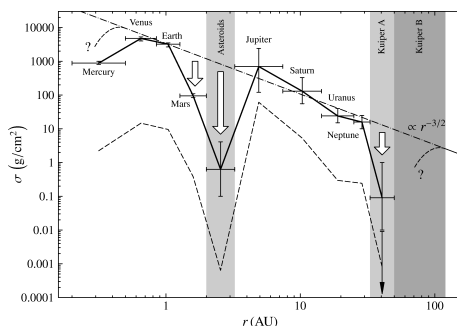
jumping\_jupiter\_MORBY\_at.png

Obr. 4 - Vývoj velkých poloos (a také pericenter a apocenter) v závislosti na čase pro čtyři obří planety, ovlivňované diskem planetesimál o hmotnosti 35 hmotností Země, počítaný numerickým integrátorem SyMBA. V tomto konkrétním případě došlo k blízkému přiblížení Neptunu k Saturnu a poté k Jupiteru, jehož výsledkem je velmi rychlá změna velké poloosy Saturnu směrem ven a Jupiteru směrem dovnitř. Z tohoto důvodu se uvedený scénář migrace nazývá „skákající Jupiter“. Jeho výhodou je, že dobře vysvětluje pozorovanou strukturu hlavního pásu, zejména malý počet asteroidů na vysokých sklonech. Podle [7].



boulder\_MB\_comets\_FAMS4\_sfd\_4000.png

Obr. 5 - Simulace pozdního velkého bombardování znázorněná na kumulativním rozdělení velikostí (tj. počet těles  $N$  s průměrem větším než  $D$  v závislosti na  $D$ ) pro hlavní pás asteroidů (červeně) a transneptunické komety (oranžově). Šedými linkami je znázorněn počáteční stav, černě pak pozorované rozdělení hlavního pásu. Z grafu je patrné, že komety roztržily řádově  $10^2$  asteroidů o průměru  $D > 100$  km. Skutečnost, že pozorujeme pouze 20 rodn této velikosti, si vysvětlujeme zejména další fragmentací asteroidů při sekundárních kolizích nebo častými rozpady kometárních jader při přiblížení ke Slunci. Převzato z [5].



16-1.png

Obr. 6 - Plošná hustota protoplanetárního disku v závislosti na vzdálenosti  $r$  od Slunce. Čárkovaná čára byla odvozena z pozorovaných hmotností planet a planetek. Plná čára vznikla doplněním těles o vodík a helium. Bílé šipky naznačují úbytek materiálu v porovnání s mocninným průběhem. Převzato z [2].

--

literatura:

- 1) Brož M., Šolc M.: Fyzika sluneční soustavy. Praha: Matfyzpress, 2013. ISBN 978-80-7378-236-8.
- 2) Bertotti B., Farinella P., Vokrouhlický D.: Physics of the Solar System. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2003. ISBN 978-14-0201-509-0.
- 3) Bottke W.F., Vokrouhlický D., Brož M., Nesvorný D., Morbidelli A.: Dynamical spreading of asteroid families by the Yarkovsky effect. *Science*, 294, 1693, 2001.
- 4) Bottke W.F., Vokrouhlický D., Minton D., Nesvorný D., Morbidelli A., Brasser R., Simonson B., Levison H.F.: An Archaean heavy bombardment from a destabilized extension of the asteroid belt. *Nature*, 485, 78, 2012.
- 5) Brož M., Morbidelli A., Bottke W.F., Rozehnal J., Vokrouhlický D., Nesvorný D.: Constraining the cometary flux through the asteroid belt during the late heavy bombardment. *Astron. Astrophys.*, 551, A117, 2013.
- 6) Brož M., Rozehnal J.: Eurybates - the only asteroid family among Trojans? *Mon Not. R. Astron. Soc.*, 414, 565, 2011.
- 7) 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, 1391, 2010.
- 8) Nesvorný D., Vokrouhlický D., Morbidelli A.: Capture of irregular satellites during planetary encounters. *Astron. J.*, 133, 1962, 2007.

--

Mgr. Miroslav Brož, Ph.D. (\*1975) vystudoval astronomii a astrofyziku na MFF UK. Pracuje na Astronomickém

ústavu UK a zabývá se zejména nebeskou mechanikou, numerickými simulacemi a fyzikou malých těles sluneční soustavy. Působí také na Hvězdárně a planetáriu v Hradci Králové.

--

Abstract: Stormy formation of planets by Miroslav Brož. It seems that the origin of planets is a well-known or even almost-solved problem but this is simply not true. During the last decade, several discoveries were announced which changed our view of planetary formation as a stationary process. Moreover, there are crucial problems still to be solved, for example we do not know how Jupiter's core formed, why the giant planets have oblique rotational axes, at which heliocentric distances the planets formed or when the main asteroid belt was created. The asteroids are actually „remnants“ of planetary formation and they represent the most important source of information on the Solar System origin. That is the reason why our research at the Astronomical Institute of the Charles University is focused on asteroids.

--

upozornění na knihu [1] nebo její recenze?