



Sluneční soustava 2003

 Sluneční soustava 2003 je krátký dokumentární film pojednávající o našem planetárním systému: o Slunci, o planetách i o menších tělesech. Je určen pro žáky základních a středních škol i pro širokou veřejnost. Existuje v české a anglické jazykové verzi, jeho délka je 25 minut. Domovská WWW stránka je <http://www.astrohk.cz/ss2003/>.

 The Solar System 2003 is a short documentary movie about our planetary system: about the Sun, planets and smaller bodies also. It is intended for pupils of grammar and high schools, even for general public. There exist Czech and English language versions, its length is 25 minutes. The homepage is <http://www.astrohk.cz/ss2003/>.



Obsah

strana

<i>Sluneční soustava 2003 — český scénář</i>	2
<i>Slovníček vybraných termínů</i>	8
<i>Tabulkové údaje o tělesech sluneční soustavy</i>	9
<i>The Solar System 2003 — English scenario</i>	11

Sluneční soustava 2003

Sluneční soustava — malá část Vesmíru, širý, téměř prázdný prostor. Pro člověka nepřátelské prostředí — bez ovzduší, bez pevné půdy pod nohama.¹

Slunce, planety a jejich měsíce, planetky a komety jsou jakési ostrůvky, v nichž je hmota soustředěna. Do sluneční soustavy počítáme však i menší tělíska — meteoroidy, meziplanetární prach a plyn nebo částice záření — fotony.

Mezi všemi působí vzájemná přitažlivost, gravitační síla, která určuje jejich pohyby. Zdaleka největší hmotnost má Slunce, a proto ostatní tělesa obíhají okolo něj. Čím je těleso blíže k Slunci, tím obíhá větší rychlostí.²

Nejvzdálenější planetou je Neptun, pak následují Uran, Saturn, Jupiter, Mars, Země, Venuše a Merkur. Střední vzdálenost mezi Sluncem a Zemí, kterou nazýváme *astronomická jednotka*, je 150 milionů kilometrů; světlo ji urazí za 8 minut 20 sekund. Průměr zeměkoule je pouhých 13 000 km.

Planety a měsíce nesvítlí vlastním viditelným světlem, jen odrážejí část slunečního světla. Slunce je naproti tomu hvězda a jako taková září celým povrchem do všech směrů.

Někdy můžeme na čisté tmavé noční obloze spatřit záření odražené od nejmenších částíček meziplanetárního **prachu** — tento jev nazýváme *zodiakální světlo*.

Meteoroidy, tedy kamenné úlomky od zlomků milimetru až po několik metrů v průměru, mohou být dobře pozorovatelné v okamžiku, kdy vletí do ovzduší naší planety. Při vzájemné rychlosti okolo 50 km/s se začnou zahřívat třením o vzduch ve výškách 150 km nad zemským povrchem. Zahřátý, svítící sloupec ionizovaného vzduchu, který pak vidíme na obloze, nazýváme *meteor*, lidově „padající hvězda“.

Několikrát do roka, například okolo 12. srpna nebo 18. listopadu, Země prochází proudy kometárních meteoroidů, což se na obloze projeví jako *meteorický roj*.

Větší a pevnější meteoroidy mohou průlet atmosférou „přežít“ a dopadnout na zem jako *meteority*.³

Větší tělesa jsou **planetky**, někdy nazývané asteroidy. Typicky mají nepravidelný tvar a tvoří je kamenný materiál. V hlavním pásu mezi Marsem a Jupiterem obíhá asi jeden milion planetek větších než 1 km.

¹ Zorný úhel obrazu ve filmu je většinou roven 70°; vlevo dole se zobrazuje údaj o plynutí času (pro názornost je často nutné děje ve filmu zrychlit).

² Tři Keplerovy zákony pohybu planet byly formulovány v letech 1609 a 1619, Newtonův gravitační zákon v roce 1687. Dráhy komet mají obvykle větší výstřednosti a sklony než dráhy planetek nebo planet.

³ Největší zachovaný meteorit je železný meteorit Hoba, nalezený v jihozápadní Africe. Má rozměry 2,95 m × 2,84 m × 1,2 m a hmotnost 66 tun. Na hvězdárně v Hradci Králové je vystaven eukritický achondrit Stonařov (1808), jenž pravděpodobně pochází z planetky (4) Vesta.

Malé **měsíce planet**, např. Fobos nebo Amalthea, jsou planetkám velmi podobné.

Velké měsíce jsou srovnatelné s malými planetami: Jupiterův měsíc Ganymedes je dokonce větší než Merkur. Tělesa s průměrem nad 1 000 km již mají pravidelnější, kulový nebo elipsoidální tvar.

Čtyři planety nejbližší Slunci — Merkur, Venuše, Země a Mars — se nazývají **planety zemského typu**. Jsou si poměrně podobné: z velké části je tvoří kamenný materiál, mají pevný povrch a s výjimkou Merkuru je obaluje tenká vrstva plynů — atmosféra. Nejběžnějšími chemickými prvky v zemském tělese jsou železo, kyslík, křemík a hořčík.

Vzdálenější planety, Uran a Neptun, patří do skupiny, jejichž podstatnou složkou jsou ledy vody, metanu a amoniaku anebo směs vodíku, hélia a kamene. Nazýváme je vnější planety nebo **ledoví obři**.

Jupiter a Saturn jsou **plynnými obry**. Nazýváme je také planetami jupiterova typu. Jejich relativně malé jádro je pravděpodobně složeno z kamene a ledu, rozsáhlý obal je z kovového a molekulárního vodíku a hélia.

Všechny velké planety mají prstence (i když jen u Saturnu jsou snadno pozorovatelné)⁴ a početné rodiny pravidelných i nepravidelných měsíců.⁵

Slunce. Rozžhavená plynná koule, s povrchovou teplotou asi 6 000 °C. Skrývá v sobě přírodní termonukleární reaktor, v němž se přeměňují jádra atomů vodíku na jádra atomů hélia a přitom se uvolňují fotony a neutrina. Tento zdroj energie funguje již 4 a půl miliardy roků.

Výrazným projevem změn na Slunci jsou *sluneční skvrny a erupce*. Obojí je způsobeno silným *magnetickým polem*, jež ovlivňuje pohyb sluneční látky — elektricky vodivých ionizovaných plynů, čili *plazmatu*.⁶

Nejrozsáhlejšími objekty sluneční soustavy mohou být **kometry**. Jejich ledovo-kamenné jádro je sice nepatrné (mívá průměr několik kilometrů), ale když se přiblíží k Slunci, začne led sublimovat a unikající plyny i strhávaný prach vytvoří komu a ohon. Jejich řídká vodíková obálka může dosáhnout rozměru až 100 milionů kilometrů.

⁴ Prstence Jupiteru a Saturnu se sebe podstatně liší. Saturnovy prstence pravděpodobně vznikly slapovým rozpadem nějakého měsíce nebo kolizí dvou měsíců, přičemž se uvolnily ledovo-kamenné úlomky s typickými rozměry mezi 1 mm a 10 m. Jupiterovy prstence jsou naproti tomu tvořeny mikroskopickými prachovými částicemi, jež vznikají průběžně při dopadech meteoroidů na měsíce Adrastea, Metis, Amalthea a Thebe.

⁵ Pravidelné (regulární) měsíce obíhají po prográdních drahách s malou výstředností a sklonem. Nepravidelné (iregulární) mají naopak dráhy prográdní i retrográdní, s velkou výstředností a sklonem, a také větší velkou poloosou. Regulární měsíce pravděpodobně vznikly v zárodečné mlhovině, z níž se formovala planeta, kdežto iregulární vznikly daleko od planety a byly zachyceny později.

⁶ Aktivita Slunce vykazuje přibližně jedenáctiletou periodu, což se projevuje například kolísáním počtu slunečních skvrn. Děj souvisí s cyklickou změnou polarit magnetického pole Slunce, jež se odehraje jednou za asi 22 let.

Kometární ohony vždy směřují přibližně od Slunce. Molekuly plynů a prachová zrnka totiž interagují se zářením a *slunečním větrem*, proudem nabitých částic, které se šíří ze Slunce do meziplanetárního prostoru rychlostí až 500 km/s.⁷

Merkur, první planeta, dostává od Slunce nejvíce zářivé energie. Na osvětlené polokouli je teplota přes 300 °C, ale odvrácená polokoule rychle vychládá na -200 °C. Povrch je pokrytý *impaktními krátery*, které vznikají při srážkách s planetkami nebo kometami. Velkou část povrchu zatím nepozorovala žádná kosmická sonda.⁸

Venuše je stále zahalena hustou atmosférou (tlak při povrchu je 90 krát vyšší než na Zemi). Přestože obíhá okolo Slunce dvakrát dál než Merkur a navíc odráží dvě třetiny slunečního záření, je na celém povrchu neuvěřitelná teplota 460 °C. Příčinou je silný *skleníkový efekt* — oxid uhličitý v ovzduší propouští viditelné sluneční záření k povrchu, ale pohlcuje infračervené záření z povrchu vyzářované a tím brání jeho ochlazování.

Pod neprůhlednou atmosférou umožnily nahlédnout radary — zjistily povrch charakteristický *zlomy a sopkami*. Z počtu impaktních kráterů lze odvodit, že sopečná činnost přetvořila většinu povrchu Venuše před 700 až 500 miliony roků.⁹

Třetí planeta od Slunce je **Země**. Má příhodnou velikost a vzdálenost od Slunce, aby se na jejím povrchu mohly vyskytovat nejen led nebo vodní pára, ale i *kapalná voda* — jeden z předpokladů pro vznik života. Prvotní ovzduší bylo zcela přeměněno činností živých organismů a dnes obsahuje především dusík a kyslík.

Od všech ostatních planet se liší také *deskovou tektonikou* — zemskou kůrou rozpraskanou na jednotlivé desky, které se mohou pohybovat po vnějším plášti. Oceánská dna neustále vznikají sopečnou činností v oceánských hřbetech a zanikají při zasouvání pod jiné desky. Při kolizích desek se vrásní nová pásemná pohoří. To může mít velký význam pro život na souši, protože jinak by eroze mohla všechna pohoří postupně zahladit a celý povrch Země by pokrýval oceán.¹⁰

Zemi provází **Měsíc**. I ten má svůj význam pro pozemský život: spolu se Sluncem působí slapovými silami střídání přílivu a odlivu. Z dlouhodobého hlediska Měsíc stabilizuje rotační osu Země a brání tak náhlým extrémním výkyvům klimatu.

⁷ Sluneční vítr výrazně ovlivňuje i *magnetosféry planet*. Při erupci na Slunci dochází k přeměně energie magnetického pole na kinetickou energii nabitých částic, jež pak mohou být uvolněny do meziplanetárního prostoru a případně zachyceny magnetickým polem planety. Při průletu iontů atmosférou planety (tam, kde se magnetické siločáry zanořují pod povrch) dochází k excitaci atomů atmosféry a při jejich deexcitaci k vyzáření fotonu. Tomuto světelnému jevu říkáme *polární záře*.

⁸ Merkur je ve spin-orbitální rezonanci 3:2, tzn. že se třikrát otočí okolo vlastní osy, zatímco dvakrát oběhne okolo Slunce.

⁹ Venuše se otáčí velmi pomalu (jednou za 243 dní) a retrográdně, tj. opačným směrem než obíhá okolo Slunce. Její atmosféra se však otáčí podstatně rychleji — jednou za čtyři dny.

¹⁰ Kolize desek jsou také doprovázeny sopečnou činností a zemětřeseními.

Ze Země můžeme pozorovat pouze jednu polokouli Měsíce, protože Měsíc se otáčí okolo své osy se stejnou periodou, jako obíhá kolem Země. Tento jev nazýváme *vázaná rotace*.¹¹

Měsíc se formoval přibližně před 4,45 miliardami let, když se s Protozemí srazilo těleso asi o velikosti Marsu. Při kolizi vzniklo obrovské množství úlomků, z nichž většina dopadla zpět na Zem, část ale vytvořila okolo Země disk, který se během velmi krátké doby, snad několika týdnů, pospojoval do jednoho satelitu — našeho Měsíce.¹²

V blízkosti Země se mohou objevit i malá tělesa — planetky. V průměru jednou za tisíc roků dochází ke srážce Země s planetkou větší než 100 m. Jednou za několik desítek milionů roků může kolize s 10 km planetkou spolupůsobit při velkých vyhnutích živočišných a rostlinných druhů. Nejznámějším příkladem je vyhnutí dinosaurů před 65 miliony roků.

Mars. Planeta charakteristická červenou barvou, kterou způsobují oxidy železa.

Výšková mapa a rozložení kráterů na povrchu naznačují, že asi před 3 miliardami let mohla být celá severní polokoule Marsu pokrytá oceánem.

Památkou na činnost tekoucí vody jsou erozní tvary v četných údolích. Největší ze všech je Vallis Marineris, 4 000 km dlouhé, 7 km hluboké.

Údolí odvádělo vodu z vyvýšené oblasti Tharsis. Tharsis je sopečného původu a najdeme na ní největší sopky sluneční soustavy — například Olympus Mons, s výškou 27 km a základnou o průměru 600 km.

Poslední dvě miliardy roků je Mars z geologického hlediska spíše klidnou planetou. Slabý vítr v řídké atmosféře si „pohrává“ s drobnými zrny písku, sezónní změny vedou k pravidelnému zvětšování polárních čepiček v zimě a zmenšování v létě.

Na dráze mezi Marsem a Jupiterem můžeme nalézt například planetku číslo (243) **Ida**. Tato padesátikilometrová planetka patří do rodiny Koronis, což lze poznat podle podobných drah a podobných barev jejich členů. Kdysi tvořily tyto planetky jediné těleso, které se však zcela roztránilo při nějakém velkém impaktu. Přitom asi vznikl i současný měsíček **Idy** — kilometrový **Dactyl**.¹³

Jupiter; má větší hmotnost než všechny ostatní planety i menší tělesa sluneční soustavy dohromady. Vyzáhuje asi dvakrát tolik energie, než přijímá od

¹¹ Vázaně rotují i jiná tělesa: např. Phobos a Deimos obíhající kolem Marsu, galileovské měsíce Jupitera, Pluto i Charon.

¹² Měsíc vznikl blízko Země (do vzdálenosti několik R_{\oplus}), ale postupně se od ní působením slapů vzdálil až na současných $60 R_{\oplus}$. Se slapy je spojeno i zpomalování rotace Země, v současnosti asi o 2 ms za století.

¹³ Planetky nejsou v hlavním pásu rozmístěny rovnoměrně, ale v rozdělení četností velkých polos jejich drah jsou patrné mezery, zvané též Kirkwoodovy (např. okolo 2,5 AU; 2,82 AU). Vznikají gravitačními rezonancemi: excentricita dráhy planetky v rezonanci je některou planetou zvýšena tak, že začne křížit dráhy planet, a při těsných přiblíženích se změní velká poloosa planetky, nebo přímo spadne do Slunce.

Slunce. Zdrojem je zřejmě nepatrné zmenšování planety a přeměna rotační energie na teplo. V atmosféře Jupitera je již několik století pozorována obrovská bouře, nazývaná *Velká rudá skvrna*.

Z desítek Jupiterových měsíců jsou asi nejpozoruhodnější *Io* a *Europa*. Slapy Jupitera jsou na *Io* natolik silné, že deformují celý měsíc a zahřívají jeho nitro na teplotu několik tisíc stupňů Celsia. Na povrchu se to projevuje neustálou vulkanickou činností. Sopky chrlí síru do výšek několika set kilometrů a neuvěřitelnou rychlostí povrch mění.

Europa je naopak velmi hladký měsíc, pokrytý vodním ledem. Struktura prasklin a magnetometrická měření však svědčí o existenci podpovrchového kapalného oceánu.

Saturn. Proslul krásou svých jasných *prstenců*. Přestože mají poloměr přes 100 000 km, jsou tlusté nejvýš několik stovek metrů. Zdály vypadají jako řada tisíců různých jasných a různě průhledných prstýnků, ale ve skutečnosti se skládají z jednotlivých ledovo–kamenných úlomků s typickým rozměrem 10 cm. „Mezery“ a jiné struktury v prstencích jsou způsobeny gravitačními poruchami malých měsíců obíhajících přímo v prstencích nebo vně. Za nejnápadnější Cassiniho dělení může měsíc *Mimas*.¹⁴

Uran; již téměř není vidět na obloze pouhým okem. Byl objeven náhodou dalekohledem, a to Williamem Herschelem v roce 1781. Zajímavostí je jeho rotační osa, která leží takřka v rovině oběžné dráhy a Uran tak ke Slunci natáčí střídavě severní a jižní pól.

Objev **Neptunu** byl jedním z největších triumfů nebeské mechaniky 19. století: z pozorovaných poruch dráhy Uranu se podařilo Adamsovi a Le Verrierovi vypočítat polohu neznámé planety, kterou posléze Galle na obloze skutečně našel. Stejně jako u ostatních velkých planet pozorujeme v horních vrstvách atmosféry vítr o rychlosti několik set metrů za sekundu. Podobně jako na Jupiteru a Saturnu (nikoli na Uranu) se na Neptunu objevují skvrny a bouře, jež jsou asi projevem vnitřního zdroje tepla.¹⁵

Pluto a Charon zatím nenavštívila žádná kosmická sonda. I nejlepší pozemské dalekohledy na nich rozliší jen několik světlých a tmavých oblastí.

Za Neptunem se však podařilo objevit stovky jiných těles obíhajících po podobné dráze jako Pluto nebo ještě dál. Celou populaci nazýváme **Kuiperův**

¹⁴ Nejzajímavějšími měsíci Saturnu jsou asi Titan, Hyperion a Iapetus. Titan je obalen hustou atmosférou z dusíku, metanu a dalších organických molekul; na jeho povrchu je možná oceán tekutého ethanu. Hyperion se vyznačuje excitovanou chaotickou rotací. Iapetus má jednu polokouli mnohem tmavší než druhou, neboť na ni dopadá prach vznikající při impaktech na největší nepravidelný měsíc Phoebe.

¹⁵ Triton se pohybuje po retrográdní dráze a díky slapům Neptunu se k němu, narodil od našeho Měsíce, přibližuje. Za 4 až 6 miliard let bude tak blízko, že se slapovými silami roztrhá a okolo planety vznikne prstenec daleko mohutnější než současný Saturnův.

pás. Jedná se o tělesa ledová, často velmi tmavá, odražející okolo 4% slunečního záření. Rovnovážná teplota na jejich površích je několik desítek stupňů nad absolutní nulou (tedy -273°C).

Okolo vnitřní sluneční soustavy se nachází ještě sférický **Oortův oblak**. Není pozorovatelný přímo, ale usuzujeme na něj podle nových dlouhoperiodických komet, které přilétají do vnitřní části soustavy rovnoměrně ze všech směrů.

Dál už je oblast, kde pomalu začíná převažovat přitažlivost cizích hvězd. . .

Kromě osmi planet ve sluneční soustavě je známo ještě několik stovek **extrasolárních planet**, jež obíhají kolem cizích hvězd. Soudobé astronomické přístroje nedovolují tyto vzdálené planety pozorovat přímo, ale jejich vlastnosti se vypočítávají z fotometrických nebo astrometrických měření mateřských hvězd. Většina zatím objevených extrasolárních planet je větší než Jupiter a zároveň obíhá ve vzdálenosti menší než Země kolem Slunce.¹⁶

Jen v naší Galaxii existují stovky miliard hvězd.

V celém pozorovatelném vesmíru jsou desítky bilionů galaxií. . .

Jaká je minulost a budoucnost sluneční soustavy?

Analýzou rozpadu radioaktivních prvků v primitivních meteoritech jsme se dozvěděli, že tyto meteority utuhly před *4,56 miliardami* roků. V téže době vznikalo Slunce a formovala se celá planetární soustava.

Hvězdy, vlastně celé hvězdokupy, vznikají z *mezihvězdných plyno-prachových oblaků* (s hlavní složkou molekulárním vodíkem). V jejich nejchladnějších částech, za teplot jen několik stupňů nad absolutní nulou, dochází ke *gravitačnímu kolapsu* — silnému zhuštění, následnému zvýšení tlaku, teploty a zažehnutí *termionukleárních reakcí*. Právě tehdy vznikne nová hvězda. Okolo se tvoří *plochý disk* ze zbývající látky.

V disku dochází k častým *srážkám*, které vedou k postupnému spojování menších tělísek ve větší. Nakonec zůstane jen několik velkých těles, ve kterých se soustředí většina hmotnosti. Tomuto procesu říkáme *akrece*.

Zárodky planet, *planetesimály*, se dále *zahřívají* kvůli teplu z radioaktivního rozpadu nestabilních prvků. Přispívají k tomu i zmiňované kolize. Větší tělesa jsou částečně nebo úplně *přetavena*, čímž se ustaví jejich kulový tvar. *Diferenciací* pak vznikne jádro z hustších hornin, kdežto v plášti a kůře zůstanou řídkší horniny.

Ve větších vzdálenostech od Slunce mohou vzniknout jádra velkých planet, protože je zde dostatek ledových planetesimál, které v blízkosti Slunce existovat nemohou. Jakmile překročí hmotnost jádra jistou kritickou hodnotu, začne na sebe rychle nabalovat okolní plyn a hmotnost planety se mnohonásobně zvýší.

Nakonec silné ultrafialové záření a hvězdný vítr způsobí, že se zárodečná mlhovina zahřeje a „rozfouká“ do okolního prostoru. Sluneční soustava tím získá takřka dnešní podobu.

Celý proces vzniku trval řádově 100 milionů let.

¹⁶ Aktuální informace o známých extrasolárních planetách je možné získat na internetové adrese (<http://exoplanets.org/>).

Jak víme z pozorování jiných hvězd a modelů hvězdného vývoje, bude Slunce poklidně svítit ještě asi 6 miliard let. Poté se spotřebují zásoby vodíku v jádře, dojde k „přestavbě“ celého nitra a Slunce se změní na *červeného obra*. Vnitřní planety mohou zcela zaniknout. V dalších fázích červený obr vybuchne jako nova, odvrhne svoji obálku, která bude krátkou dobu pozorovatelná jako *planetární mlhovina*. Po Slunci zůstane jen obnažené chladnoucí jádro — *bílý trpaslík*.

Ve výzkumu planetárních systémů je stále mnoho otevřených otázek. Co nás čeká v nejbližších letech?

Sonda Cassini bude podrobně zkoumat Saturn a jeho soustavu měsíců, výzkum Marsu bude pokračovat například sondami Mars Express a Mars Exploration Rover, Merkur bude mapován sondami Messenger a BepiColombo, k Plutu se vydá sonda New Horizons. Sonda Stardust má poprvé na Zem přivést vzorky prachu z komety Wild 2, Hayabusa by měla získat malý vzorek z blízkozemní planety Itokawa, meziplanetární sonda Dawn se stane oběžnicí planetek Vesta a Ceres.

Pravděpodobně objevíme stovky dalších extrasolárních planet, některé tak malé jako naše Země. Budoucí velké kosmické dalekohledy umožní získat spektra jejich atmosfér. Najdeme-li ve spektrech čáry příslušející molekulám dusíku a kyslíku, můžeme doufat, že by na vzdálených planetách mohla existovat biosféra.

Tisíce jiných překvapivých objevů však předpovědět nelze. . .

Slovníček vybraných termínů

impakt — dopad, srážka s kosmickým tělesem. Její průběh závisí na velikostech srážejících se těles, jejich struktuře, vzájemné rychlosti, geometrii srážky nebo přítomnosti atmosféry. Někdy vzniká v místě dopadu *kráter*. V případě planety Země jsou takové krátery poměrně rychle erodovány, na Měsíci naopak přetrvávají i miliardy roků.

ionizace — proces, při kterém je elektronům vázaným v atomových obalech dodána energie (srážkou s jiným atomem nebo pohlcením fotonu) a tyto elektrony se pak stanou volnými částicemi.

plazma — ionizovaný plyn, tedy látka ve stavu, kdy jsou elektrony uvolněny od atomových jader. Kladně nabití ionty a záporně nabití elektrony způsobují, že plazma je elektricky vodivé a je výrazně ovlivňováno magnetickým polem.

sublimace — přeměna látky přímo ze skupenství pevného na plynné.

termonukleární reakce — přeměny atomových jader, jež probíhají při vysoké teplotě a tlaku (v centru Slunce je teplota přibližně 15 milionů °C a tlak $2,5 \cdot 10^{16}$ Pa). Tehdy se pohybují jádra vodíku takovými rychlostmi, že mohou překonat vzájemnou odpudivou elektromagnetickou sílu (protony v obou jádrech jsou kladně nabitě) a přiblížit se natolik, aby se přitáhly krátkodosahovou silnou jadernou silou. (Důležitou úlohu přitom hraje *kvantově-mechanický tunelový jev*.)

Tabulkové údaje o tělesech sluneční soustavy

	vzdálenost od Slunce 10^6 km	rovníkový průměr km	oběžná doba	rotační perioda	hmotnost kg	prům. hustota kg/m^3	prům. teplota $^{\circ}\text{C}$
Slunce	–	1 391 020	–	25 až 33 dní	$1,99 \cdot 10^{30}$	1 400	5 500
Merkur	57,9	4 880	88 dní	58 dní	$3,30 \cdot 10^{23}$	5 400	179
Venuše	108,2	12 104	225 dní	243 dní	$4,87 \cdot 10^{24}$	5 200	464
Země	149,6	12 756	365,25 dne	23 h 56 min 4 s	$5,97 \cdot 10^{24}$	5 500	15
Měsíc	384 400 km ^c	3 476	27,32 dne ^c	27,32 dne	$7,35 \cdot 10^{22}$	3 340	~0
Mars	227,9	6 792	687 dní	24,6 h	$6,42 \cdot 10^{23}$	3 900	–63
Ceres ^z	413,9	934	4,6 roku	9,075 h	$2,3 \cdot 10^{21}$	2 300	–90
Jupiter	778,3	142 984	11,9 roku	9,9 h	$1,90 \cdot 10^{27}$	1 300	–108
Halley ^d	87,8 až 5 234	16	76 roků	2,2 dne	$5 \cdot 10^{13}$	100	~–100
Saturn	1 429	120 536	29,4 roku	10,6 h	$5,69 \cdot 10^{26}$	700	–139
Uran	2 875	51 118	83,7 roku	17,2 h	$8,68 \cdot 10^{25}$	1 300	–197
Neptun	4 504	49 532	163,7 roku	16,1 h	$1,02 \cdot 10^{26}$	1 600	–201
Pluto	5 915	2 300	248 roků	6,4 dne	$1,5 \cdot 10^{22}$	2 000	–230

^c střední vzdálenost Měsíce od Země; siderická oběžná doba Měsíce kolem Země

^z největší planetka hlavního pásu

^d Halleova kometa

chemické složení těles a jejich atmosfér:

Slunce	— plazma H (71 % hmotnosti), He (27 %), 2 % těžších prvků; atm. H (71 %), He (27 %)
Merkur	— jádro Fe (70 %), plášť křemičitany (30 %); atm. 42 % O ₂ , 40 % Na, 15 % O, ostatní (He, K) 2 %
Venuše	— asi podobné Zemi, ale méně husté jádro a jednotlitá kůra; atm. 96,5 % CO ₂ , 3,5 % N ₂
Země	— jádro vnitřní Fe, Ni (30 %), vnější (příměs S, O), plastický plášť, tenká kůra O, Si, Al (pohyblivé litosférické desky); atm. 78,1 % N ₂ , 20,9 % O ₂
Měsíc	— jádro Fe, FeS, plášť z křemičitanů (olivín, pyroxen), kůra (plagioklas); atm. –
Mars	— jádro Fe, plášť (křemičitany), jednotlitá kůra (SiO ₂ , FeO, Al ₂ O ₃); atm. 95,3 % CO ₂ , 2,7 % N ₂ , 1,6 % Ar, 0,1 % O ₂
Ceres	— jako meteority (uhlíkaté chondrity), nediferencovaná struktura; atm. –
Jupiter	— kamenné jádro (křemičitany), obal (kovový H), H ₂ ; atm. 89 % H ₂ , 11 % He
Halley	— zmrzlé plyny (H ₂ O) a prachové částice (organické molekuly); atm. H ₂ O, OH, CN, C ₂ , H ₂ CO, ...
Saturn	— kamenné jádro, vnitřní obal kovový H a vnější molekulární H ₂ ; atm. 89 % H ₂ , 11 % He
Uran	— jádro (křemičitany, Fe), ledový plášť (H ₂ O, CH ₄ , amoniak), H ₂ (jen 15 %); atm. 89 % H ₂ , 11 % He, CH ₄
Neptun	— kamenné jádro, ledový plášť, H ₂ (15 %); atm. 80 % H ₂ , 19 % He, CH ₄
Pluto	— křemičitany (70 %), ledy (30 %); kamenné jádro, ledový obal (H ₂ O) a povrch (N, CH ₄ , CO, organické látky); atm. CH ₄ , N ₂

	rozsah teplot	geom. albedo	tlak atmosféry	sklon rot. osy	magnetické pole
Slunce	4000 °C až 10 ⁶ °C	0	100 Pa	7,25°	10 ⁻⁴ T až 0,3 T
Merkur	-170 °C až +430 °C	0,12	? (velmi řídká)	0,1°	3,3 · 10 ⁻⁷ T
Venuše	+464 °C až +464 °C	0,65	9,6 · 10 ⁶ Pa ≐ 90 p _⊕	177°	< 2 · 10 ⁻⁹ T
Země	-80 °C až +50 °C	0,367	101 325 Pa ≐ 1 p _⊕	23,45°	3,1 · 10 ⁻⁵ T
Měsíc	-180 °C až +110 °C	0,12	0	6,7°	< 2 · 10 ⁻¹⁰ T
Mars	-120 °C až +20 °C	0,15	800 Pa	25°	5 · 10 ⁻⁹ T
Ceres	-200 °C až 0 °C	0,05	0	?	0
Jupiter	min. -163 °C	0,47	větší než 10 ⁷ Pa	3°	4,28 · 10 ⁻⁴ T
Halley	-200 °C až +100 °C	0,04	0	?	0
Saturn	min. -191 °C	0,46	větší než 10 ⁷ Pa	27°	2,1 · 10 ⁻⁵ T
Uran	min. -214 °C	0,51	větší než 10 ⁷ Pa	98°	2,3 · 10 ⁻⁵ T
Neptun	min. -223 °C	0,41	větší než 10 ⁷ Pa	30°	1,4 · 10 ⁻⁵ T
Pluto	-240 °C až -218 °C	0,3	0,3 Pa	120°	?

	velká poloosa AU	číselná výstřednost	sklon dráhy °	oběžná rychlost km/s	úniková rychlost km/s	tíhové zrychlení m/s ²	počet měsíců [†]	rok objevu
Slunce					617	274		-
Merkur	0,387	0,206	7,0	47,9	4,4	3,7	0	?
Venuše	0,723	0,007	3,4	35,0	10,4	8,9	0	?
Země	1	0,017	0	29,8	11,2	9,78	1	-
Měsíc	0,0026 [♠]	0,055 [♠]	5,1 [♠]	1,0 [♠]	2,4	1,62	0	-
Mars	1,524	0,093	1,9	24,1	5,0	3,7	2	?
Ceres	2,766	0,077	10,6	17,9	0,1	0,3	0	1801
Jupiter	5,203	0,048	1,3	13,1	60	23,1	62	?
Halley	35,0	0,967	162,2	0,9 až 55	0,001	5 · 10 ⁻⁵	0	-239
Saturn	9,555	0,056	2,5	9,7	36	9,0	30	?
Uran	19,22	0,046	0,8	6,8	21	8,7	21	1781
Neptun	30,11	0,009	1,8	5,5	23	11,0	11	1846
Pluto	39,54	0,249	17,2	4,8	1	0,7	1	1930

[†] objevených do roku 2003

[♠] dráha Měsíce kolem Země

The Solar System 2003

The Solar System — a tiny part of the Universe, a vast, almost empty space. It is an alien environment for a human — without atmosphere, without solid land underfoot.

The Sun, planets and their moons, asteroids and comets are a kind of small islands, where mass is concentrated. Smaller bodies — meteoroids, interplanetary dust and gas or particles of radiation — photons, also do belong to the Solar System.

A mutual attraction, a gravitational force acts among all of them and governs their motion. The Sun is by far the most massive, therefore other bodies orbit around it. The closer to the Sun a body is, the higher its orbital speed is.

The farthest planet is Neptune and then other follow: Uranus, Saturn, Jupiter, Mars, Earth, Venus and Mercury. The mean distance between the Sun and the Earth, so called *Astronomical Unit*, is 150 million km. The light travels this distance in 8 minutes 20 seconds. The diameter of the Earth is only 13,000 km.

Planets and moons do not shine with their own visible light, they only reflect a part of the sunlight. The Sun is, on the other hand, a star and as such it radiates by the entire surface to all directions.

Sometimes one can see radiation reflected from the smallest particles of interplanetary **dust** — this phenomenon is called the *zodiacal light*.

Meteoroids, stony fragments from fractions of millimetre upto a few metres in diameter, can be easily observed at the moment, when they hit the air surrounding our planet. Particles move with a relative velocity of about 50 km/s. They begin to heat themselves by a friction of air 150 km above the Earths surface. A warm and shining column of ionized air, which we see on the sky, is called a *meteor*, folkly speaking a “shooting star”.

Several times per year, for example around the 12th of August or the 18th of November, the Earth travels through the streams of cometary meteoroids, what causes a *meteor stream* on the sky.

Larger and harder meteoroids can “survive” the flight through the atmosphere and they fall on the ground as *meteorites*.

Bigger bodies are **asteroids**. They typically have an irregular shape and they consist of stony material. There orbit about one million asteroids larger than 1 km in the main belt between Mars and Jupiter.

Small **moons** of planets, like Phobos or Amalthea, are very similar to asteroids.

Big moons are comparable to small planets: Jupiters moon Ganymede is even larger than Mercury. Bodies with diameters above 1,000 km already have more regular, spherical or elliptical shape.

The four planets closest to the Sun — Mercury, Venus, Earth and Mars — are called **Earth-type or terrestrial planets**. They are relatively similar to each other: they comprise mainly of stony material, they have a solid surface and, except Mercury, they are covered by a thin layer of gases — an atmosphere. The most common chemical elements in the Earth's body are iron, oxygen, silicon and magnesium.

The outer planets Uranus and Neptune are **ice giants**. Their substantial parts are ices of water, methane, and ammonia or a mixture of hydrogen, helium and rock.

Jupiter and Saturn are **gaseous giants**. We call them Jupiter-type planets also. Their relatively small cores probably consist of rock and ice, the extended mantles are made of metallic and molecular hydrogen and helium.

All giant planets have *rings* (even though only rings of Saturn are easily observable) and numerous families of regular and irregular moons.

The Sun. An incandescent gaseous sphere, with a surface temperature of approximately $6,000^{\circ}\text{C}$. There is a hidden natural thermonuclear reactor inside, in which nuclei of hydrogen atoms are transformed to nuclei of helium atoms and photons and neutrinos are emitted at the same time. This source of energy has operated already for four and half billion years.

Sunspots and eruptions are prominent demonstrations of changes on the Sun. Both of them are induced by a strong *magnetic field*, that affects motion of solar material — electrically conductive ionized gases, it means *plasma*.

The most extended objects in the Solar System can be **comets**. Their icy-stony cores are tiny (they are a few kilometres in diameter), but when they come near the Sun, ice starts to sublimate and escaping gas and dragged dust create a coma and a tail. Their light hydrogen envelopes may reach a size of up to 100 million km.

Cometary tails are always directed approximately away from the Sun. Molecules of gas and dust grains interact with the radiation and *solar wind* — a stream of charged particles, which spread from the Sun to the interplanetary space with a velocity of about 500 km/s.

Mercury, the first planet, gets the most solar radiation energy. There is a temperature over 300°C on the illuminated hemisphere, but the reverse hemisphere cools quickly down to -200°C . The surface is covered by *impact craters*, which were formed by collisions with asteroids and comets. A big part of the surface has never been observed by a space probe.

Venus is covered by a dense atmosphere (the pressure on the surface is 90 times higher than on the Earth). Regardless it orbits the Sun twice farther than Mercury and it reflects two thirds of solar radiation, there is an unprecedented temperature 460°C . The reason is a strong *greenhouse effect* — carbon dioxide in the atmosphere transmits the visible solar radiation towards the surface but it absorbs the infrared radiation radiated from the surface and that way impedes its cooling.

Radars were able to look below the opaque atmosphere — they detected a surface characterized by fractures and volcanos. It is possible to deduce, from the number of impact craters, that the volcanic activity reformed the most of the surface of Venus 700 to 500 million years ago.

The third planet from the Sun is **the Earth**. It has a suitable size and distance from the Sun, so there may exist not only ice or water vapour but also liquid water on the surface — one of the assumptions for creation of life. The primordial air was completely converted by the activity of live organisms and it contains mostly nitrogen and oxygen today.

The Earth differs from the rest of planets also by the *plate tectonics* — its crust is cracked to individual plates, that can move on the top of the mantle. The ocean floors originate by volcanic eruptions in oceanic ridges and they dissolve by the subduction below other plates. New mountains are folded during collisions of the plates. This may be important for the life on the dry land, because the erosion otherwise would clear all mountains and the entire surface of the Earth would be covered by ocean.

The Earth is followed by **the Moon**. It also has importance for the terrestrial life: it causes, together with the Sun, changes of the low and high tide by tidal forces. The Moon also stabilizes the rotation axis of the Earth on the long term and thus prevents sudden and extreme changes of climate.

We can observe only one hemisphere of the Moon from the Earth, because the Moon rotates around its axis with exactly the same period, as it orbits around the Earth. Such phenomenon is called a *synchronous rotation*.

The Moon formed approximately 4.45 billion years ago, when a Mars-sized body collided with the Proto-Earth. A huge amount of fragments was generated by the collision, most of which falled back on the Earth, but a part of them formed a disk around the Earth. The disk acreted very quickly, probably in a few weeks, into one satellite — our Moon.

Small bodies, like asteroids, can also appear in the neighborhood of the Earth. On average, one asteroid larger than 100 m collides with the Earth every 1,000 years. A collision with a 10-km asteroid, which happens once per a few 10 million years, can cooperate in the course of large extinction of animal and plant species. The best known example is the extinction of dinosaurs 65 million years ago.

Mars. The planet distinctive by its red colour, which is caused by iron oxides.

The elevation map and distribution of impact craters on the surface suggest, that the north hemisphere could be covered by ocean 3 billion years ago.

The relics of running water are erosion shapes in numerous valleys. The largest of all is Vallis Marineris, 4,000 km long, 7 km deep.

The valley drained water from the Tharsis region. The Tharsis is of volcanic origin and one can find here the biggest volcanos in the Solar System — for example Olympus Mons, 27 km high and with the base 600 km in diameter.

Mars is rather a calm planet from the geological point of view for the last two billion years. Weak wind in the light atmosphere plays with small sand grains, seasonal changes lead to the regular growing of polar caps in winter and to their shrinking in summer.

We can find the asteroid number **(243) Ida**, for example, on an orbit between Mars and Jupiter. This 50-km asteroid belongs to the Koronis family, what is possible to recognize by similar orbits and similar colors of its members. These asteroids made up a single body, which was however shattered by a huge impact. The current moon of Ida — one-kilometre Dactyl — was formed that way.

Jupiter has the mass higher than all other planets and smaller bodies of the Solar System together. It radiates twice as much energy, as it receives from the Sun. The source is evidently a slight shrinkage of the planet and a transformation of the rotational energy to heat. There is an enormous storm, called the *Great Red Spot*, observed for a few hundreds of years in the atmosphere of Jupiter.

Probably the most interesting Jupiters moons, out of tens, are *Io and Europa*. Tides of Jupiter are so strong on Io, that they deform the whole moon and heat its interior to a temperature of a few thousand degrees Celsius. It produces never-ending volcanic activity on the surface. The volcanos erupt sulfur to a height of a few hundred kilometres and reshape the surface with unbelievable rate.

Europa is, on contrary, a very smooth moon, covered by water ice. But the structure of ruptures and magnetometric measurements prove the existence of sub-surface liquid ocean.

Saturn became famous by beauty of its bright *rings*. Regardless they have radius over 100,000 km, they are at most a few hundred metres thick. They look as a series of thousands of differently bright and differently transparent ringlets, but in reality they are composed of individual icy-stony fragments with a typical size of 10 cm. “Spaces” and other structures in the rings are caused by gravitational perturbations of small moons orbiting directly inside the rings or out of them. The moon Mimas is responsible for the most prominent *Cassini division*.

Uranus is almost not visible on the sky with the naked eye. It was discovered by chance using a telescope, by William Herschel in 1781. The rotation axis of Uranus is interesting — it lies almost in the plane of orbit and Uranus exposes in turn the north and the south pole towards the Sun.

The discovery of **Neptune** was one of the greatest triumphs of the celestial mechanics in the 19th century. Adams and Le Verrier calculated the position of the unknown planet from the observed perturbations of Uranus orbit, and Galle then indeed found it on the sky. We observe wind with a velocity of hundreds kilometres per second in the upper layers of the atmosphere, likewise on other giant planets. Spots and storms, which are probably the demonstration of the internal heat source, appear on Neptune, similarly as on Jupiter and Saturn (but not on Uranus).

No space probe has yet visited **Pluto and Charon**. The best ground-based telescopes resolve only a few bright and dark areas on them.

However, hundreds of other bodies were discovered behind Neptune, moving on similar orbits as Pluto or even farther. The whole population is called the **Kuiper belt**. They are icy bodies, often very dark, reflecting only about 4% of solar radiation. The equilibrium temperature on their surfaces is only a few tens of degrees above the absolute zero (it is -273°C).

There is a spherical **Oort cloud** also around the inner Solar System. It is not observable directly, but we infer its existence by new long-periodic comets, which reach the inner part of the Solar System evenly from all directions.

There is an area farther away, where the gravity of foreign stars starts to dominate...

Apart from the eight planets in the Solar System, there is also known a few hundreds of **extrasolar planets**, which orbit foreign stars. Contemporary astronomical instruments do not allow to observe these distant planets directly, but their properties are calculated from photometric and astrometric measurements of the mother stars. The most of extrasolar planets, discovered up to now, are bigger than Jupiter and they orbit in the distance less than the Earth orbits around the Sun.

There exist hundreds of billions of stars in our Galaxy.

There are tens of billions of galaxies in the entire observable universe...

What is the past and the future of the Solar System?

We know, from the analysis of the decay of radioactive elements in primitive meteorites, that these meteorites solidified 4.56 billion years ago. The Sun formed at the same time and the complete planetary system did also.

Stars, even whole star clusters, arise from *interstellar gas-dust clouds* (with a main component molecular hydrogen). There sets in a *gravitational collapse*, a strong increase of the density, in their coolest parts, when the temperature is only a few degrees above the absolute zero. Then the pressure and temperature become high and thermonuclear reactions are ignited. That is the time of a star birth. A *flat disk* from the remaining matter forms around it.

Collisions, which lead to a consequent coalescens of small bodies to bigger ones, happen frequently in the disk. Finally, only a few large bodies remain, in which the most of the mass is concentrated. We call this process the *accretion*.

Embryos of planets, planetesimals, are then heated by radioactive decay of unstable elements. The mentioned collisions support the heating also. Larger bodies are partly or completely melted, what sets up their spherical shape. A core arises from heavier rocks by *differentiation*, lighter elements remain in a mantel and a crust.

There may arise cores of giant planets in greater distances from the Sun, because there are enough icy planetesimals, which cannot exist in the proximity of the Sun. As soon as the mass of the core exceeds the particular critical value, it starts to accrete surrounding gas and the mass of the planet increases many times.

Finally, strong ultraviolet radiation and star wind cause, that the mother nebula heats and blows up to the surroundings space. The Solar System thus gains almost the present look.

The complete process of the creation spans approximately 100 million years.

As we know from observations of other stars and from models of star evolution, the Sun will calmly shine for about 6 billion years. Then the reserves of hydrogen in the core will be exhausted, the whole interior will be “rebuild” and the Sun will change to a *red giant*. The inner planets may be completely destroyed. The red giant will explode as a nova in later phases, it will expand its envelope, what will be observable as a *planetary nebula* for a short time. Only a naked cooling core — a *white dwarf* — will remain from the Sun.

There is still a lot of open questions in the exploration of planetary systems. What can we await in the forthcoming years?

Cassini probe will explore Saturn and its moon system in detail, the exploration of Mars will continue for example by Mars Express and Mars Exploration Rover, Mercury will be mapped by Messenger and BepiColombo probes, New Horizons probe will be sent to Pluto. Stardust probe should bring samples of dust from the comet Wild 2, Hayabusha should obtain a piece from the near-Earth asteroid Itokawa, Dawn interplanetary probe will become an orbiter of the asteroids Vesta and Ceres.

We probably will discover hundreds of other extrasolar planets, some of them as small as our Earth. Future big space telescopes will allow to obtain spectra of their atmospheres. If we find spectral lines appertaining to nitrogen and oxygen molecules, we can hope, that there may exist biosphere on distant planets.

However, thousands of another, surprising discoveries cannot be predicted. . .

Sluneční soustava 2003; Hradec Králové, 2004.

Vydala: **Hvězdárna a planetárium v Hradci Králové**

vydání 1., 16 stran, náklad 100 ks

Adresa: HPHK, Zámeček 456, Hradec Králové 8, 500 08; IČO: 64810828

e-mail: <astrohk@astrohk.cz>, web: <<http://www.astrohk.cz/>>
