

Sluneční soustava 2015

Scénář filmu o planetárních soustavách, verze 20. 3. 2015.

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

Hvězdná obloha v ekliptikálních souřadnicích, Slunce ($\odot$) se dostává do středu zorného pole.

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.

Kreslení oběžných trajektorií planet, planetky a komety s titulkou; kamera od J pólu ekliptiky k S pólu, postupné zvětšení na vnitřní planety.

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.

Velké zvětšení na Zemi ($\oplus$) a Měsíc ($\odot$), nutné zpomalení času.

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.

Otočení kamery tak, aby byla vidět tmavá polokoule $\oplus$ a zářící $\odot$.

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

Jarní obloha se zodiakálním světlem.

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“.

Meteor a bolid letící na zimní obloze.

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

Kamera typu rybí oko snímající Perseidy.

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

Fotografie meteoritu.

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.

Strih na rotující texturované planetky; pod všemi následujícími tělesy nápisy.

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

Plynulý přechod na malé měsíce.

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.

Zvětšení záběru a přechod na velké měsíce (Io, Europa, Ganymedes, Kalistó, Titan, Triton, Měsíc), Pluto a planetu Merkur.

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.

Zvětšení zorného pole na čtyři terestrické planety, pak postupný přechod k velkým planetám.

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**.

Rychle rotující Uran a Neptun.

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) a početné rodiny pravidelných i nepravidelných měsíců.

Saturn s prstenci a Jupiter. Změna zorného pole tak, aby byly viditelné všechny planety najednou.

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*.

Další zvětšení záběru na Slunce.

Nejrozsáhlejšími objekty sluneční soustavy mohou být **komety**. 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.

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.

Poslední záběr na velkou kometu s ohonem.

Střih. Následují detailní animace jednotlivých planet.

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.

Pomalou se otáčející Merkur s jednou polokoulí šedivou.

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 vyzařované a tím brání jeho ochlazování.

Venuše obalená fádni neprůhlednou atmosférou. Možný UV obrázek s patrnými pásy.

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.

Rozpuštění oblaků, zobrazení povrchu radarem. Možná změna na výškovou mapu.

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.

Pomalu rotující Země s oblačnou pokrývkou. Možný obraz bez oblaků (osvětlený rozptýleným světlem) a animace změn ročních období se sondy SeaWiFS.

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.

Změna textury na výškovou mapu, vyznačení tektonických desek, mapa stáří mořského dna. Možná animace měnících se kontinentů (Scotese, 2000).

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.

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*.

Mapa Měsíce s bump-mappingem. Porovnání přivrácené a odvrácené strany (vysvětlivka v titulku).

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.

Obraz impaktu při vzniku Měsíce (jen první, jednodušší fáze). Možná animace z SPH simulací.

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 vyhynutích živočišných a rostlinných druhů. Nejznámějším příkladem je vyhynutí dinosaurů před 65 miliony roků.

Blízkozemní planetka (6349) Golevka, sledovaná kamerou při těsném průletu mezi Měsícem a Zemí. Možné zobrazení impaktu na Yukatánský poloostrov.

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

Pomalu rotující planeta Mars.

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

Změna textury na výškovou mapu, posléze na hypotetický obraz s oceánem a zpět na fotografický povrch s bump-mappingem.

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

Velký detail oblasti Vallis Marineris, kamera sleduje údolí na stále rotujícím Marsu, mění se stíny. Možná animace blok-diagramu s vysokým rozlišením.

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.

Opět záběr na celý Mars a zmenšení zorného pole na Olympus Mons. Možný oblet sopky.

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

Zvětšení na celý Mars.

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 planety jediné těleso, které se však zcela roztříštilo při nějakém velkém impaktu. Přitom asi vznikl i současný měsíček Idy — kilometrový Dactyl.

Pomalu rotující Ida a okolo ní obíhající měsíček Dactyl. Možná animace asteroidálních rodin.

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

Rychle rotující Jupiter se skvrnou, stín některého měsíce přecházející kotouč planety.

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.

Přemístění kamery k *Io*, Jupiter viditelný v pozadí. Animace sopky s výhozem materiálu („deštníkem“).

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

Vázané rotující *Europa*. Možný detail prasklin nebo vnitřní struktury.

Saturn. Proslul krásou svých jasných *prstenců*. Přestože mají poloměr přes 100 000 km, jsou tlusté nejvýš několik stovek metrů. Zdálky vypadají jako řada tisíců různě 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*.

Oblet Saturnu s prstenci, nasunutí statického obrazu struktury prstenců, rozplynutí obrazu a opět pohled na Saturn. Průlet rovinou prstenců ze severu na jih (neosvětlenou stranu), rychlé otočení kamery na *Mimas*.

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.

Poměrně fádni rotující *Uran*, postupně se objeví rotační osa vyznačená tenkým válcem.

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.

Velký měsíc *Triton* a *Neptun* s výraznou skvrnou.

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

Animace *Pluta* s *Charonem*, vázaná rotace kolem společného těžiště.

Za Neptunem se však podařilo objevit stovky jiných těles obíhajících po podobné dráze jako Pluto nebo ještě dál. Celou populaci nazýváme **Kuiperův pás**. Jedná se o tělesa ledová, často velmi tmavá, odrážející okolo 4 % slunečního záření. Rovnovážná teplota na jejich površích je několik desítek stupňů nad absolutní nulou (tedy $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Zvětšení záběru na 1 000 AU veliký Kuiperův pás, znázorněný jako slabě průhledné těleso ve tvaru rozšiřujícího se disku.

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.

Zvětšení na Oortův oblak (průhledná slabě emitující dutá sféra).

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

Vzdálení kamery tak, aby byly vidět okolní hvězdy; pod některými hvězdami titulky s názvy.

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.

Možný detail na jednu hvězdu, která se mírně pohybuje, neboť ji ovlivňuje blízká masivní planeta, a případně pohasíná při jejích přechodech. Další detail může ukázat obří planetu poměrně blízko mateřské hvězdy.

Jen v naší Galaxii existují stovky miliard hvězd.

Výrazné zvětšení záběru na celou Galaxii.

V celém pozorovatelném vesmíru jsou desítky bilionů galaxií. . .

Poslední vzdálení kamery za místní skupinu galaxií a neuvěřitelný záběr na celý vesmír s kupami 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.

Možný obrázek obyčejného chondritu.

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 *termonukleárních reakcí*. Právě tehdy vznikne nová hvězda. Okolo se tvoří *plochý disk* ze zbývající látky.

Pohyb kamery nad statickým obrazem Velké mlhoviny v Orionu (M 42).

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*.

Záběr vnitřní části protoplanetárního disku se vznikajícími terestrickými planetami.

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. *Diferenciace* pak vznikne jádro z hustších hornin, kdežto v plášti a kůře zůstanou řidší horniny.

Názornění diferenciace na řezu planetou.

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.

Vnější část disku s jovialní planetou.

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.

Opět mlhovina M 42.

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*.

Vývoj Slunce: pomalé zvětšování průměru a zářivosti, přeměna na červeného obra a bílého trpaslíka (Schaller aj., 1992). Možný obrázek planetární mlhoviny.

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

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.

Obrázek hypotetické extrasolární planety s biosférou.

Tisíce jiných překvapivých objevů však předpovědět nelze...

Krátké rychlé titulky rolující přes obrazovku, ©.