

vznik našej planetárnej sústavy – encyklopedické heslo

Podľa súčasného, najviac uznávaného modelu, Slnko a jeho planéty vznikli z obrovského oblaku medzihviezdnej hmoty pred asi 4,6 až 4,7 miliardami rokov. Stavebným materiálom bol plyn a prach v pôvodnej chladnej materskej globule. Oblak sa vlastnou gravitáciou zmršťoval, v jeho strede sa vytvorilo Slnko a okolo neho postupne vznikali planéty a medziplanetárna hmota. Okolo mnohých mladých hviezd sa planéty formujú aj v súčasnosti.

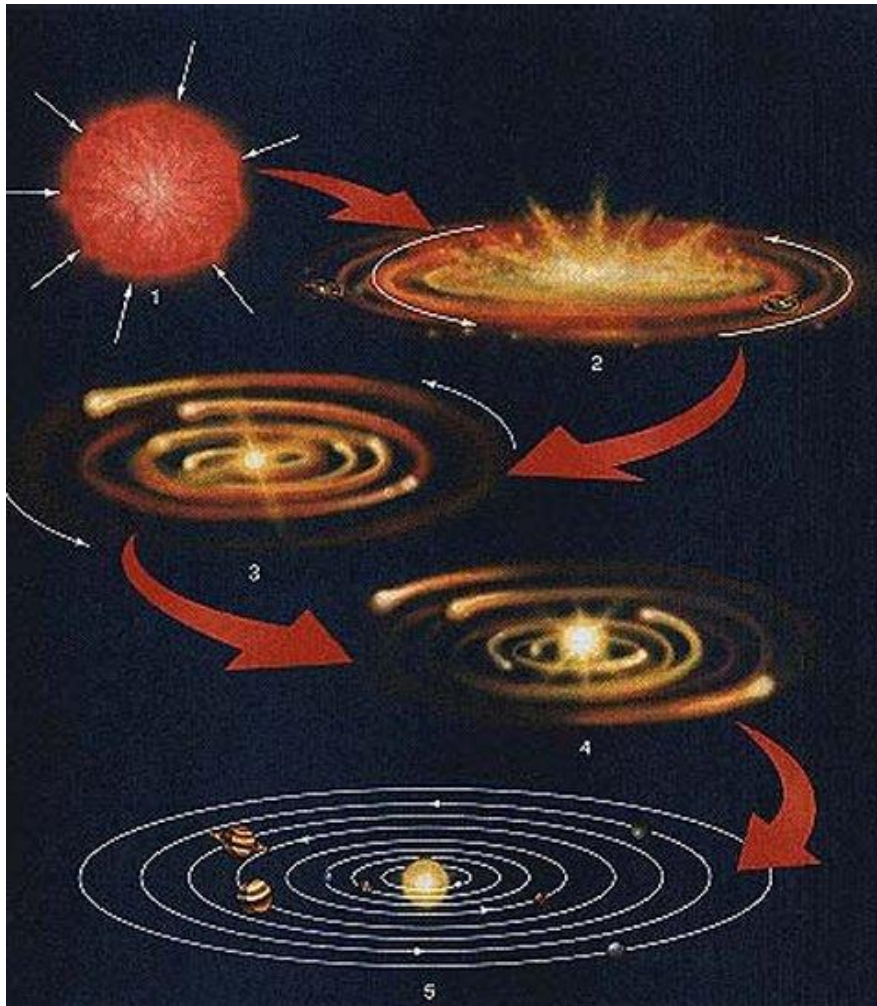
Heslo vypracoval: Mgr. Marek Husárik, PhD.

Astronomický ústav Slovenskej akadémie vied, Tatranská Lomnica
mhusarik@ta3.sk

Dátum aktualizácie: august 2009

vznik našej planetárnej sústavy – čo si má zapamätať žiak

Podľa súčasného, najviac uznávaného modelu, Slnko a jeho planéty vznikli z obrovského oblaku medzihviezdnej hmoty pred asi 4,6 až 4,7 miliardami rokov. Stavebným materiálom bol plyn a prach v pôvodnej chladnej materskej globule. Oblak sa vlastnou gravitáciou zmršťoval, v jeho strede sa vytvorilo Slnko a okolo neho postupne vznikali planéty a medziplanetárna hmota. Okolo mnohých mladých hviezd sa planéty formujú aj v súčasnosti. V hľadaní dôkazov o vzniku a formovaní našej sústavy výrazne pomohli objavy exoplanét na začiatku 90-tych rokov a objavy hviezd s protoplanetárnymi diskami.



Obrázok 1: Schématické znázornenie vzniku planetárneho systému.

vznik našej planetárnej sústavy – čo má na prípravu k dispozícii učiteľ

Pôvod našej sústavy nie je stále dostatočne vysvetlený. Množstvo otázok nahrádzajú ďalšie a ďalšie. Každá odpoveď prináša nový pohľad na zmysel bytia, existenciu a evolúciu života ako takého, a množstvo filozofických otázok.

Vznik a vývoj našej planetárnej sústavy je súbor procesov, ktorými sa sformovali telesá sústavy do dnešnej podoby. Pri hľadaní teórií opisujúcich jej vznik sa zapája mnoho vedných odborov vrátane astronómie, fyziky a geológie. V hľadaní dôkazov o vzniku a formovaní našej sústavy výrazne pomohli objavy exoplanét na začiatku 90-tych rokov a objavy hviezd s protoplanetárnymi diskami. Študovanie našej planetárnej sústavy by sme mohli rozdeliť do troch navzájom sa dopĺňajúcich prístupov:

- Astronomické pozorovania protoplanetárnych diskov okolo mladých hviezd poskytujú veľmi cenné informácie o možných podmienkach počas ranej histórie našej sústavy a časových škálach spojených s formovaním planét. Objavy nových planét krúžiacich okolo vzdialených hviezd ukazujú úžasnú rozmanitosť možných planetárnych systémov a poskytujú tak ďalší priestor pre teórie ich formovania.
- Fyzikálne, chemické a izotopické analýzy meteoritov a vzoriek privezených vesmírnymi misiami tvoria dôležitú informáciu o tvorbe a evolúcii objektov našej planetárnej sústavy a ich zložení (najmä terestrických planét, asteroidov a komét).
- Teoretické výpočty a numerické simulácie pokrývajú každú fázu formovanie sústavy. Poskytujú cenné nahliadnutia do komplexnej súhry fyzikálnych a chemických procesov a pomáhajú vyplniť niektoré medzery v nedostupných astronomických údajoch.

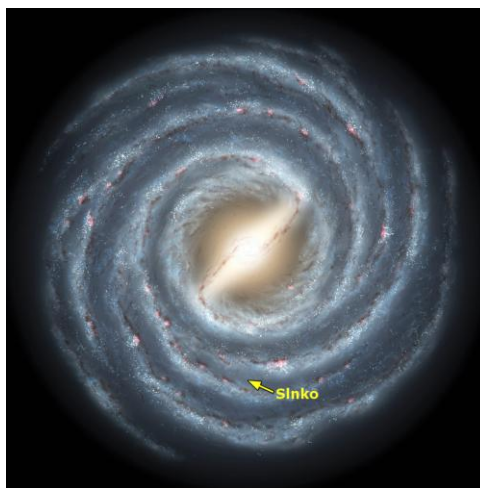
Teórie o pôvode našej planetárnej sústavy

Prvé predstavy o vzniku vesmíru pochádzajú už z dôb, kedy ľudstvo začalo spoznávať, že Slnko, Mesiac a planéty sú mimozemské telesá. Rôzne náboženstvá vysvetľovali vznik Zeme a planét odlišne, ale zhodovali sa v tom, že celý vesmír vznikol súčasne (prípadne v priebehu niekoľko málo dní), že je konečný a že vznikol viac-menej v takej podobe, v akej ho poznáme dnes, tzn. že neprechádzal nijakým vývojom. Až v 17. storočí uverejnil René Descartes (1596–1650) prvú teóriu vzniku vesmíru, ktorá nepredpokladala zásah nadprirodzenej bytosti. Podľa jeho domnienky bol prapôvodný svet chaosom pohybujúcej sa hmoty, pričom pohyb a trenie častíc vytvárali víry. Vo víroch sa zhromažďovala hmota, z ktorej vzniklo Slnko a iné hviezdy. Koncom 17. storočia však Isaac Newton (1642–1727) objavením gravitačného zákona dokázal, že takýto vznik vesmíru nie je možný. Potom v roku 1745 prišiel francúzsky matematik Georges-Louis Leclerc, Comte de Buffon (1707–1788) s inou, alternatívnou teóriou. Podľa neho mala obrovská kométa preletieť blízko Slnka a vymrštíť obrovský prúd slnečnej látky do priestoru, z ktorej sa sformovali planéty. Nevedel však vysvetliť pôvod Slnka a kométy. Zaujímavosťou je, že táto teória bola znovu vzkriesená v roku 1900 dvoma astronómami, ktorí namiesto veľkej kométy uvažovali hviezdu! Samozrejme, obe teórie sú zlé. Prvý človek, ktorý vyslovil teóriu podobnú dnešnej najviac uznávanej teórii o vzniku slnečnej sústavy bol Immanuel Kant (1724–1804). Veril, že planéty sa rodia v chuchvalcoch prachu a plynu, ktoré krúžia okolo každej mladej hviezdy. Na Kantove úvahy nadviazal neskôr Pierre Simone de Laplace (1749–1827), ktorý dal tejto teórii presnejšiu fyzikálnu aj matematickú podobu. Ich predstava bola, že medzihviezdny oblak postupne kolabuje vlastnou gravitáciou a vlastnou rotáciou sa formuje do disku. V strede disku sa vytvorí hviezda

a z okolitého materiálu sa na koncentrických dráhach vytvoria planéty. Tento model pôvodu našej sústavy je známy ako *nebulárna hypotéza*. V 20. storočí sformovali Richard B. Larson a Frank Shu modernú teóriu, podľa ktorej po vzniku hviezdy z prachoplynového oblaku sa zvyšný materiál sformuje do podoby protoplanetárneho disku, v ktorom sa môžu vytvoriť planéty. V roku 1988 prebehol experiment navrhnutý Jürgenom Blumom, ktorá potvrdil tento model vzniku planét. Astronaut na palube raketoplánu Discovery vstrekol špeciálnou injekciou mikroskopické zrníčka kozmického prachu do vzduchotesnej komory. Táto komora bola naplnená plynom tak, aby to pripomínalo prostredie v protoplanetárnom disku. Jediný rozdiel bol v tom, že toto umelé prostredie bolo neporovnateľne hustejšie, ako predpokladané prostredie protoplanetárneho disku. Už po niekoľkých minútach sa pôvodne mikroskopické zrníčka zhlukli do pozdĺžnych zlepcov. Prvé pozorovania, ktoré potvrdzovali túto teóriu, sa uskutočnili v roku 1994. Vtedy Hubbleov vesmírny ďalekohľad (HST) vyfotografoval niekoľko veľmi mladých hviezd vo Veľkej hmlovine v Orióne, okolo ktorých krúžia husté protoplanetárne disky.

Poloha slnečnej sústavy v Galaxii

Naša planetárna sústava sa nachádza v jednom zo špirálových ramien našej Galaxie a zúčastňuje sa na jej pohybe. Okolo stredu Galaxie obieha rýchlosťou asi 250 km s^{-1} , doba jedného obehu trvá približne 250 miliónov rokov. Slnko je jedna z približne 400 miliárd hviezd našej Galaxie, nazývanej tiež Mliečna cesta alebo Mliečna dráha. Naša galaxia má tvar špirály s vydutým hustejším stredom a plochými redšími ramenami. Slnečná sústava je situovaná v menej hustej oblasti jedného z týchto ramien, ktoré sa nazýva *rameno Orióna* a je vzdialená od stredu Galaxie asi 28 000 svetelných rokov. Spočíva v bubline horúceho ionizovaného plynu vymedzenej chladnejším a hustejším plynom neutrálneho vodíka. Táto oblasť (miestna bublina) je časťou trubice medzihviezdnej hmoty, ktorá sa ťahne cez galaktický disk až do galaktického hala. Slnko sa pohybuje cez materiál unikajúci zo skupiny mladých hviezd s názvom *Asociácia Škorpión* smerom k *Lokálnemu medzihviezdnemu oblaku*. V smere pohybu Slnka sa vytvára rázová vlna, v ktorej sa častice hviezdneho vetra pribzďujú a odkláňajú. Rýchlosť pohybu Slnka vzhľadom na okolité hviezdy je $19,4 \text{ km s}^{-1}$ a bod, do ktorého smeruje (apex) sa v súčasnosti nachádza v súhvezdí Herkules.



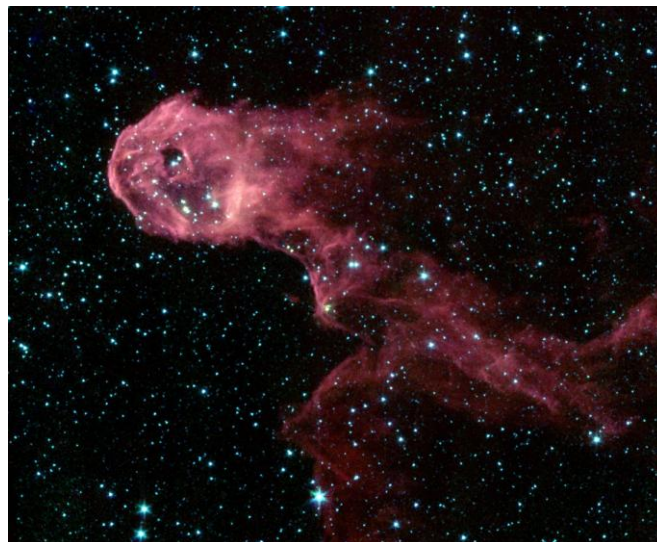
Obrázok 2: Poloha Slnka v Galaxii.

Etapy

Podľa súčasného, najviac uznávaného modelu, Slnko a jeho planéty vznikli z obrovského oblaku medzihviezdnej hmoty pred asi 4,6 až 4,7 miliardami rokov. Stavebným materiálom bol plyn a prach v pôvodnej chladnej materskej globule¹. Oblak sa vlastnou gravitáciou zmršťoval, v jeho strede sa vytvorilo Slnko a okolo neho postupne vznikali planéty a medziplanetárna hmota. Okolo mnohých mladých hviezd sa planéty formujú aj v súčasnosti.

Fáza zárodočnej hmloviny

Obrovské mračno medzihviezdnej hmoty s veľkosťou možno až 100 svetelných rokov, z ktorého vznikla naša planetárna sústava sa nachádzalo v galaktickom disku, v blízkosti roviny našej Galaxie, kde sa aj v súčasnosti nachádza množstvo plynoprachových mračien, z ktorých vznikajú iné hviezdne sústavy. Toto mračno bolo lokalizované na vnútornom okraji ramena Orióna vo vzdialenosti asi 30 tisíc svetelných rokov od jadra Galaxie. Hmota zárodočnej hmloviny bola veľmi riedka, len približne 10^{-20} kg m⁻³. Zhruba pred 7 miliardami rokov sa toto mračno *rozpadlo* na množstvo menších globulí, ktorých hmotnosť bola väčšinou v rozpätí 0,1 – 10 hmotností Slnka. Priemer globuly, z ktorej vznikala naša sústava bol približne 2 svetelné roky a jej hmotu tvorili častice plynu a prachu. Dominantnou zložkou bol vodík (asi 73 %) a malou prímiesou hélia a ďalších ťažších prvkov (uhlík, dusík a kyslík). Prach, teda spomínané ťažšie prvky, tvoril len asi jedno percento z celkového množstva látky. Počiatočná teplota tohto chladného riedkeho mraku bola približne -250 °C, teda len o niečo vyššia ako teplota okolitého medzihviezdneho prostredia. Nízka teplota dovoľovala, aby sa atómy vodíka spájali do párov. Aby sa z mračna začali formovať hviezdy, bol potrebný nejaký impulz zvonka. Napríklad prechod masívnej hviezdy okolo mračna, ktorý gravitačným pôsobením dal do pohybu molekuly vodíka. Alebo výbuch supernovy, ktorý rázovou vlnou mohol efektívnejšie dopomôcť k zrážkam molekúl a ich koncentrovaniu sa.



Obrázok 3: Zviditeľnená tmavá globula IC 1396. Zdroj: Spitzer Space Telescope.

¹ Obrovský zhluk prachoplynového materiálu – *gravitačné centrum* –, ktoré priťahuje k sebe ďalší materiál. Má charakter chladnej a v porovnaní s okolitým priestorom hustej tmavej prachoplynovej hmloviny približne guľatého tvaru.

Fáza formovania

Globula, z ktorej vznikla aj naša sústava sa začala zmršťovať, pravdepodobne už spomenutým impulzom výbuchu blízkej supernovy. Tlak žiarenia a rozpínajúci sa materiál supernovy mohol narušiť stabilitu globule natoľko, aby sa vlastnou gravitáciou začala zmršťovať. Objem postupne zmenšovala, v centrálnej oblasti sa zahusťovala a pomaly rotovala. Voľným pádom sa vnútorná oblasť napĺňala okolitým materiálom. Narastajúcim rotačným pohybom sa uvoľňovala gravitačná energia, ktorá sa premenila čiastočne na žiarenie a čiastočne na teplo, preto teplota globule pomaly vzrastala. No slnečná globula bola stále tmavá. Maximum žiarenia bolo len v infračervenej oblasti spektra. Odstredivá sila zrýchľujúcej sa rotácie spôsobovala, že globula sa postupne formovala do tvaru disku, ktorý nazývame protoplanetárny disk (stretnúť sa možno aj s akronymom *proplyd*). Jeho veľkosť alebo priemer sa v priebehu pár miliónov rokov zmenšil do vzdialenosti o niečo viac ako je dnešná obežná dráha Neptúna. V strede pôvodnej globuly sa sformovalo obrovské *praslňko* (protoslňko). Priemer praslňka bol mnohonásobne väčší ako priemer dnešného Slnka. Ďalšou kontrakciou (zmršťovaním) sa protoslňko ešte viac zahrievalo zhruba na teplotu 10 tisíc stupňov. Molekuly vodíka sa štiepili na samostatné atómy. Teplo, ktoré v ňom vznikalo, sa dostávalo z jadra na povrch tzv. konvekciou. Dnes už konvekciu pozorujeme na Slnku len v takzvanej konvektívnej zóne. Z povrchu praslňka unikali mohutné prúdy horúcej plazmy praslnečného vetra. Ten podstatne ovplyvnil formovanie planét a formovanie slnečnej sústavy vôbec.



Obrázok 4: Príklady protoplanetárnych diskov (*proplydov*). Zdroj: NASA/HST.

Fáza vyparovania a kondenzácie

Teplota zárodočného disku však nebola všade rovnaká. Vo vnútorných častiach, bližšie k prasluku, bola vyššia ako v chladnejších vzdialenejších oblastiach. Pod vplyvom tepla sa ľahšie látky z vnútorných častí rýchlo vyparili a zostali len atómy ťažších prvkov ako kremík, železo, horčík a hliník, z ktorých sa utvorili prachové zrná. Slnčný vietor, ktorý vyžarovalo prasluko sa postaral o *odfúknuť* najľahších prvkov (vodíka a hélia) z vnútorných častí disku. Až do vzdialenosti asi 700 miliónov kilometrov od prasluka zostal len prach tvorený ťažšími prvkami. Z nich sa potom formovali pevné, terestrické planéty. Vo väčších vzdialenostiach od Slnka sa *odfúknuté* látky opäť skondenzovali. Z tohto dôvodu tam už boli vhodné podmienky na to, aby sa na formovaní telies podieľali aj ľahšie prvky. Tak začali vznikať joviálne planéty (Jupiter, Saturn, Urán a Neptún).

Fáza tvorby planetezimál

Častice obiehali okolo protosluka jedným smerom po špirálových dráhach. Postupne sa dostali zhruba do jednej roviny, v ktorej najväčšie telesá slnečnej sústavy obiehajú okolo Slnka. Keďže obiehali podobnou rýchlosťou a po podobných dráhach, jednotlivé častice sa k sebe približovali malou relatívnou rýchlosťou. Pri strete (zrážkach) sa síce časť ich kinetickej energie premenila na teplo, no kolízia nemala vždy za následok úplný rozpad častice, ale skôr vzájomné spájanie. Takto sa pôvodne malé častice spájali do stále väčších a väčších celkov. Spájanie intenzívnejšie prevládalo. Zárodočná hmlovina bola teda dejiskom neustálych zrážok, rozpadov a spájania. Za niekoľko tisíc rokov zárodočné zrná narástli do rozmerov niekoľkých centimetrov. Tieto telesá mali oveľa menšiu hustotu, ako dnešné horniny. Nestability v disku spôsobili, že sa v ňom pod vplyvom gravitácie začali vytvárať prstence. Z častíc sa postupne utvorili miestne zhluky, ktoré naďalej na seba nabaľovali hmotu a zahusťovali sa. Tak vznikli väčšie telesá nepravidelného tvaru – *planetezimály*. Veľkosť planetezimál pravdepodobne siahala až ku kilometrovým rozmerom. Niektoré planetezimály vzniknuté v tomto období sa zachovali dodnes. Ide hlavne o telesá Kuiperovho pásu, ale zrejme aj o mnohé malé mesiace joviálnych planét.



Obrázok 5: Umelecká predstava začiatkov tvorby slnečnej sústavy, kedy sa formovali planetezimály.
Zdroj: W. K. Hartmann.

Fáza tvorby planét

S narastajúcim rozmerom planetezimál prevládala ich vlastná gravitácia. Za rádovo desaťtisíc rokov vzniklo postupným *zliepaním* obrovské množstvo telies s rozmermi 500 až 1000 km. Do tejto fázy formovania sa však dostala len malá časť pôvodnej hmoty. Množstvo materiálu zostalo v podobe väčších či menších planetezimál, medziplanetárneho prachu a plynu. Po ďalšej kumulácii hmoty tieto telesá zvané *protoplanéty* vlastná gravitácia formovala do guľovitého tvaru. Neustále bombardovanie ich povrchov nespotrebovaným materiálom a tiež rozpad rádioaktívnych prvkov v ich vnútrach spôsobili, že protoplanéty boli roztavené. Vďaka tomu v nich mohla prebiehať ich diferenciacia, t. j. proces, počas ktorého ťažšie prvky klesali k jadrú protoplanét a ľahšie stúpali k povrchu, aby tam neskôr vytvorili kôru a prvotnú atmosféru. Bolo dokázané výskumom meteoritov zo skupiny H-chondritov, že protoplanéty sa formovali v horúcom prostredí, kde dominoval rádioaktívny izotop hliníka ^{26}Al , ktorý má polčas rozpadu 717 tisíc rokov. Produkty rozpadu hliníka ^{26}Al možno aj dnes identifikovať v meteoritoch.

Protoplanéty sa utvárali aj na miestach, kde dnes obiehajú obrie plynné planéty Jupiter, Saturn, Urán a Neptún. Dokonca sa predpokladá, že zárodky týchto planét vznikli o niečo skôr ako zárodky terestrických planét a boli spočiatku desať až dvadsaťkrát hmotnejšie ako Zem. Vývoj joviálnych planét sa odlišuje od vývoja terestrických planét v tom, že zárodky joviálnych planét na seba začali gravitačne nabaľovať ľahké prvky, predovšetkým vodík, ktoré vo vnútorných častiach disku viac-menej chýbali. Objem a hmotnosť planét vzdialených od Slnka sa týmto procesom prudko zväčšili. Plyn, ktorý na seba vznikajúce joviálne planéty nestihli nabaľiť, bol postupne odviaty preč zo slnečnej sústavy hviezdny vetrom, ktorý bol mimoriadne silný, pretože protoslnko prešlo do ďalšieho štádia svojho vývoja – *fáza hviezdy typu T Tauri* – nestabilná premenná hviezda hlavnej postupnosti, ktorej žiarivý výkon sa prudko mení.

Fáza intenzívneho bombardovania

Intenzívne bombardovanie novovzniknutých telies slnečnej sústavy medziplanetárnou hmotou (kométy, planetezimály a protoplanéty) vrcholilo asi pred 4 miliardami rokov. Čím boli telesá väčšie, tým ich bolo menej, a nedochádzalo u nich až tak často k zrážkam. Spočiatku bolo bombardovanie také silné, že nedovolilo mladým terestrickým planétam, čiže Merkúru, Venuši, Zemi a Marsu, aby sa na nich utvorila pevná kôra. Neskôr toto bombardovanie začalo po sebe nechávať stopy, z ktorých niektoré sú pozorovateľné dodnes na planétach a ich mesiacoch ako impaktné krátery. Množstvo dopadových kráterov však bolo medzitým zahladené geologickými procesmi. Počas nasledujúcich niekoľkých stoviek miliónov rokov bombardovanie postupne slablo.

Migrácia planét

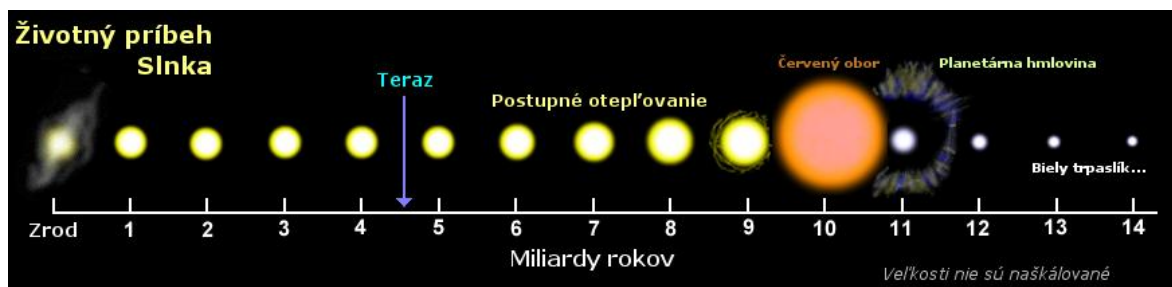
Veľmi dlho panoval názor, že dráhy planét v slnečnej sústave boli nemenné a predpokladalo sa, že planéty vznikli prakticky v tých vzdialenostiach od Slnka, kde ich pozorujeme dnes. Prvé pochybnosti prišli s objavom prvých exoplanét, ktoré nezriedka obiehajú okolo svojich materských hviezd vo vzdialenostiach, v ktorých sa podľa teórie protoplanetárneho disku nemohli vôbec sformovať. Na možnú migráciu planét poukazuje aj to, že v roku 2001 Chambers a Wetherill dokázali, že medzi Marsom a Jupiterom by museli vzniknúť planéty približne veľkosti Marsu. Dnes tam však pozorujeme len pás asteroidov, v ktorom žiadne teleso nepresahuje priemer 1000 kilometrov. Medzi dráhami Marsu a Jupitera je pozorovaný silný deficit hmoty a predpokladá sa, že v čase formovania planét tam muselo byť hmoty

tisícnásobne viac. Počítačové modely navyše ukazovali, že počet sformovaných terestrických planét by mal byť nižší ako pozorovaný a nemal prekročiť tri. Tieto výsledky naznačujú, že v pásme asteroidov sa skutočne sformovali telesá o veľkosti planét, z ktorých sa jedno neskôr presunulo bližšie k Slnku. Touto „asteroidálnou planétou“ mala byť práve Zem. V súčasnosti však nepoznáme spoľahlivý mechanizmus, ktorý by Zem *prestáhoval* na novú dráhu. Podľa jednej teórie na tom mala svoj podiel obrovská zrážka Zeme s telesom o veľkosti Marsu, následkom ktorej sa sformoval náš Mesiac. Nasledujúce tri a pol miliardy rokov až do súčasnosti pravdepodobne už predstavovali pomalý vývoj a stav slnečnej sústavy sa vo veľkom meradle počas tohto obdobia zrejme veľmi nelíšil od súčasnosti.

Budúcnosť

Ďalší vývoj slnečnej sústavy závisí od vývoja jej centrálnej hviezdy Slnka. Slnko je v tejto fáze svojej existencie stabilná hviezda typu G2V na hlavnej postupnosti, ktorej žiarivý výkon sa mení len nepatrne. Stabilné však bude len dovtedy, kým budú v jeho jadre môcť prebiehať termojadrové reakcie, čiže kým sa neminú jeho zásoby vodíka, ktoré zostávajú ešte na niekoľko miliárd rokov. Keď sa všetok vodík v jadre premení na hélium, termojadrové reakcie na chvíľu prestanú a tlak žiarenia prestane pôsobiť proti tlaku jeho vlastnej gravitácie. Jadro sa zmrští, jeho teplota a tlak sa zvýši a dôjde k syntéze hélia na ďalšie chemické prvky, napr. uhlík a kyslík. To Slnku zabezpečí stabilitu na ďalších pár miliónov až miliárd rokov. Vonkajšie vrstvy sa však začnú rozpínať, rednúť a chladnúť. Slnko prejde do štádia červeného obra. Jeho rozpínajúci sa povrch pohltí Merkúr, Venušu a možno aj Zem.

Zásoby hélia v jadre sú však taktiež vyčerpatel'né. Po ich minutí opäť dôjde k zastaveniu jadrových reakcií a tentoraz už nebude mať čo zabrániť jadru Slnka v gravitačnom kolapse. Jadro skolabuje, scvrkne sa a zmení sa na bieleho trpaslíka – malú hustú horúcu hviezdu s veľkosťou Zeme. Vonkajšie vrstvy Slnka sa oddelia a vytvoria pomaly sa zväčšujúcu planetárnu hmlovinu. Planetárna hmlovina sa bude rozpínať a postupne pohltí tie planéty slnečnej sústavy, ktoré nezničilo Slnko. Biely trpaslík napokon vychladne. Hmlovina sa rozptýli a môže slúžiť ako časť materiálu pre vznik novej hviezdy a planetárnej sústavy.



Obrázok 6: Životný cyklus Slnka.