

Układ Słoneczny 2015

Scenariusz filmu o układach planetarnych, wersja 20. 3. 2015.

Układ Słoneczny — mała część Wszechświata, rozległa, prawie zupełnie pusta przestrzeń. Dla człowieka nieprzyjazne środowisko — bez atmosfery, bez pewnego gruntu pod nogami.

Gwiazdny nieboskłon we współrzędnych ekliptycznych, Słońce ($\odot$) zajmuje miejsce w środku pola widzenia.

Słońce, planety i ich księżyce, planetki oraz komety to jakieś wyspy, gdzie zgromadzona jest materia. Do Układu Słonecznego zaliczamy wszakże i mniejsze ciała — meteoroidy, pył międzyplanetarny oraz gazy czy cząstki promieniowania — fotony.

Pomiędzy wszystkim oddziałuje wzajemne przyciąganie, siła grawitacyjna, która kieruje ich ruchem. Zdecydowanie największą masę ma Słońce, dlatego właśnie pozostałe ciała obiegają wokół niego. Im bliżej Słońca się ciało znajduje tym posiada większą prędkość obiegową.

Kreślenie trajektorii ruchu planet, planetki i komety z napisami; kamera od bieguna J ekliptyki do bieguna S, stopniowe zbliżenie na planety wewnętrzne.

Najbardziej odległą planetą jest Neptun, następnie Uran, Saturn, Jowisz, Mars, Ziemia, Wenus i Merkury. Średnia odległość pomiędzy Słońcem a Ziemią, którą nazywamy *jednostką astronomiczną* wynosi 150 milionów kilometrów; światło ją przebiegnie w 8 minut 20 sekund. Średnica kuli ziemskiej wynosi zaledwie 13 000 km.

Wielkie zbliżenie na Ziemię ($\oplus$) i Księżyc ($\odot$), konieczne jest spowolnienie czasu.

Planety i księżyce nie świecą własnym widzialnym światłem, lecz odbijają tylko część światła słonecznego. Słońce natomiast jest gwiazdą a jako taka promieniuje całą swą powierzchnią we wszystkich kierunkach.

Zwrócenie kamery tak, aby widoczna była ciemna półkula $\oplus$ i jasna $\odot$.

Czasami możemy na czystym ciemnym niebie zaobserwować światło odbite od najmniejszych cząstek **pyłu** międzyplanetarnego — zjawisko to zwane jest *światłem zodiakalnym*.

Wiosenne niebo ze światłem zodiakalnym.

Meteoroidy, kamienne odłamki o średnicy od ułamka milimetra do kilku metrów, mogą być dobrze widoczne w momencie, kiedy wpadają do atmosfery naszej planety. Przy prędkości około 50 km/s zaczynają się mocno nagrzewać tarcie o powietrze na wysokości 150 km nad powierzchnią ziemi. Rozżarzony, świecący snop jonizowanego powietrza, który widoczny jest na niebie, nazywa się *meteor*, ludowo "spadające gwiazdy".

Meteor lecący na zimowym niebie.

Kilka razy w roku, na przykład koło 12. sierpnia lub 18. listopada, Ziemia przechodzi przez pasmo kometarnych meteoroidu, co przejawia się na niebie jako *rój meteorów*.

Kamera typu rybie oko kadrująca Perseidy.

Większe i mocniejsze meteoroidy mogą "przeżyć" przelot przez atmosferę i spaść na ziemię jako *meteoryty*.

Fotografia meteorytu.

Więszymi ciałami są **planetki**, zwane również asteroidami. Mają typowy nieregularny kształt tworzy je kamienny materiał. W głównym pasie między Marsem a Jowiszem krąży około miliona planetek większych niż 1 km.

Ujęcie wirującej teksturowanej planetki; pod wszystkimi ciałami napisy.

Małe **księżyce planet**, np. Fobos czy Amalthea, są bardzo podobne do planetek.

Płynne przejście na małe księżyce.

Duże księżyce są porównywalne z małymi planetami: księżyc Jowisza Ganymedes jest nawet większy niż Merkury. Ciała o średnicy ponad 1 000 km posiadają już regularne kształty: kuliste lub elipsoidalne.

Zbliżenie ujęcia oraz przejście na duże księżyce (Io, Europa, Ganymedes, Kalisto, Tytan, Tryton, Księżyc), Pluto oraz planetę Merkury.

Cztery planety najbliższej Słońca — Merkury, Wenus, Ziemia i Mars — nazywane są **planetami typu ziemskiego**. Są dosyć podobne: z dużej części są z kamienia, posiadają twardą powierzchnię a za wyjątkiem Merkurego są otoczone cienką warstwą gazów — atmosfera. Najczęściej występującymi pierwiastkami chemicznymi na ziemi są żelazo, tlen, krzem oraz magnez.

Zbliżenie pola widzenia na cztery planety grupy ziemskiej, następnie stopniowe przejście do planet olbrzymów.

Bardziej odległe planety, Uran i Neptun, należą do grupy, których podstawowym składnikiem są zlodowaciała woda, metan i amoniak czy mieszanina wodoru, helu i kamieni. Nazywane są planetami zewnętrznymi lub **lodowymi olbrzymami**.

Szybko wirujący Uran i Neptun.

Jowisz i Saturn są **gazowymi olbrzymami**. Nazywane są także planetami typu jowiszowego. Ich względnie małe jądro prawdopodobnie składa się z kamienia i lodu, rozległa powłoka utworzona jest z metalicznego i molekularnego wodoru i helu.

Wszystkie duże planety posiadają pierścienie (dobrze widoczne są tylko wokół Saturna) oraz liczne rodziny regularnych i nieregularnych księżyców.

Saturn z pierścieniami oraz Jowisz. Zmiana pola widzenia tak, aby były widoczne wszystkie planety naraz.

Słońce. Rozżarzona kula gazu, o temperaturze na powierzchni około 6 000 °C. Skrywa w sobie naturalny reaktor termonuklearny, w którym zachodzi przemiana jąder atomu wodoru na jądra helu a przy tym wyzwalają się fotony i neutrina. To źródło energii działa już 4 i pół miliarda lat.

Wyrażnym przejawem zmian na Słońcu są *plamy słoneczne i erupcje*. Oba zjawiska spowodowane są silnym *polem magnetycznym*, które wpływa na ruch substancji słonecznej — przewodzących prąd elektryczny zjonizowanych gazów, czyli *plazmy*.

Dalsze zbliżenie Słońca.

Do najbardziej rozległych obiektów układu słonecznego należą **kometry**. Ich lodowo–kamienne jądro jest wprawdzie niewielkie (miewa średnicę kilka kilometrów), ale kiedy zbliży się do Słońca, lód zacznie sublimować a ulatniające się gazy oraz pył tworzą komę i warkocz. Ich rzadka wodorowa powłoka może osiągnąć nawet 100 milionów kilometrów.

Warkocz komet są zawsze odchylone od Słońca. Molekuły gazów i cząsteczki pyłu interagują z promieniowaniem i *wiatrem słonecznym*, strumieniem naładowanych cząstek, które rozprzestrzeniają się ze Słońca w przestrzeń międzyplanetaryną z prędkością do 500 km/s.

Ostatnie ujęcie dużej komety z warkoczem.

Ujęcie. Następują szczegółowe animacje poszczególnych planet.

Merkury, pierwsza planeta, otrzymuje najwięcej energii promienistej ze Słońca. Na oświetlonej półkuli panuje temperatura ponad 300 °C, ale odwrotna stronie szybko stygnie na –200 °C. Powierzchnia jest pokryta *kraterami udarzeniowymi*, powstałymi na skutek zderzeń z planetkami lub kometami. Znacznej części powierzchni nie zbadała dotychczas żadna sonda kosmiczna.

Wolno wirujący Merkury z jedną szarą półkulą.

Wenus pokrywa stale gęsta atmosfera (ciśnienie przy powierzchni jest 90 razy wyższe niż na Ziemi). Mimo iż krąży wokół Słońca po orbicie dwa razy dalej niż Merkury a ponad to odbija dwie trzecie promieniowania słonecznego, to na całej jej powierzchni panuje niewiarygodna temperatura 460 °C. Przyczyną tego jest *efekt cieplarniany* — dwutlenek węgla w atmosferze przepuszcza widzialne promieniowanie słoneczne na powierzchnię, ale pochłania promieniowanie podczerwone emitowane z powierzchni zabraniając tak w jej ochłodzeniu.

Wenus otoczona nieprzejrzystą atmosferą. Możliwy UV obrazek z widocznymi pasami.

Pod nieprzejrzystą atmosferę można przeniknąć za pomocą radarów — na powierzchni występują charakterystyczne *załamania i wulkany*. Z liczby kraterów uderzeniowych można wywnioskować, iż aktywność wulkaniczna przetworzyła większą część powierzchni Wenus w okresie przed od 700 do 500 milionami lat.

Rozpuszczanie chmur, widok powierzchni uzyskany za pomocą radaru. Możliwa zamiana na mapę wysokościową.

Trzecią w kolejności planetą od Słońca jest **Ziemia**. Dzięki odpowiedniej wielkości i odległości od Słońca, na jej powierzchni może występować nie tylko lód czy para wodna lecz także *woda w stanie ciekłym* — jeden z warunków powstania życia. Pierwotna atmosfera została całkowicie przemieniona przez organizmy żywe a obecnie zawiera głównie azot i tlen.

Wolno wirująca Ziemia z pokrywą chmur. Możliwy obraz bez obłoków (oświetlony światłem rozproszonym) oraz animacja zmian pór roku z sondy SeaWiFS.

Od wszystkich pozostałych planet różni się także *tektoniką płytową* — skorupą ziemską popękaną na poszczególne płyty, które mogą się przemieszczać po zewnętrznej skorupie. Dna oceanów nieustannie powstają w wyniku aktywności wulkanicznej w grzbietach oceanicznych a zanikają przy zsunięciu płyty pod inne płyty. Przy kolizjach płyt powstają nowe pasma gór. To może mieć ogromne znaczenie dla życia na lądzie, ponieważ w przeciwnym razie erozja mogłaby wszystkie masywy górskie stopniowo zrównać a całą powierzchnię Ziemi pokrywałyby ocean.

Zmiana tekstury na mapę wysokościową, wyznaczenie płyt tektonicznych, mapa wieku dna morskiego. Możliwa animacja zmieniających się kontynentów (Scotese, 2000).

Ziemi towarzyszy **Księżyc**. Ten również ma swoje znaczenie dla życia na Ziemi: wraz ze Słońcem poprzez oddziaływanie pływowe powoduje zmiany przyprływu i odpływu. Księżyc stabilizuje ponad to oś obrotu Ziemi, zabraniając w ten sposób nagłym zmianom klimatu.

Z Ziemi można obserwować tylko jedną półkulę Księżyca, ponieważ Księżyc obraca się wokół swej osi w takim samym czasie, w jakim okrąża Ziemię. Zjawisko to jest zwane *rotacją wiązaną*.

Mapa Księżyca z bump-mappingem. Porównanie widocznej i odwróconej strony Księżyca (wyjaśnienie w napisie).

Księżyc uformował się mniej więcej przed 4,45 miliardami lat, kiedy to Protoplazma zderzyła się z ciałem wielkości Marsa. Przy kolizji powstała ogromna ilość ułamków, z których większość spadła z powrotem na Ziemię, część z nich utworzyła tarczę wokół Ziemi, która w bardzo krótkim czasie, przypuszczalnie w ciągu kilku tygodni, złączyła się w jednego satelitę — nasz Księżyc.

Obraz zderzenia przy powstaniu Księżyca (tylko pierwsza, łatwiejsza faza). Możliwa animacja ze symulacją SPH.

W pobliżu Ziemi mogą się pojawić także małe ciała — planetki. Średnio raz na tysiąc lat dochodzi do zderzenia Ziemi z planetką o wielkości ponad 100 m. Raz na kilkadziesiąt milionów lat może kolizja z 10 km planetką spowodować wyginięcie gatunków zwierząt i roślin. Najbardziej znanym przykładem jest wyginięcie dinozaurów przed 65 milionami lat.

Niezbyt odległa od Ziemi planetka (6349) Golevka, śledzenie kamerą przy przelocie między Księżycem a Ziemią. Możliwe przedstawienia upadku na półwysep Yukatan.

Mars. Planeta charakterystyczna czerwonym zabarwieniem, którą zawdzięcza tlenkom żelaza.

Wolno wirująca planeta Mars.

Mapa wysokościowa i rozłożenie kraterów na powierzchni wskazują, że przed około 3 miliardami lat cała półkula północna Marsa mogła być pokryta oceanem.

Zmiana tekstury na mapę wysokościową, następnie na hipotetyczny obraz z oceanem i powrót do powierzchni fotograficznej z bump-mappingem.

Efektom działania płynącej wody są erozyjne kształty w licznych dolinach. Największą z nich jest Vallis Marineris, o długości 4 000 km a głębokości 7 km.

Duży szczegół obszaru Vallis Marineris, kamera śledzi dolinę na stale wirującym Marsie, gra cieni. Możliwa animacja blok-diagramu z dużą rozdzielczością.

Dolina odprowadzała wodę ze wzniesionego obszaru Tharsis. Tharsis jest pochodzenia wulkanicznego a znaleźć na nim można największe wulkany w układzie słonecznym — na przykład Olympus Mons, o wysokości 27 km a podstawą o średnicy 600 km.

Ponownie ujęcie całego Marsa a następnie zmniejszenie pola widzenia na Olympus Mons. Możliwy lot wokół wulkanu. ■

Ostatnie dwa miliardy lat z geologicznego punktu widzenia jest Mars raczej spokojną planetą. Słaby wiatr w rzadkiej atmosferze "igra sobie" z drobnymi ziarenkami piasku, zmiany pór roku powodują regularne powiększanie czap polarnych w zimie i w lecie.

Powiększenie całego Marsa.

Na orbicie między Marsem a Jowiszem można znaleźć na przykład planetkę numer **(243) Ida**. Ta pięćdziesięciokilometrowa planetka należy do rodziny Koronis, co można poznać według podobnej orbity i podobnego zabarwienia ich członków. Kiedyś planetki te były jednym ciałem, które się całkowicie rozpadło przy jakimś wielkim zderzeniu. Powstał przy tym współczesny mały księżyc Idy — kilometrowy Dactyl.

Pomału wirująca Ida a wokół niej księżyc Dactyl. Możliwa animacja rodzin asteroidów.

Jowisz; posiada większą masę niż wszystkie pozostałe planety i mniejsze ciała układu słonecznego razem wzięte. Emituje dwa razy tyle energii, niż otrzymuje od Słońca. Jej źródłem jest przypuszczalnie nieznaczne kurczenie się planety oraz przemiana energii obrotowej w ciepło. W atmosferze Jowisza od kilku stuleci obserwować można olbrzymią burzę, zwaną *Wielką czerwoną plamą*.

Szybko wirujący Jowisz z plamą, cień któregoś z księżyców przechodzącego przed tarczą planety.

Z dziesiątek księżyców Jowisza na uwagę zasługują *Io* i *Europa*. Oddziaływania pływowe Jowisza są na Io tak silne, że deformują cały księżyc i ogrzewają jego wnętrze do temperatury kilku tysięcy stopni Celsjusza. Na powierzchni przejawia się to nieustanną aktywnością wulkaniczną. Wulkany wyrzucają siarkę do wysokości kilkuset kilometrów, przetwarzając powierzchnię z niewiarygodną szybkością.

Przesunięcie kamery w stronę Io, w tle widoczny Jowisz. Animacja wulkanu z wyrzucaniem materiału ("parasolem").

Europa natomiast jest bardzo gładkim księżycem, pokrytym lodem (wodnym). Struktura szczelin oraz pomiary magnetometryczne świadczą jednakże o istnieniu ciekłego oceanu pod powierzchnią.

Wirująca Europa. Możliwy szczegół szczelin lub struktury wewnętrznej.

Saturn. Słynny dzięki efektownym, jasnym *pierścieniom*. Mimo, iż mają promień ponad 100 000 km, ich grubość nie przekracza kilkuset metrów. Z daleka wyglądają jak szereg tysięcy pierścieni o różnej jasności i przezroczystości, ale w rzeczywistości składają się z drobnych lodowo- kamiennych ułamków o wielkości przeważnie około 10 cm. "Szczeliny" i inne struktury w pierścieniach są wywołane zakłóceniami grawitacyjnymi małych księżyców krążących bezpośrednio w pierścieniach lub poza nimi. Za najefektowniejszy podział Cassiniiego odpowiedzialny jest księżyc Mimas.

Okrążenie Saturna z pierścieniami, nasunięcie obrazu statycznego struktury pierścieni, rozplynięcie obrazu i ponownie widok Saturna. Przelot płaszczyzną pierścieni z południa na północ (nieoświetloną stroną), szybkie zwrócenie kamery na Mimas.

Uran; już prawie niewidoczny na niebie gołym okiem. Był odkryty przypadkowo za pomocą lunety, przez Williama Herschela w 1781 roku. Ciekawostką jest jego oś obrotu, która leży prawie w płaszczyźnie orbity, dzięki czemu Uran odwraca do Słońca na zmianę biegun północny i południowy.

Stosunkowo nieciekawy wirujący Uran, stopniowo pojawia się oś obrotu wyznaczona cienkim walcem.

Odkrycie **Neptuna** było jednym z największych tryumfów mechaniki nieba XIX wieku: z zaobserwowanych zakłóceń orbity Uranu udało się Adamowi a Le Verrier obliczyć pozycję nieznanej planety, którą niebawem na niebie odnalazł Galle. Podobnie jak w przypadku pozostałych planet olbrzymów zaobserwować można w górnych warstwach atmosfery wiatr o prędkości kilkuset metrów na sekundę. Podobnie jak na Jowiszu i Saturnie (na Uranie nie występuje) pojawiają się na Neptunie plamy i burze, które są zapewne przejawem wewnętrznego źródła ciepła.

Duży księżyc Tryton i Neptun z wyraźną plamą.

Plutona ani Charona na razie nie odwiedziła żadna sonda kosmiczna. Nawet najlepsze ziemskie lunety są w stanie rozróżnić na nich tylko kilka jasnych i ciemnych obszarów.

Animacja Plutona z Charonem, rotacja wiązana wokół wspólnego środka ciężkości.

Za Neptunem udało się odkryć setki innych ciał krążących na podobnej orbicie co Pluton lub jeszcze dalej. Cała populacja zwana jest **pasem Kuipera**. Są to ciała lodowe, często bardzo ciemne, odbijające około 4% promieniowania słonecznego. Temperatura równowagi na ich powierzchniach wynosi kilkadziesiąt stopni powyżej zera bezwzględnego (czyli -273°C).

Powiększenie ujęcia na 1 000 AU wielki pas Kuipera, przedstawiony jako cienkie przezroczyste ciało w kształcie rozszerzającej się tarczy.

Wokół wewnętrznego układu słonecznego znajduje się jeszcze sferyczny **obłok Oorta**. Nie można go bezpośrednio zaobserwować, ale wnioskuje się o jego istnieniu według nowych długookresowych komet, które przylatują do wewnętrznej części układu równomiernie ze wszystkich kierunków.

Powiększenie obłoku Oorta (przejrzysta słabo emitująca sfera).

Dalej jest już obszar, gdzie stopniowo zaczyna przeważać przyciąganie obcych gwiazd...

Odjazd kamery tak, aby były widoczne okoliczne gwiazdy; pod niektórymi gwiazdami napisy z nazwami.

Oprócz ośmiu planet w układzie słonecznym znane są setki **planet obiegających wokół obcych gwiazd**. Współczesne przyrządy astronomiczne nie umożliwiają ich bezpośredniej obserwacji, ale ich własności można obliczyć z pomiarów fotometrycznych lub astrometrycznych gwiazd macierzystych. Większość do tej pory odkrytych planet z poza naszego układu słonecznego jest większych niż Jowisz a jednocześnie krąży po orbicie mniejszej niż Ziemia wokół Słońca.

Możliwy szczegół jednej gwiazdy, która się nieznacznie porusza, pod wpływem bliskiej masywnej planety, a ewentualnie przygasa przy jej przejściach. Kolejny szczegół może wskazywać na planetę olbrzymią stosunkowo niedaleko od gwiazdy macierzystej.

Tylko w naszej Galaktyce istnieją setki miliardów gwiazd.

Wyraźne powiększenie ujęcia całej Galaktyki.

W całym wszechświecie, który jesteśmy w stanie obserwować znajduje się dziesiątki bilionów galaktyk...

Ostatni odjazd kamery za miejscową grupę galaktyk i niewiarygodne ujęcie całego wszechświata z gromadami galaktyk.

Jaka jest przeszłość i przyszłość układu słonecznego?

Z analizy rozpadu pierwiastków radioaktywnych w prymitywnych meteoroidach można się dowiedzieć, że meteoroidy te zakrzepły przed *4,56 miliardami lat*. W tym samym czasie powstawało Słońce i formował się cały układ słoneczny.

Możliwy obraz zwyczajnego chondrytu.

Gwiazdy, a właściwie całe gromady gwiazd, powstają z *międzygwiazdnych obłoków gazowo-pyłowych* (głównym składnikiem jest molekularny wodór). W ich najchłodniejszych częściach, przy temperaturze kilka stopni powyżej zera bezwzględnego, następuje *grawitacyjny kolaps* — silne zagęszczenie, następnie wzrost ciśnienia, temperatury a rozpoczęcie *reakcji termojądrowych*. Właśnie wtedy powstaje nowa gwiazda. Wokół powstaje *płaska tarcza* z pozostałej materii.

Ruch kamery nad statycznym obrazem Wielkiej mgławicy w Orionie (M 42).

W tarczy następują częste *zderzenia*, w wyniku których stopniowo łączą się mniejsze ciała w większe. W efekcie zostanie tylko kilka dużych ciał, w których skupi się większa część masy. Proces ten zwany jest *akrecją*.

Ujęcie wewnętrznej części protoplanetarnej tarczy z powstającymi planetami typu ziemskiego.

Zarodki planet, *planetesimale*, nadal się *ogrzewają* dzięki ciepłu pochodzącemu z radioaktywnego rozpadu niestabilnych pierwiastków. Swoją rolę mają również wspomniane kolizje. Większe ciała są częściowo lub w całości *przetopione*, dzięki czemu uzyskują kulisty kształt. Poprzez *rozóżnicowanie* powstanie jądro z gęstych skał, natomiast w skorupie zostaną rzadsze minerały.

Przedstawienie zróżnicowania w przekroju planety.

We wszystkich odleglejszych od Słońca planetach mogą powstać jądra planet olbrzymów, ponieważ występuje tu znaczna ilość lodowych planetesimali, które nie mogą istnieć w pobliżu Słońca. Kiedy masa jądra przekroczy pewną wartość krytyczną, szybko zacznie ściągać do siebie otaczające gazy a masa planety wielokrotnie wzrośnie.

Zewnętrzna część tarczy z planetą typu Jowisza.

W końcu silne promieniowanie nadfioletowe i wiatr gwiazdowy spowodują, że mgławica zarodkowa się ogrzeje i rozrzuci materię do otaczającej przestrzeni. Układ słoneczny uzyska w ten sposób prawie współczesny wygląd.

Cały proces powstania trwał około 100 milionów lat.

Ponownie mgławica M42.

Jak wynika z obserwacji innych gwiazd oraz modelu ich ewolucji, Słońce będzie jeszcze spokojnie świecić około 6 miliardów lat. Później zużyją się zapasy wodoru w jądrze, nastąpi "przebudowa" całego wnętrza po czym nastąpi przemiana w *czerwonego olbrzyma*. Planety wewnętrzne mogą całkowicie zaniknąć. W dalszej fazie czerwony olbrzym eksploduje jako nowa. Odrzuci materię z zewnętrznych warstw, która będzie przez krótki okres widoczna jako *mgławica planetarna*. Ze Słońca pozostanie stygnące jądro — *biały karzeł*.

Ewolucja Słońca: powolne powiększanie średnicy i promieniowania, przemiana w czerwonego olbrzyma i białego karła (Schaller, 1992). Prawdopodobny obraz mgławicy planetarnej.

W badaniach systemów planetarnych jest ciągle dużo otwartych kwestii. Co nas czeka w najbliższych latach?

Prawdopodobnie odkryjemy setki kolejnych planet poza naszym układem słonecznym, niektóre wielkości naszej Ziemi. Ogromne teleskopy kosmiczne przyszłości umożliwią uzyskanie spektrum ich atmosfer. Jeśli odnajdziemy w widmach linie odpowiadające molekułom azotu i tlenu, wówczas możemy przypuszczać, że na tych odległych planetach może istnieć biosfera.

Obrazek hipotetycznej planety poza naszym układem słonecznym z biosferą.

Tysiąca innych zaskakujących odkryć nie sposób przewidzieć. . .

Krótkie szybkie napisy przebiegające po ekranie, ©.