

Slide 1

Na začátku byla touha lidí porozumět naší vlastní planetě. Zemi zkoumala a stále zkoumá řada různých vědních oborů - geofyzika, geologie, astronomie, chemie či meteorologie. A stejně tak jako se teoretičtí fyzikové snažili o vytvoření sjednocující teorie, kterou by bylo možné popsat všechny základní pozorované jevy, tak i v případě Země se vědci pokoušeli o vytvoření jednotné představy, jak naše planeta funguje. Ale až 20. století přineslo, stejně jako v mnoha dalších oborech, přelom a změnu. Nejen v použitých metodách, ale zejména v tom, že jsme začali zkoumat i jiné planety naší sluneční soustavy. Dnes už máme základní představu o tom, jak tyto objekty vznikají a vyvíjejí se, ale ještě mnoho nám stále zbývá poznat.

Slide 2

Určujícím momentem celého našeho planetárního systému bylo, jak a kdy vznikl. Astronomové dnes pozorují množství formujících se hvězd podobných Slunci a shodují se, že běžným vedlejším produktem vzniku takových objektů je prachoplynný disk v jejich okolí. Doba trvání těchto objektů je zhruba 10^6 - 10^7 let a během ní se mračno smršťuje do rotujícího disku, rozděleného na několik zón.

Díky tomu, že naše Slunce patří už do třetí generace hvězd, byl v původní pramlhovině relativní dostatek těžších prvků (O, N, Si, Fe, U, apod.) vytvořených předchozími generacemi. Tyto prvky se shlukly v okolí protoslunce a po ochlazení zkonduzovaly. Naopak ve vzdálenějších oblastech se vytvořila kondenzační jádra hlavně z ledů (H₂O, CO, CH₄) a ta největší z nich pak na sebe začala vázat zbývající plyn z pramlhoviny (H, He). Tyto dvě oblasti daly vzniknout dvěma dominantním typům planet - pevným neboli terestrickým (Merkur, Venuše, Země, Mars) a plynným (Jupiter, Saturn, Uran, Neptun).

Nadále se budeme zabývat jen pevnými objekty sluneční soustavy, neboť ty mají - na rozdíl od plynných obrů - mnohé vlastnosti podobné Zemi. Ať už jde o samotné planety velké měsíce Jupiteru či Saturnu nebo planetky z celé sluneční soustavy a jejich okrajových částí, pro všechny platí vždy stejné principy.

Slide 3

po ochlazení mlhoviny došlo ke kondenzaci pevných částíček a začaly vznikat zárodky planet a planetek. V okolí Slunce (asi do 5 AU; 1 AU = vzdálenost Země-Slunce) tato jádra postupně narážela do sebe a vytvářela množství tzv. planete -simál, aby nakonec zůstal jen malý počet velkých kamenných objektů.

Ve větších vzdálenostech od Slunce (5-30 AU) díky gravitaci plynných obrů velké kamenné planety nevznikly, ale ze směsi kamene a ledu byly vytvořeny ledové světy, které dnes můžeme pozorovat jako satelity Jupiteru, Saturnu, Uranu i Neptunu a které také vyplňují Kuiperův pás (asi 30-50 AU, ale některé i dále). Na samém okraji sluneční soustavy pak už zřejmě ani gravitace nebyla dostatečně silná a proto celý náš systém (odhadem až do vzdálenosti 200 000 AU) obklopuje systém nevelkých ledových kometamich jader - tzv. Oortův oblak. Přesto, že tyto ledové světy nepatří mezi terestrické objekty, i ony se řídí podobnými pravidly a tak je výhodné je zkoumat z důvodu větší variability. Základním principem fungování planet je uvolňování vnitřní energie. Po zformování planety, kdy se část povrchu může roztavit díky impaktům, proběhne diferenceiace - těžší materiál klesá ke středu a

lehčí stoupá k povrchu, přičemž se uvolňuje energie. Nad jádrem se většinou zformuje lehčí silikátový plášť s tenkou tuhou vrstvou na povrchu - kúrou. Pokud je těleso dostatečně velké, jako například Země, mohlo se takto vzniklé (převážně železné) jádro roztavit a v tomto stavu setrvat i miliardy let. V případě velkého slapového působení jiného objektu (např. u měsíce lo působení Jupiteru) může takový zdroj nahradit chybějící vnitřní zdroje tepla a tím také udržovat těleso „při životě“.

Dalším zdrojem tepla v pevných planetách je rozpad radioaktivních prvků - ty s kratším poločasem rozpadu zvýšily počáteční energii planet a ty s delším poločasem (U, Th, K) dodávají teplo dodnes. V případě Země je většina těchto prvků soustředěna v kontinentální kůře a zvyšují tak přímo teplotu na povrchu.

Jako všude ve vesmíru, i u těchto těles následně dochází k chladnutí, kdy se vyrovnává teplota uvnitř planety s teplotou na povrchu. Povrchová teplota závisí zejména na insolaci (přísunu energie od Slunce, klesá se vzdáleností) a také na atmosféře, která je schopna teplo zadržovat. Kdyby naše Země neměla tuto plynnou ochrannou vrstvu, průměrná teplota by klesla pod bod mrazu.

Samotné chladnutí může probíhat dvěma odlišnými způsoby: buď postupným vedením tepla nebo po překročení jistých kritických mezí tzv. konvekci, kdy se teplo přenáší spolu s materiálem. Tyto pomalé vzestupné a sestupné „proudy“ můžeme u Země pozorovat jak v pevném plášti (souvisí s topografií a gravitačním polem na povrchu), tak v tekutém jádře (generují magnetické pole). Zatímco v jádře takový mechanismus může probíhat jen při velkém teplotním rozdílu oproti plášti, popř. pokud v něm začne kondenzovat vnitřní pevné jádro, v silikátovém plášti k těmto pohybům dochází díky velkému tlakovému a teplotnímu namáhání materiálu. Tyto procesy zřejmě probíhají u všech pevných objektů, které dosáhly určitých startovacích podmínek nebo v nich alespoň po nějakou dobu probíhaly. Jejich projevy můžeme pozorovat jak na Zemi, tak na jiných planetách a zřejmě patří k základním principům fungování planet.

Přímo pozorovat je ale možné jen povrchy planet, ty zato jeví obrovskou různorodost. V případě Země je jistě nejpozoruhodnějším složitý systém deskové tektoniky (s kontinentálně/oceánickou dichotomií), který je zřejmě neúčinnějším systémem, jak planetu ochlazovat. Tento systém, kdy se některé tektonické desky zasouvají pod jiné, zřejmě souvisí s výskytem kapalné vody - na jiných planetách voda v kapalném stavu není a také se tam neobjevuje desková tektonika. Jiné tektonické procesy - vulkanismus, tvorba zlomů a kaňonů, vrásnění - na jiných tělesech pozorovány jsou, naopak impaktní krátery po kolizích s prolétajícími asteroidy na Zemi díky husté atmosféře a erozi téměř chybí.

Merkur

Jako jediná planeta sluneční soustavy nebyl ještě Merkur systematicky zkoumán meziplanetárními sondami - jediné pozorování nám zprostředkovala prolétající americká sonda Mariner. Proto zatím nemáme žádná měření gravitačního pole a pouze částečná pozorování povrchu. Na těchto snímcích můžeme spatřit velké množství kráterů podobných těm měsíčním, ale žádná lávová moře. Detailnější zkoumání ukáže zajímavé objekty: obrovskou impaktní pánev Caloris s průměrem 1300 km či mnohé lineární struktury, které vznikly zřejmě při rychlém chladnutí planety. Během tohoto procesu byla planetární kůra velmi namáhána a na mnoha místech opakovanými zdvihy a poklesy „popraskala“.

Další zajímavostí je sklon rotační osy k rovině oběhu - svírá totiž s ekliptikou prakticky 90°. Díky tomu jsou krátery v polárních oblastech takřka v absolutním stínu a teplota,

kteřá na osvětené straně dosahuje až 450 °C, klesá v těchto místech pod -150 °C. V tomto prostředí se mohou kumulovat úlomky ledu z dopadajících meteoritů a prolétajících komet - radarová pozorování ze Země dávají odhady mocnosti ledu až 50 m!

Jako jedna z mála planet má Merkur vlastní magnetosféru generovanou vnitřními procesy. Ta je sice mnohem slabší než pozemská, ale i tak je schopná chránit povrch planety před mohutnou radiací ze Slunce. Tento mechanismus bývá spojován s konvektujícím kapalným jádrem - v případě Merkuru železné jádro zabírá až 75 % planety, což je neobvykle velká část. Zřejmě v rané fázi vývoje planety došlo ke srážce s planetesimálou (podobně jako u Země), při které planeta přišla o většinu lehčího pláště. Díky tomu má Merkur druhou největší hustotu hned po Zemi.

Venuše

Druhá planeta sluneční soustavy je co do velikosti i vzdálenosti od Slunce podobná Zemi. Díky těmto vlastnostem mohla mít podobné počáteční podmínky a čekali bychom, že i dnes půjde o jakési dvojče naší planety. Skutečnost je však zcela jiná - neexistuje zde desková tektonika, povrch je zahalen do velmi husté atmosféry (100x vyšší tlak než na Zemi, převažuje CO₂, obsahuje ale i SO₂) a z pozorování hustoty kráterů se dá vysledovat, že zhruba před 750 miliony let byl celý povrch Venuše přetvořen buď zvýšenou vulkanickou aktivitou nebo katastrofickým zanořením existující kůry do pláště.

Jistá podobnost se Zemí se ale dá nalézt ve vnitřní stavbě planety. Z dosavadních průzkumu a modelů plyne relativně tenká kůra obklopující silikátový plášť - ten sahá zhruba do 3000 km, kde začíná tekuté kovové jádro. Na rozdíl od Země však asi ve Venuši neexistuje vnitřní pevné jádérko, které je možným hnacím motorem konvekce v jádře a proto tato planeta nemá vlastní magnetosféru podobnou zemskému magnetickému poli. Je ale dobře možné, že se právě nyní nachází ve stavu poklesu vnitřní teploty na bod tuhnutí, což by mohlo v geologicky krátké době uvést proces tvorby magnetického pole opět do chodu.

Velmi zajímavá je také atmosféra. Ta tvoří 0,1 % hmotnosti celé planety a svým působením na povrch v minulosti dokázala zbrzdil rotaci planety a otočit ji, takže dnes Venuše pomalu rotuje na opačnou stranu než všechny ostatní planety sluneční soustavy. Díky pozorování atmosféry také víme, že i na Venuši byla dříve voda, neboť pozorujeme mnohem větší obsah těžkého vodíku, než je měřeno na Zemi - předpokládáme, že po zesílení skleníkového efektu se veškerá voda (možná až 1 % pozemské hydrosféry) odpařila do atmosféry a bez ochrany magnetickým polem lehký vodík unikl do vesmíru.

Měsíc

Dnes zřejmě nejlépe prozkoumaným objektem sluneční soustavy je náš přirozený satelit. Jeho „blížkost“ - pouhých 380 000 km - ho předurčila jako ideální cíl kosmických letů, a tak k němu během 60. let mířila celá armáda sond završená pilotovanými lety Apolla. Ty všechny nám zodpověděly velké množství otázek, ale možná ještě větší množství jich před nás postavily. V současnosti nicméně zažíváme renesanci výzkumu Měsíce, takže se brzy můžeme dočkat dalších významných objevů. Příkladem takové záhady čekající na objasnění je magnetizace některých oblastí na povrchu Měsíce - dodnes nevíme, zda jde o stopy z dob, kdy existovalo dočasné magnetické pole (podobně jako magnetizace mořského dna na Zemi) či pouze o magnetizaci vzniklou při dopadu meteoritů či komet.

Zajímavý fakt je také výskyt měsíčních moří téměř výhradně na přivrácené straně - tyto lávou zalité pánve, které vznikly po dopadu obrovských meteoritů, se na odvrácené straně skoro nevyskytují.

O měsíčním nitru máme data ze zaznamenaných lunotřesení, která vznikají i v hloubkách kolem 1000 km (u Země maximálně do hloubky 660 km). Z těchto dat vyplývá existence malého kovového jádra o velikosti zhruba 250-400 km obklopeného lehkým pláštěm - celková hustota Měsíce je mnohem menší než hustota Země.

Mars

Zřejmě nejvíce studovanou cizí planetou je dnes Mars. Čtvrtá planeta sluneční soustavy je totiž - přes svou zhruba poloviční velikost ve srovnání se Zemí - asi nejpodobnější naší planetě a nabízí také asi nejpříhodnější podmínky ke vzniku života hned po Zemi (a oceánech na Jupiterových měsících). V minulosti měl Mars pravděpodobně i rozsáhlou hydrosféru, ve které se mohly případně živé organismy vyvíjet - v té době mohl povrch dokonce vykazovat funkční deskovou tektoniku. Tato éra skončila zhruba před 3,8 miliardami let a po určitém přechodném období přešel Mars do dnešní podoby, kdy nejeví žádnou tektonickou aktivitu a voda z jeho povrchu téměř zmizela. Výjimku tvoří polární čepičky, kde se během místní zimy ukládá vedle CO₂ i vodní led, a podpovrchová směs ledu s horninou tzv. permafrost. Podle posledních měření sondy Mars Odyssey se tento materiál vyskytuje na více než polovině povrchu Marsu.

Velmi zajímavá je také na konci 90. let zaznamenaná trvalá magnetizace hornin na povrchu planety. Tu známe ze Země, kdy si vyvěřelé magma uchovává v sobě vtištěné globální magnetické pole. Z těchto pozorování se dá usoudit, že i Mars měl kdysi vnitřně generovanou mag-netosféru a tak otázkou zůstává, proč ji dnes již nepozorujeme. Odpověď souvisí s chladnutím planety - buď se Mars v minulosti ochladil tak, že se dynamo-proces v jádře zastavil, popřípadě rostoucí vnitřní jadérko omezilo kapalnou část jádra natolik, že již magnetické pole nemohlo vznikat nebo po zániku deskové tektoniky došlo k prohrátí celé planety a tepelná konvekce v jádře se tak zpomalila.

Planetky

Objekty v pásu asteroidů mezi Marsem a Jupiterem se až na **Ceres** a několik dalších větších těles (**Pallas, Vesta,...**) nedají zařadit mezi terestrické, neboť zřejmě nepřekročily mez potřebnou k zahájení diferenciace.

Přesto, že některé z nich vykazují vlastní magnetické pole, nemají zřejmě jádro a jde tak jen o trvalou magnetizaci povrchových hornin.

Jupiterovy měsíce

Nejzajímavějším galileovským satelitem je po stránce vnitřní aktivity zcela jistě **Io**. Díky slapovým silám gravitačního působení Jupiteru je nitro tohoto měsíce neustále deformováno a zahříváno, a tak tento relativně malý svět může vykazovat dokonce větší vulkanickou aktivitu než naše Země. Magmatické výlevy mají teploty až kolem 1500 °C, což je více než potřebná teplota tání, z čehož se dá dokonce usuzovat na částečně roztavený plášť. Přestože má Io kovové jádro o poloměru 40-50 % poloměru celého měsíce (pravděpodobně v tekutém stavu), díky neustálému zahřívání křemičitanového pláště ale chladne velmi pomalu, a tak v jádře nedochází ke konvekci, a tedy ani ke generování magnetického pole.

Satelit **Europa** jeví magnetické pole bez dipólového momentu podobně jako např. pozemské oceány - toto pozorování se dá vysvětlit jako indukovaná magnetosféra vznikající v oceánu skrytém zhruba pod 150 km silnou ledovou kůrou. Podobnou stavbu podpovrchových partií má také **Ganymed** ale přes fakt, že jde o největší satelit ve sluneční soustavě, má vůbec

nejmenší měřený moment hybnosti - ten nám říká, jakým způsobem je v něm rozvrstven materiál. U Ganymedu tedy předpokládáme velkou koncentraci železa kolem středu – jako jediný satelit opravdu jeví magnetické pole zřejmě generované konvekci v kovovém jádře.

Poslední z velkých satelitů je **Callisto**, který pravděpodobně také obsahuje pod ledovou krustou oceán o mocnosti 100-200 km, ale zbytek jeho nitra tvoří zřejmě jen nediferenciovaná směs horniny a metalických materiálů, a tudíž zde neexistuje kovové jádro.