



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej
Podyplomowe Studia Pedagogiczne i Zawodowe

P R A C A K O Ń C O W A **Studiów Podyplomowych**

Kierunek:
Fizyka z elementami informatyki

Wacław Libront

**SYMULACJA LOTÓW KOSMICZNYCH
W KOMPUTEROWYM EKSPERYMENCIE FIZYCZNYM**

Opiekun: dr Lucjan Pytlik

Kraków, lipiec 2012 r

„... patrzcie, jakie to proste...”

Serdecznie dziękuję Panu dr Lucjanowi Pytlikowi,
za skierowanie moich myśli na tory ruchu planet.

SPIS TREŚCI

WSTĘP.....	6
KRÓTKA HISTORIA LOTÓW KOSMICZNYCH.....	9
DLACZEGO KOSMOS?.....	9
PO CO BADAĆ KOSMOS?	10
PIERWSI BADACZE.....	11
PODOBÓJ KOSMOSU.....	12
CO NAS CZEKA W PRZYSZŁOŚCI?.....	15
FIZYKA I TECHNIKA LOTÓW KOSMICZNYCH.....	19
FIZYKA LOTÓW KOSMICZNYCH.....	19
TECHNIKA LOTÓW KOSMICZNYCH.....	20
NAPĘD PRZYSZŁOŚCI.....	23
RUCH CIAŁ W POLU GRAWITACYJNYM.....	28
PITAGOREJSKA IDEA POZNANIA ŚWIATA	28
PRAWO POWSZECHNEGO CIĄŻENIA	29
GRAWITACJA W OGÓLNEJ TEORII WZGLĘDNOŚCI.....	30
FIZYKA KOMPUTEROWA	34
SYMULACJE KOMPUTEROWE.....	34
ALGORYTM EULERA	35
DYNAMIKA RUCHU PLANET	36
ULEPSZONY ALGORYTM EULERA	37
ALGORYTM VERLETA.....	39
ALGORYTM RUNGEGO-KUTTY.....	40
ENERGIA CAŁKOWITA UKŁADU	41
PROGRAM KOMPUTEROWY - GRAWITACJA.....	48
OPIS DZIAŁANIA.....	48
OBSŁUGA I STEROWANIE.....	49
<i>OBSZAR ANIMACJI.....</i>	<i>50</i>
<i>OBIEKTY KOSMICZNE.....</i>	<i>50</i>
<i>PANEL KOMPUTER.....</i>	<i>51</i>
<i>PANEL RADAR.....</i>	<i>52</i>
<i>PRZYCISK MOSTEK.....</i>	<i>52</i>
<i>PANEL MOSTEK.....</i>	<i>52</i>
<i>WARTOŚCI CHWILOWE.....</i>	<i>56</i>
<i>PANEL PARAMETRY.....</i>	<i>57</i>
<i>ARKUSZ WYNIKI.....</i>	<i>65</i>
GOTOWE SYMULACJE.....	66
<i>SŁOŃCE - ZIEMIA - KSIĘŻYC - MARS</i>	<i>66</i>
<i>UKŁAD PODWÓJNY ALFA CENTAURI.....</i>	<i>70</i>
<i>NIEWAŻKOŚĆ</i>	<i>71</i>
<i>WAHADŁOWIEC W LOCIE ORBITALNYM.....</i>	<i>73</i>
<i>ARMATA NEWTONA.....</i>	<i>77</i>
<i>START Z POWIERZCHNI ZIEMI I LOT NA KSIĘŻYC</i>	<i>79</i>
<i>KINEMATYKA.....</i>	<i>82</i>
ZAWARTOŚĆ PŁYTKI CD.....	85
ZAKOŃCZENIE	89
OGRANICZENIA PROGRAMU.....	89
PRZYSZŁOŚĆ PROGRAMU	90

WSTĘP



EGG w Mgławicy Orzeł. Teleskop Hubble'a (NASA)

WSTĘP

Od tysięcy lat gatunek ludzki wpatruje się w gwiazdy. Zaledwie od kilkuset lat rozumiemy, że Ziemia nie jest centrum Wszechświata, a od kilkudziesięciu, że jesteśmy zaledwie mikroskopijną cząstką, czegoś naprawdę ogromnego. Do początków XX wieku naszym pojęciem o Kosmosie rządziły głównie filozofia i religia. Koncepcje Einsteina czasu i przestrzeni, mechanika kwantowa oraz fizyka statystyczna zmieniły sposób patrzenia na gwiazdy. Prawdziwe rozmiary kosmosu potrafiliśmy ocenić, gdy możliwe stało się wystrzelenie aparatury badawczej w przestrzeń kosmiczną. Dziś wiemy, że cały nasz obserwowalny Wszechświat, to tylko niewielki fragment powłoki, ogromnego, ciągle rozszerzającego się „balonu”. Zapewne teraźniejsze osiągnięcia w tej dziedzinie, to tylko wstęp do czekającej nas prawdziwej eksploracji Kosmosu, której głównym celem jest między innymi kolonizacja dalekich planet.

Spoglądając w rozgwieżdżone niebo możemy zauważyć, że otaczający nas świat daje nam możliwość obserwacji i badań praktycznie nieograniczonej liczby zjawisk fizycznych. Są to zarówno zjawiska bezpośrednio nam dostępne i doświadczalne przez nasze zmysły, na przykład związane z ciepłem, światłem, ruchem ciał, jak też zjawiska, które badać możemy jedynie pośrednio, za pomocą przyrządów stanowiących niejako przedłużenie naszych zmysłów. Do tej grupy zaliczyć możemy zjawiska astrofizyczne, obserwowane w naszej części wszechświata, jak i zjawiska z mikroświata atomów. Jedną z fundamentalnych dziedzin nauki, która zajmuje się badaniem tych zjawisk jest mechanika, której przedmiotem jest badanie i opisywanie ruchów ciał. Początkowo przedmiotem zainteresowań mechaników był ruch pojedynczego ciała. Zagadnienie to w naturalny sposób uogólniono na zagadnienie ruchu wielu ciał w polu grawitacyjnym.

Złożone problemy, z którymi ma do czynienia fizyka, prawie zawsze nie są rozwiązywalne analitycznie. Opisywane w dalszej części pracy równanie ruchu ciał, wynikające z II zasady dynamiki Newtona, jest równaniem różniczkowym zwyczajnym drugiego rzędu, które jest rozwiązywalne jedynie przy założeniu stałej wartości masy ciała i niezależnej od czasu siły na nie działającej. Rzeczywisty ruch ciała jest zjawiskiem o wiele bardziej skomplikowanym, i w ogólnym przypadku nierozwiązywalnym analitycznie, ze względu na niepewność, co do wartości siły działającej na ciało w ruchu.

Rozwój komputerów i technik obliczeniowych dał możliwość rozwiązywania wyżej wymienionych zagadnień oraz wpłynął stymulująco na intensywny rozwój teoretycznych i eksperymentalnych badań poprzez uzyskiwanie rozwiązań w eksperymencie komputerowym, który często nazywany jest symulacją komputerową, a nowy dział nauki - fizyką obliczeniową. Współczesna fizyka obliczeniowa zajmuje się zastosowaniem algorytmów numerycznych do rozwiązywania zagadnień, których jakościowy oraz ilościowy opis określają teorie i modele wypracowane w poszczególnych działach fizyki. Są to m.in. fizyka jądrowa i fizyka plazmy, fizyka cząstek elementarnych, fizyka materii skondensowanej, astrofizyka, fizyka kwantowa.

Eksperyment komputerowy nie jest procesem jednorazowym i wymaga wielu prób i testów zarówno na etapie budowy fizycznego modelu, jak i na etapie projektowania algorytmu numerycznego. Zazwyczaj pierwsze wyniki ukazują niedoskonałości opisu modelu. Nie jest też łatwo określić, które algorytmy dają poprawne i dokładne wyniki.

Praca ta ma na celu zaznajomić czytelnika z elementarnymi zagadnieniami komputerowego modelowania i symulowania dynamicznych zjawisk fizycznych z dziedziny oddziaływań grawitacyjnych. Nie ma charakteru ściśle naukowego, dlatego brak w niej wyprowadzeń wzorów; podane są tylko te, które są niezbędne do zrozumienia działania zjawiska i symulacji komputerowej. Opracowany program komputerowy, oparty jest wyłącznie możliwości, jakie oferuje arkusz kalkulacyjny. Dlaczego takie środowisko? Można oczywiście napisać go w bardziej wydajnym języku, przy użyciu bibliotek umożliwiających lepszą animację i lepszą interakcję z użytkownikiem. Wydaje mi się, że taki sposób prezentacji nadaje większą wartość edukacyjną, bo daje możliwość samodzielnego „poprawiania” programu i wykorzystania obliczeń do dalszych badań. Moce obliczeniowe współczesnych komputerów sprawiają, że nie ma problemów z „wyliczeniem”. Jeśli pojawiają się problemy, to związane są z dokładnością obliczeń. Jednak nie należy oczekiwać, że w programie będzie można podziwiać realistyczne i trójwymiarowe obrazy. Służy on jedynie do celów edukacyjnych, dla chcących przeprowadzić symulację ruchu ciał w polu grawitacyjnym. Z tego też względu ograniczono jego możliwości do zdefiniowania rzeczywistych własności czterech obiektów (planet, gwiazd) i rakiety. Ograniczono też symulację ruchu do płaszczyzny.

W kolejnych rozdziałach pracy starałem się przybliżyć szereg faktów związanych z ogólnie rozumianymi lotami kosmicznymi. Temat jest oczywiście bardzo rozległy, mimo dość krótkiej historii poznawania kosmosu. W pierwszej części czytelnik zaznajomi się z historią lotów, stanem obecnym i tym, co nas może czekać w przyszłości. Kolejny rozdział skupia się na fizycznych i technicznych aspektach lotów kosmicznych oraz krótko omawia stan prac nad silnikami rakietowymi. Lotami kosmicznymi rządzą prawa fizyki, a wśród nich prawo powszechnego ciężenia. Sposób dochodzenia do poznania i zrozumienia tych idei omówiony jest w rozdziale o grawitacji. Ostatnie dwa rozdziały dotyczą już zastosowania komputerów w symulacji zjawisk fizycznych, a w szczególności poruszania się planet i lotów kosmicznych. Pierwszy z nich omawia kilka podstawowych algorytmów stosowanych w tego typu symulacjach, a drugi, i zarazem ostatni rozdział pracy, omawia działanie programu komputerowego oraz przybliża obsługę na podstawie kilku gotowych schematów. W zakończeniu pracy dowiemy się o tym, czego nie udało się zrealizować w programie oraz o tym, co autor pracy zamierza zmienić w przyszłych jego wersjach.

KRÓTKA HISTORIA LOTÓW KOSMICZNYCH

DLACZEGO KOSMOS?
PO CO BADAĆ KOSMOS?
PIERWSI BADACZE
PODOBÓJ KOSMOSU
CO NAS CZEKA W PRZYSZŁOŚCI?



Śnieżny Anioł. Teleskop Hubble'a (NASA)

KRÓTKA HISTORIA LOTÓW KOSMICZNYCH

DLACZEGO KOSMOS?

Kto pierwszy oglądał Ziemię z orbity? Czyja rakieta pierwsza przekroczyła barierę kosmosu? Kto pierwszy wyliczył, jak tam dolecieć? A kto pierwszy pomyślał o locie „do gwiazd”? Na takie pytania należałoby odpowiedzieć (i wiele innych) opisując historię lotów kosmicznych.

Zanim jednak rozpoczniemy chronologię, należy zdefiniować, co oznacza dla nas termin „kosmos”. Naukowcy jednoznacznie opisują go, jako przestrzeń poza obszarem ziemskiej atmosfery. Umownie przyjmuje się, że ta granica przebiega około 80-100 km nad powierzchnią Ziemi. Ale jak duży jest Kosmos? Nie wystarczy powiedzieć, że jest ogromny. Że istnieje od 14 miliardów lat. Że jesteśmy częścią galaktyki, którą nazywamy „Droga Mleczna”, która liczy około 150 miliardów gwiazd. Że udało nam się zaobserwować kilkanaście miliardów takich galaktyk. Że nasz wszechświat ciągle się rozszerza. Że wreszcie, odległości między kosmicznymi obiektami są tak duże, że na razie możemy jedynie marzyć o prawdziwej kosmicznej podróży. Żeby uzmysłowić sobie, z jakimi wielkościami mamy do czynienia, najlepiej je przeskalać, do wielkości, które łatwiej sobie wyobrazić.

Żyjemy na stosunkowo małej planecie, o promieniu około sześciu tysięcy kilometrów. Najważniejszym dla nas ciałem niebieskim, oprócz Księżyca jest Słońce, które jest oddalone od Ziemi 150 milionów kilometrów. Światło potrzebuje na przebycie dystansu Słońce - Ziemia, z prędkością 300 000 kilometrów na sekundę, około 8 minut. Jeżeli zmniejszymy tę odległość do 1 milimetra (150 mln km!), wtedy najbliższa gwiazda znajdzie się mniej więcej, w odległości 300 metrów od Słońca. Do Słońca jeden milimetr, a do najbliższej gwiazdy około 300 metrów! Słońce razem z całym otoczeniem gwiazdnym tworzy ogromny system zwany Droga Mleczną. W naszej umownej skali, ten ogromny dysk ma średnicę około 6 tysięcy kilometrów, czyli tyle ile cała Ziemia. Światło potrzebuje na przebycie drogi od jednego końca tego dysku do drugiego około 100 tysięcy lat. W tym dysku mieści się około 100 miliardów gwiazd.

Jeszcze sto lat temu uważano, że to jest cały Wszechświat. Okazało się, że tak wcale nie jest. Wszechświat jest znacznie, znacznie większy! Jeżeli te 6 tysięcy kilometrów znowu przeskalamy, tym razem do jednego centymetra, to cały wszechświat, który potrafimy zaobserwować w tej skali, jest kulą o średnicy 3 kilometrów. I w tym właśnie obszarze, jest około 100 miliardów galaktyk, takich jak nasza Droga Mleczna. A jeszcze bardziej intrygujące jest to, że cały czas Wszechświat się rozszerza - wszystkie obserwowane galaktyki nieustannie się od siebie oddalają, im dalej od nas, tym szybciej. Z zawrotną szybkością; te najbliższe kilka kilometrów na sekundę, te najdalsze z prędkościami porównywalnymi do prędkości światła. Dlatego między innymi nie możemy „zobaczyć” całości. I być może najbardziej intrygujące są ostatnie wyniki, badań, które pozwalają opisać cały nasz Wszechświat, jako ciągle rozszerzający się „balon”, którego „widziana” przez nas ludzi przestrzeń, to tylko fragment jego powłoki. Na obecną chwilę wydaje nam się, że to już może być cały Wszechświat. Ale czy rzeczywiście tak jest?

Geologia mówi nam, że Ziemia w przeszłości ucierpiała przynajmniej kilkukrotnie w wyniku zderzenia z dużym ciałem kosmicznym. Taką sytuację mieliśmy 250 milionów, a także 65 milionów lat temu, kiedy wyginęły dinozaury. Również w przyszłości grożą nam takie katastrofy. Za mniej więcej 3 miliardy lat nastąpi zderzenie naszej galaktyki z Galaktyką Andromedy. Być może to termin odległy, jeśli mierzyć w skali życia człowieka, ale dlaczego nie rozpocząć eksploracji Kosmosu już dzisiaj?

PO CO BADAĆ KOSMOS?

Loty kosmiczne są bardzo kosztowne. Ich realizacja wymaga ogromnych nakładów. Czy więc warto marnować tyle ludzkiej energii? Po co latać w kosmos, zwłaszcza że obecne „kosmiczne podskoki”, to zaledwie niewielki, prawie niezauważalny krok w stosunku do ogromu kosmicznych czasoprzestrzeni? Być może ta krótka wyliczanka pozwoli sceptykom na bardziej - może nie entuzjastyczne - ale na realistyczne spojrzenie.

1. System nawigacji - GPS. W obecnej formie świetnie spełnia swoje zadanie w służbie cywilnej, państwowej i wojskowej. Umożliwia bezpieczniejsze i tańsze połączenia lotnicze i morskie. System ten wymaga wielu satelitów, wymaga też dokładnego pozycjonowania tych satelitów.
2. System telewizji satelitarnej - bez niego konieczne byłyby sieci stacji i anten odbiorczo-nadawczych lub wielu linii kablowych.
3. System łączności satelitarnej - telefonii. Umożliwia dostęp do systemów łączności w najbardziej oddalonych punktach globu ziemskiego.
4. System satelitów meteorologicznych - bez nich prognozy pogody byłyby obciążone znacznie większymi błędami. Często narzekamy na obecne prognozy korzystające ze zdjęć satelitarnych. Jaka byłaby dokładność prognoz bez informacji z satelitów?
5. Obserwacje satelitarne powierzchni upraw, lasów i innych terenów - umożliwiają wykrywanie chorób i szkodników, prognozowanie plonów.
6. Obserwacje satelitarne kształtu Ziemi - bardzo potrzebne w geodezji, przy tworzeniu map.
7. Obserwacje satelitarne przemieszczania się huraganów i cyklonów - umożliwiają przewidywanie drogi ich przemieszczania się i rozwoju.
8. Obserwacje satelitarne zmiany powierzchni Ziemi i pod powierzchnią Ziemi - przewidywanie trzęsień Ziemi i fal tsunami.
9. Badania kosmiczne wiatru słonecznego - potrzebne do sprawnego funkcjonowania systemów energetycznych i telekomunikacyjnych.
10. Badanie promieniowania Słońca i roli atmosfery ziemskiej jako filtra - potrzebne do przewidywania promieniowania docierającego do powierzchni Ziemi i jego skutków.

I pewnie wiele innych pomniejszych zastosowań. Być może najważniejszym z nich - nie wspomnianym - jest po prostu zwyczajne stymulowanie i napędzanie kolejnych odkryć naukowych.

PIERWSI BADACZE

Konstantin Ciołkowski. Pierwsze realne propozycje podróży kosmicznych przypisywane są Konstantinowi Ciołkowskiemu. Jego najslawniejsze dzieło, „Eksploracja przestrzeni kosmicznej dzięki urządzeniom reakcyjnym”, została opublikowana w roku 1903. Przedstawił w nim m.in. szkic budowy rakiety na paliwo ciekłe oraz zastosowanie rakiety wielostopniowej do osiągnięcia minimalnej prędkości orbitalnej, którą oszacował wtedy na 8 km/s. Wielką zasługą Ciołkowskiego było podanie wzoru na zależność prędkości rakiety od podstawowych jej parametrów. Rozprawa nie była jednak szeroko znana poza Rosją.

Robert Goddard. Z technicznego punktu widzenia, loty kosmiczne stały się możliwe po publikacji Roberta Goddarda. Na początku XX wieku, Goddard zaczął badać możliwość zwiększenia wydajności rakiet przez zastosowanie ciekłego paliwa i utleniacza. Niezależnie od Ciołkowskiego opracował równania matematyczne pozwalające ustalić położenie i prędkość rakiety w pionowym locie, znając jej masę i masę paliwa oraz prędkość gazów wylotowych. Celem prac Goddarda był lot w kosmos, jednak naukowcy tego okresu nie traktowali tego typu rozważań za naukowe. W roku 1913 Goddard opatentował dwa znaczące wynalazki w historii raketnictwa: raketę wielostopniową i raketę, której paliwem jest benzyna i ciekły tlenek azotu.

Herman Oberth. Kolejny ważny naukowiec zaliczany do ojców astronautyki, to austriacko-niemiecki fizyk Hermann Oberth. Niezależnie od Goddarda zbudował działający model rakiety i wpadł na pomysł rakiety wielostopniowej. Podobnie jak Goddard, spotykał się z kpinami otoczenia, gdy mówił o podróży kosmicznej. W 1922 roku jego praca doktorska „Rakieta w przestrzeń międzyplanetarną” nie została przyjęta, gdyż uznano ją za utopijną.

Werner Von Braun. Postacią, o której świat usłyszy kiedyś, jako o twórcy rakiety księżycowej, jest Wernher von Braun. Ten niemiecki fizyk urodził się na terenie dzisiejszej Polski, w miejscowości Wirsitz (Wyrzysk) i podobnie jak ojcowie astronautyki od młodości interesował się raketami. Po zakończeniu I wojny światowej i przejściu jego rodzinnej miejscowości na teren Polski, przeprowadził się z rodziną do Berlina. Zainspirowany pracami Obertha rozpoczął naukę na Politechnice Berlińskiej. W latach 30-tych XX wieku, von Braun pracował w ośrodku badawczym Wehrmachtu o nazwie Kummersdorf. Rakiety były bowiem jednym z niewielu typów broni nie zabronionej przez Traktat Wersalski. Von Braun posłużył się planami Goddarda z różnych periodyków i zastosował je później w konstrukcji serii swoich rakiet Aggregat. O doniosłości jego prac niech świadczy fakt, że pełne opracowanie pracy doktorskiej z 1934 roku, pt. „Konstrukcja, teoretyczne i eksperymentalne rozwiązanie problemu rakiety na paliwo ciekłe” zostało utajnione przez wojsko i nie zostało opublikowane aż do roku 1960.

PODOBÓJ KOSMOSU

Pierwsza rakieta kosmiczna. Pierwszą rakieta która dotarła do granic przestrzeni kosmicznej była niemiecka rakieta V2 w czasie lotu testowego 3 października 1942. Jednak głównym przeznaczeniem pocisków V2, jak wiemy, był ostrzał miast Wielkiej Brytanii. Rakieta miała długość 14,26 m, masę około 13000 kg. Silnik raketowy dawał ciąg ponad 25000 kg i pozwalał uzyskać prędkość od 3000 do 5500 km/h oraz zasięg do 380 km. Rakieta miała udźwig około 1000 kg i celność 6400 m, potem zmniejszono ją do 1600 m. Łącznie odpalono 5500 tego typu rakiet.

Pierwszy satelita. Wernher von Braun oraz inni niemieccy naukowcy i konstruktorzy V2, wnieśli znaczący wkład zarówno do amerykańskich, jak i radzieckich programów balistycznych. Po zakończeniu wojny, wraz z dużą grupą członków zespołu, przechwycony został przez Amerykanów. Grupa ta stała się podstawą rozwoju pocisków balistycznych w USA. Związek Radziecki dla przechwyconych przez siebie niemieckich specjalistów programu V2 utworzył pierwotnie ośrodek naukowo-badawczy w Nordhausen, potem wywieziono ich w głąb ZSRR, gdzie mieli kontynuować swoje prace pod ścisłym nadzorem.

Co było głównym celem prac, rywalizujących ze sobą ośrodków badań nad zastosowaniem rakiet? Lot w kosmos i eksploracja „nowych światów”, czy też czysto wojskowe zastosowanie? Naukowcom być może bardziej chodziło o to pierwsze - pokojowe zastosowanie. Wojskowi i politycy myśleli zapewne o bardziej „praktycznych” korzyściach wynikających z możliwości przenoszenia dużych ładunków na duże odległości. Trudno rozstrzygać, jednak faktem pozostaje, że to Rosjanom, 4 października 1957 udało się wystrzelić obiekt, który stał się pierwszym sztucznym satelitą na orbicie Ziemi.

Sputnik 1 miał średnicę 58 centymetrów, ważył 83,6 kilograma. Cztery anteny wystawały z kulistego statku pod kątem 35 stopni. Miały długość od 2,4 do 2,9 metra. Statek pobierał 1 W mocy elektrycznej z 3 baterii srebrno-cynkowych. Korpus statku został wykonany ze stopu aluminium o grubości 2 mm. Do momentu splonięcia w atmosferze, Sputnik 1 zdążył okrążyć Ziemię 1400 razy, na wysokości 250 km, co oznacza, że przebył łącznie ok. 60 milionów kilometrów. Z przestrzeni kosmicznej satelita nadawał sygnał radiowy, trzy razy w ciągu sekundy. Sputnik I spalił się podczas wchodzenia w atmosferę ziemską 3 stycznia 1958 roku.

Sukces Rosjan przyspieszył prace amerykańskiego programu kosmicznego. Dwa miesiące później wystrzelili oni swoją sondę o nazwie Explorer 1.

Pierwszy człowiek w kosmosie. Kolejny ważny krok w kosmos, również pierwsi wykonali Rosjanie, wystrzelując w kosmos bezpańskiego psa z moskiewskiego schroniska o imieniu Łajka. Całe zdarzenie miało miejsce 3 listopada 1957. Niestety pies nie mógł wrócić z powrotem na Ziemię. Po pięciu dniach pobytu w Kosmosie Łajka zginęła na orbicie, głównie w wyniku stresu i przegrzania, co było spowodowane awarią systemów kontrolnych.

Wreszcie 12 kwietnia 1961 roku nastąpił przełomowy moment - pierwszy lot człowieka w kosmos. Pierwszym kosmonautą został Jurij Gagarin. Statek Wostok 1 wyrzucony został w przestrzeń przez rakieta wielostopniową. Po osiągnięciu pierwszej

prędkości kosmicznej i oddzieleniu się od rakiety nośnej, Wostok poszybował lotem bezwładnym po orbicie dookoła Ziemi. Statek okrążył Ziemię w 89,1 minuty. Najmniejsza odległość od Ziemi wynosiła 327 km. Masa statku Wostok wraz z człowiekiem bez ostatniego stopnia rakiety wynosiła 4725 kg. Dwukierunkową łączność między pilotem a Ziemią utrzymywano przez cały czas lotu. Statek Wostok wystartował z poligonu Bajkonur w Kazachstanie. W godzinę i osiem minut po starcie, w chwili gdy statek znajdował się nad Afryką, rozpoczęto przygotowania do lądowania. Włączono silnik hamujący i Wostok 1 zaczął schodzić z orbity satelitarnej. Po dziesięciu minutach wszedł w gęste warstwy atmosfery i po dwudziestominutowym locie poprzez atmosferę szczęśliwie wylądował.

Przez cały lot Gagarin nadzorował aparaturę statku, utrzymując nieprzerwanie łączność radiową i telegraficzną z Ziemią: przekazywał obserwacje, notował w dzienniku pokładowym oraz rejestrował na taśmie magnetycznej i filmowej. Przez cały lot aparatura pracowała według zadanego programu. Pilot prowadził pomiary elementów orbity, przekazując na Ziemię dane telemetryczne i telewizyjny obraz wnętrza statku. Automatyczne regulatory zapewniały w kabinie odpowiednią temperaturę i właściwy skład atmosfery. Wszystko poszło zgodnie z planem.

Wyczyn Gagarina, znowu z lekkim opóźnieniem powtórzyli Amerykanie, wystrzelując Alana Sheparda na pokładzie statku Mercury 3.

Pierwszy człowiek na Księżycu. Lądowaniu na Księżycu, ze względów prestiżowych i politycznych, towarzyszyło wiele emocji. W Rosji oraz USA prowadzono równoległe dwa programy: Luna i Apollo, które miały na celu postawić człowieka na powierzchni Księżycy. Pierwsze loty zdołały tylko zbliżyć się do powierzchni ziemskiego satelity. Kolejne z nich dostarczyły zdjęć i informacji o Księżycu. W 1966 roku Rosjanom udało się wylądować na Księżycu, jednak była to misja bezałogowa. Amerykanie w tym samym czasie wysyłali swoje sondy Pioneer, jednak kolejne próby kończyły się niepowodzeniami. Mimo porażek, to jednak oni, jako pierwsi stanęli na Księżycu. Stało się to 20 lipca 1969 roku. W misji Apollo 11 wzięli udział: Neil Armstrong, Edwin Aldrin oraz Michael Collins. Na pamiątkę tego wydarzenia na Księżycu pozostawiono flagę Stanów Zjednoczonych oraz tabliczkę zawierającą informacje o lądowaniu.

Start odbył się bez poważniejszych zakłóceń, 16 lipca 1969 roku. Trzy dni po starcie programu Apollo-11, rakieta nośna Saturn V wraz z lądownikiem księżycowym Eagle, wleciał na orbitę księżycy. 20 lipca Armstrong i Aldrin przeszli do statku wyprawowego i odłączyli go od rakiety, w którym dyżurował w oczekiwaniu na ich powrót trzeci astronauta Michael Collins. Zmniejszono prędkość lotu, co pozwoliło zbliżyć się na odległość 15 km nad powierzchnię globu. Podczas dalszego opadania zaczęły się kłopoty z komputerem, który nie radził sobie z napływającymi informacjami i zaczął alarmować o problemach. Podjęto dość ryzykowną decyzję o odłączeniu go i przejściu na ręczne sterowanie. Dość trudno było znaleźć dogodny miejsce do lądowania (księżycowy horyzont jest dużo niższy niż nasz ziemski), jednak w końcu udało się posadzić Orła na płaszczyźnie usypanej drobnymi kamieniami. Pierwszy z lądownika wyszedł Neil Armstrong. Załoga zebrała z powierzchni Księżycy próbki: kamienie, księżycowy piasek. Ich pobyt na powierzchni Srebrnego Globu trwał nieco ponad dwie godziny. Po powrocie do Orła astronauta zamknęli właz, napełnili kabinę tlenem i mogli zdjąć z siebie wierzchnią warstwę skafandrów. Po niespełna dobie pobytu astronautów na Księżycu, silnik modułu, bez najmniejszych zakłóceń, uniósł

kabinę załogi z powierzchni. Po prawie czterech godzinach dochodzenia Orła do statku macierzystego, oba pojazdy kosmiczne znalazły się w zasięgu wzroku, po czym wyrównano ich prędkości i przycumowano. 24 lipca 1969 roku lądownik Apolla 11 z drugą prędkością kosmiczną wszedł w atmosferę Ziemi, a następnie szczęśliwie wodował.

Stacja kosmiczna. Ponieważ w wyścigu do Księżyca Stany Zjednoczone zdecydowanie wyprzedziły ówczesny Związek Radziecki, dlatego naukowcy radzieccy zaczęli koncentrować się na budowie stacji orbitalnej. Zadaniem stacji miało być umożliwienie ludziom odbywania długotrwałych lotów kosmicznych po orbitach okołoziemskich. Pierwszymi eksperymentalnymi stacjami orbitalnymi były obiekty o nazwie Salut. Kosmonauci byli tam transportowani za pomocą statków kosmicznych Sojuz. W latach 1967 - 1981 w sumie odbyło się 40 lotów statków Sojuz. Na ich pokładzie zostało przetransportowanych 75 kosmonautów. Tu należy wspomnieć również pierwszego polskiego kosmonautę Mirosława Hermaszewskiego.

Również Amerykanie zbudowali swoją stację kosmiczną - Skylab. Lot tej stacji trwał od maja 1973 roku do lipca 1979 roku. Na pokładzie tej stacji trzykrotnie przebywały trzyosobowe załogi.

Międzynarodowa Stacja Kosmiczna powstała w wyniku połączenia projektów budowy rosyjskiej stacji Mir 2, amerykańskiej Freedom oraz europejskiej Columbus. Obecnie składa się z 16 głównych modułów i umożliwia przebywanie w niej 6 członków załogi. Pierwsze elementy zostały wyniesione na orbitę w 1988 roku, a pierwsza załoga w 2000 roku. Źródłem zasilania są baterie słoneczne, a transportem ludzi i materiałów zajmowały się amerykańskie wahadłowce (ponad 30 lotów) i rosyjskie rakiety (ponad 40 lotów). Po ukończeniu całej konstrukcji stacja będzie mieć 1160 m³ pomieszczeń hermetyzowanych, masę 419 ton oraz wymiary 108,4 m rozpiętości baterii słonecznych i 74 m długości.

W tym czasie rozpoczęły się programy o charakterze bardziej eksploracyjnym - loty wahadłowców, czyli załogowych statków kosmicznych, które mogły być wielokrotnie wykorzystywane. Umieszczano w przestrzeni kosmicznej m.in. sztuczne satelity i prowadzono badania naukowe przez zespoły naukowców. Start pierwszego wahadłowca „Columbia” miał miejsce w roku 1981. Następnie zostały wprowadzone do eksploatacji amerykańskie wahadłowce: Challenger, Discovery, Atlantis i Endeavour. Loty wahadłowców amerykańskich zakończyły się w 2011 roku.

Sondy kosmiczne. Loty sond kosmicznych wzbudzają dużo mniejsze zainteresowanie niż loty załogowe. W praktyce okazało się jednak, że działające poza Ziemią roboty badawcze dostarczają nauce dużo więcej informacji niż ludzie. Niektóre sondy kosmiczne spełniają swoje zadania krążąc na orbicie wokół Ziemi, jako jej sztuczne satelity. Oprócz celów naukowych służą one zastosowaniom komercyjnym. Mogą pomagać meteorologom w przewidywaniu pogody, służyć komunikacji, czy jako satelity geostacjonarne i transmitować programy telewizyjne. Jednak dla nauki najważniejsze okazały się sondy badające planety Układu Słonecznego i przestrzeń kosmiczną poza nim.

Sondy przeleciały obok wszystkich planet Układu Słonecznego. Wprowadzono statki kosmiczne na orbity wokół Wenus i Marsa, na obu tych planetach wylądowały sondy. Od 1976 roku dwie amerykańskie sondy z serii Viking przez wiele lat badały

i fotografowały planetę Mars. Analizy chemiczne gruntu nie wykryły żadnego śladu życia. Dzięki wystrzelonym w 1977 roku dwóm amerykańskim sondom z serii Voyager rozporządzamy licznymi zdjęciami i danymi naukowymi o czterech wielkich planetach: Jowiszu, Saturnie, Uranie i Neptunie oraz o ich pierścieniach i księżycach. W latach 1990 - 1994 amerykańska sonda Magellan, która krążyła po orbicie około wenusjańskiej, sporządziła za pomocą radaru mapy powierzchni tej planety. W lipcu 1997 sonda Pathfinder wylądowała na powierzchni Marsa, pobrała próbki ziemi i zrobiła setki zdjęć. W 2004 roku na Marsie wylądowało dwa roboty-łaziki, które przejechały wiele kilometrów zbierając próbki gruntu, wykonywały badania atmosfery i wykonywały liczne fotografie. W 2005 roku odłączony od sondy Cassini próbnik Huygens lądowała na Tytanie - jednym z księżyców Saturna.

Dla współczesnej astronomii przełomowe okazały się badania prowadzone przez sondy „spoglądające” ku odległym gwiazdom. Teleskop Hubble'a sfotografował szereg odległych supernowych, czym pomógł określić, jak szybko w swojej historii rozszerzał się Wszechświat. Sondy COBE i WMAP umożliwiły zbadanie niejednorodności promieniowania tła, które pochodzi sprzed 13,6 mld lat.

Sondy dotarły w pobliże komety Halleya, kilku planetoid i na wszystkie planety Układu Słonecznego. Najdalej zawędrowały sondy kosmiczne Pioneer 10, Pioneer 11, Voyager 1 i Voyager 2, które opuściły już Układ Słoneczny i pomknęły ku innym gwiazdom naszej galaktyki. Na ich pokładzie umieszczono informacje o Ziemi. Zakodowane przez naukowców przesłanie dotrze w pobliże najbliższych gwiazd za więcej niż 40 000 lat

Największy problem przy zastosowaniu sond kosmicznych w odległym kosmosie, to opóźnienie komunikacji. Jedynie na Księżycu roboty mogą być zdalnie sterowane przez ludzi. Marsjańskie łaziki w najgorszym przypadku muszą czekać aż pół godziny na reakcję operatora. Sondy, które wyleciały poza układ słoneczny muszą radzić sobie same. Sondy wyposażane są jednak w coraz szybsze komputery, które pozwalają im na samodzielne podejmowanie decyzji i prowadzenie badań.

CO NAS CZEKA W PRZYSZŁOŚCI?

Przez całą historię swojego istnienia, człowiek kolonizował Ziemię, próbując ją zasiedlić niemal w każdym środowisku. Kolejnym krokiem wydaje się więc opuszczenie jego powierzchni, kolonizacja Księżycy i innych planet. W zestawieniu jednak z komercyjnym zasiedleniem wnętrza Ziemi lub głębin oceanu, kosmos stanowi wyzwanie bezprecedensowe - ogromne koszty, ogromne odległości i czasokres wypraw kosmicznych oraz nieprzyjazne środowisko. Początkowe wyobrażenia o warunkach panujących na Marsie czy Wenus, które mogły wydawać się naukowcom podobne do ziemskich, zostały zweryfikowane przez kolejne badania i wyprawy kosmiczne. W dalekosiężnych planach przewiduje się, że do roku 2025 będzie możliwy lot statkiem kosmicznym poza orbitę Księżycy, po roku 2030 lot na orbitę Marsa i lądowanie na jego powierzchni. W porównaniu z wyzwaniami, jakie stawiać będzie na przykład opuszczenie układu słonecznego, te niewielkie „skoki” nie stanowią zbyt oszałamiającej perspektywy. Oczywiście wysyłanie kolejnych robotów, być może coraz bardziej

inteligentnych, dzięki nowoczesnym komputerom i sztucznej inteligencji będzie nadal trwać - i to jest chyba na razie jedyna realna perspektywa poznawania kosmosu.

Rozważania bardziej dalekosiężne mogą więc być tylko z gatunku science-fiction. Z dzisiejszej perspektywy rozważa się na ogół cztery możliwe warianty zdobycia przez ludzkość przestrzeni międzygwiazdnych. Najczęściej rozbudzającymi wyobraźnię, kontemplowanymi zarówno przez fizyków jak i fanów fantastyki naukowej, są sposoby pozwalające ominąć barierę, jaką na szybkie pokonywanie dalekich odległości stawia nieprzekraczalna prędkość światła. Niestety, większość idei w tej domenie wydaje się być niemożliwa do realizacji, lub w najlepszym przypadku nieosiągalna wedle współczesnego stanu wiedzy.

Inną znaną ideą, jest budowa wielopokoleniowych, ogromnych statków kosmicznych, które stawałyby się samowystarczalnymi światami, dla kilku zamieszkujących je pokoleń, z których w końcu jedno, po długiej podróży docierałoby, do odległego (choć w istocie bliskiego nam, w skali kosmicznej) układu planetarnego. Po osiągnięciu celu swej podróży gwiazdnej, potomkowie Ziemijskich pionierów, mogliby rozpocząć kolonizację nowego świata.

Nadzieja niektórych naukowców zwracana jest ku możliwości spowolnienia, lub wstrzymania procesów życiowych, czyli hibernacji, i przywrócenia ich po długiej międzygwiazdnej podróży. Największym problemem, wysuwającym się tu na pierwszy plan, są rozliczne uszkodzenia tkanek, które mogą powstawać podczas procesu zamrażania oraz przechowywania ciała.

Modyfikacja ciała człowieka i dostosowanie go, przynajmniej częściowe, do warunków panujących we Wszechświecie, może być trochę odmienną od poprzednich, koncepcją umożliwiającą rozwój podróży międzygwiazdnych. Zamiast szybkiego przemykania przez jego czeluści, zakłada ona „wrośnięcie” w jego środowisko. Eksploracja kosmosu stałaby się dzięki takiemu podejściu nie tylko łatwiejsza, ale również bardziej sensowna. Dostosowanie się do warunków panujących na innych planetach – nie tylko dzięki dodatkom technologicznym, ale także, być może inżynierii genetycznej i innym zdobyciom biotechnologii – sprawiłoby, że znacznie więcej obcych światów, stałoby się potencjalnym, nowym, atrakcyjnym domem dla ludzkości.

Bibliografia do rozdziału

Middlebrook M., *Nalot na Peenemünde*; Wydawnictwo MON, Warszawa 1981

Heppenheimer T.A., *Podbój kosmosu. Tajne epizody amerykańskich i radzieckich programów kosmicznych*, Amber, Warszawa 1997

Jacyna-Onyszkiewicz Z., *Wszechświat na miarę człowieka*, Zakład Fizyki Kwantowej UAM, Poznań 2002

Wołoszański B., *Tajna wojna Hitlera*

http://kosmiczne.lav.pl/Przed_programem_Mercury.html#Ciolkowski_Oberth_i_Goddard

http://pl.wikipedia.org/wiki/Hermann_Oberth

http://pl.wikipedia.org/wiki/Konstantin_Cio%82kowski

http://pl.wikipedia.org/wiki/Mi%C4%99dzynarodowa_Stacja_Kosmiczna

<http://pl.wikipedia.org/wiki/NASA>

http://pl.wikipedia.org/wiki/Operacja_Paperclip

http://pl.wikipedia.org/wiki/Przestrze%C5%84_kosmiczna

http://pl.wikipedia.org/wiki/Sonda_kosmiczna

http://pl.wikipedia.org/wiki/Sputnik_1

[http://pl.wikipedia.org/wiki/V2_\(pocisk_rakietowy\)](http://pl.wikipedia.org/wiki/V2_(pocisk_rakietowy))

http://pl.wikipedia.org/wiki/Wahad%C5%82owiec_kosmiczny

<http://www.eioba.pl/a/1k84/loty-kosmiczne>

<http://www.hq.nasa.gov/office/pao/History/sputnik/siddiqi.html>

<http://www.naukowy.pl/przyszlosc-podboju-kosmosu-ludzie-roboty-czy-cyborgi-vt43486.htm>:

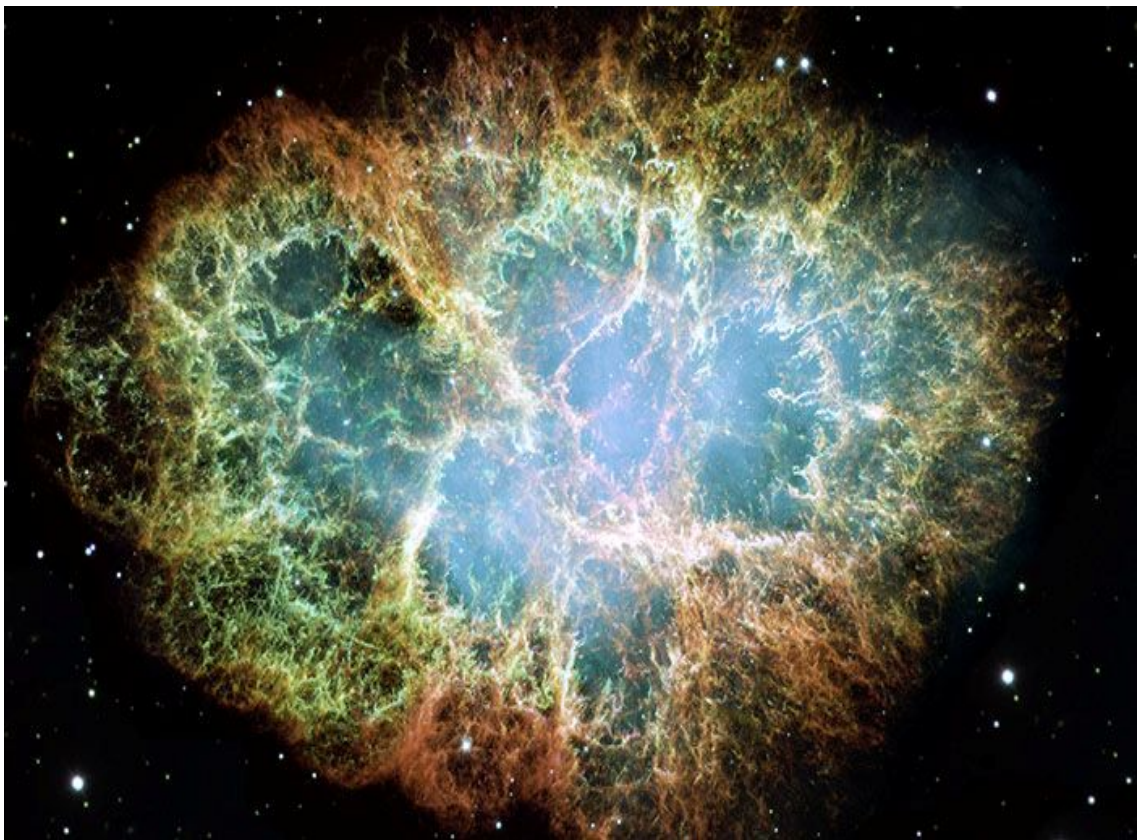
Juranek J., *Przyszłość podboju kosmosu: ludzie, roboty czy cyborgi?*

http://www.sciaga.pl/tekst/24282-25-historia_lotow_kosmicznych

<http://www.sondykosmiczne.republika.pl/index.html>

FIZYKA I TECHNIKA LOTÓW KOSMICZNYCH

FIZYKA LOTÓW KOSMICZNYCH
TECHNIKA LOTÓW KOSMICZNYCH
NAPĘD PRZYSZŁOŚCI



Mgławica Kraba, pozostałość po wybuchu supernowej. Teleskop Hubble'a (NASA)

FIZYKA I TECHNIKA LOTÓW KOSMICZNYCH

FIZYKA LOTÓW KOSMICZNYCH

Ruch pojazdu w przestrzeni kosmicznej - zarówno bez zastosowania napędu jak i z nim - jest przedmiotem badań astrodynamiki. Typowy lot kosmiczny zaczyna się od odpalenia rakiety nośnej, która dostarcza wstępnego ciągu do pokonania siły ciężkości i odrywa pojazd kosmiczny od powierzchni Ziemi. Statki kosmiczne mogą pozostać w przestrzeni kosmicznej na zawsze, niektóre spalają się w czasie ponownego wejścia w atmosferę, a inne docierają na powierzchnie planetarne lub księżycowe poprzez lądowanie lub zderzenie.

Fizyka jest przyczyną wszelkich trudności związanych z lotami kosmicznymi, ale również fizyka podsuwa pomysły na ich rozwiązanie. Pierwszą trudnością jest grawitacja. Siła, która utrzymuje nas na Ziemi, sprawia że oderwanie się od niej jest zadaniem trudnym. Jeżeli będziemy strzelać z armaty, to pociski będą lądować coraz dalej, a przy pewnej szybkości ciało okrąży Ziemię i wróci w to samo miejsce. Minimalna prędkość, przy której nastąpi taki powrót do miejsca wystrzelenia (lot orbitalny), to tzw. pierwsza prędkość kosmiczna. Można ją wyznaczyć zauważając, że podczas ruchu orbitalnego po orbicie kołowej siła grawitacji jest równa sile dośrodkowej.

$$v = \sqrt{G \frac{M}{R}}$$

gdzie: G - stała grawitacji, M - masa Ziemi, R - promień Ziemi.

Jaka to szybkość? Okazuje się, że bardzo duża - 7,9 km/s, to znaczy, że rakieta musi w ciągu jednej sekundy pokonać prawie 8 kilometrów! Dla porównania samochód przy prędkości 180 km/h, w ciągu sekundy przejeżdża 50 metrów, a samolot wojskowy przelatuje nieco ponad kilometr. Widać więc, że w przypadku lotów kosmicznych muszą być zastosowane zupełnie inne technologie. Żeby oddalić się od Ziemi (lot międzyplanetarny) trzeba osiągnąć prędkość 11,2 km/s - druga prędkość kosmiczna. Na opuszczenie układu słonecznego potrzeba już 17,7 km/s, a opuszczenie naszej galaktyki wiąże się z osiągnięciem szybkości 130 km/s.

Jakiego napędu trzeba użyć, aby osiągać takie prędkości? Obecnie używa się wyłącznie silników raketowych, czyli takich, w których wszystkie potrzebne substancje do wytworzenia siły ciągu rakiety są przenoszone wraz z nią. Jest to konieczne, ponieważ po opuszczeniu dolnych warstw atmosfery, w jej górnej części, a tym bardziej w dalszej części kosmosu nie ma skąd pobierać tlenu do spalania paliwa. Silniki raketowe działają na zasadzie zjawiska odrzutu. Gazy spalane w silniku wyrzucane są do tyłu, a rakieta nabywa pęd do przodu, zgodnie z zasadą zachowania pędu. Doprowadzone do komory spalania substancje łączą się chemicznie, a po spaleniu się, wytworzone gazy spalinowe przepływają przez dyszę z prędkością ponad kilku tysięcy metrów na sekundę. Siła reakcji (siła ciągu - wynikająca z trzeciej zasady dynamiki) powoduje ruch rakiety w stronę przeciwną do kierunku wypływających gazów.

Siła ciągu rakiety zależy od masy wyrzucanych gazów w ciągu jednej sekundy i ich prędkości. Podstawowy wzór stosowany w technice raketowej, określający prędkość rakiety zużywającej podczas lotu paliwo, czyli rakiety zmieniającej masę został wyprowadzony z zasad dynamiki Newtona przez Konstantina Ciołkowskiego. W warunkach próżni i braku siły ciężenia wzór przybiera postać:

$$v = w \ln \frac{m_0}{m}$$

gdzie v – prędkość końcowa rakiety, w – prędkość strumienia czynnika roboczego (gazów wylotowych), m_0 – masa początkowa rakiety z paliwem, m – masa końcowa rakiety bez paliwa.

Innymi słowy: dla uzyskania jak największej sprawności silnika raketowego należy dążyć zarówno do zwiększenia stosunku masy paliwa do masy rakiety, jak i do zwiększenia prędkości wypływu gazów z dyszy. Masa spalonego w jednej sekundzie paliwa wynosi we współczesnych raketach setki kilogramów. Przyspieszenie chwilowe rakiety zależy od jej chwilowej masy, a ta maleje na skutek spalania paliwa. Widać więc, że przyspieszenie rakiety rośnie w miarę ubytku paliwa i we współczesnych raketach osiąga wartość kilkakrotnie większą od przyspieszenia ziemskiego.

TECHNIKA LOTÓW KOSMICZNYCH

Jak wygląda lot rakiety z technicznego punktu widzenia? Należałoby go podzielić na kilka etapów: start i przelot przez atmosferę do umownej granicy, lot po orbicie okołoziemskiej i wszelkie manewry na tej orbicie, przelot do innego obiektu kosmicznego i „zaokrętownie” na jego orbicie, wreszcie lądowanie na innej planecie. Czy jest to zadanie nieskomplikowane? Prześledźmy więc kolejne etapy, aby nabrać wyobrażenia o skali problemów.

Współczesne rakiety kosmiczne startują pionowo, a ich lot w pierwszej fazie odbywa się po trajektorii zbliżonej do pionu, gdyż bardziej opłaca się jak najszybciej opuścić gęste warstwy ziemskiej atmosfery, które powodują duże straty spowodowane tarcieniem. W rzeczywistych warunkach, gdy rakieta przekracza prędkość dźwięku występuje też maksymalny opór aerodynamiczny, po ustąpieniu którego, przy prędkości naddźwiękowej, korygowana jest trajektoria wlotu na coraz bardziej horyzontalną.

Uzyskanie ogromnej prędkości możliwe jest dzięki silnikowi raketowemu. Okazuje się jednak, że to nie wystarcza. Konieczne jest zastosowanie rakiet wielostopniowych, to znaczy takich, w których poszczególne stopnie, po zużyciu są odłączane od głównej części rakiety. Po zużyciu paliwa w pierwszym członie zostaje on odczepiany, masa rakiety jest wtedy mniejsza i dalsze stopnie uzyskują większe przyspieszenia. W przypadku sond badawczych, nie powracających na Ziemię, ostatni stopień rakiety jest odpalany na ziemskiej orbicie i nadaje sondzie taką prędkość, by mogła pomknąć ku innej planecie, planetoidzie lub komecie. Sonda leci wtedy siłą bezwładności. Ma jedynie niewielki zapas paliwa, do korygowania kierunku lotu oraz wejścia na orbitę planety lub wylądowanie.

W całej dotychczasowej historii podboju kosmosu, żaden pojazd nie wszedł na orbitę ziemską bez użycia napędu wielostopniowego. Stąd właśnie wynika potrzeba użycia ogromnej ilości paliwa, które stanowi niemal całą masę pojazdów kosmicznych. Na przykład masa paliwa w rakiecie Ariane stanowi 97,5%, w amerykańskich raketach Tytan i Saturn około 96%, w promach kosmicznych 93,5% masy całej rakiety. Dla porównania ten wskaźnik dla samolotów pasażerskich wynosi ok. 50%, a dla samochodów jest rzędu kilku procent. Duża prędkość rakiet i ogromne przeciążenia powodują również konieczność zastosowanie w konstrukcji pojazdów kosmicznych materiałów, które wytrzymają bardzo wysokie temperatury powstające z powodu tarcia atmosferycznego i ogromne naprężenia materiałowe.

Ale grawitacja, to nie tylko trudność w oderwaniu się od powierzchni Ziemi i problem z wejściem na orbitę. Jest z nią związane kolejne ważne zagadnienie, jakim jest astronawigacja. W przestrzeni kosmicznej statek porusza się praktycznie cały czas bez udziału silników. Nie ma tarcia, które trzeba pokonywać, więc raz rozpędzony statek kosmiczny porusza się po trajektorii wyznaczonej przez siły grawitacji. Poza tym należy pamiętać o tym, że statek kosmiczny ma ograniczoną ilość paliwa i silniki uruchamiane są jedynie podczas wykonywania manewrów koniecznych do wejścia na inną orbitę, lądowanie, ponowny start, itp.

Z tego powodu wszystkie manewry muszą być wykonywane w taki sposób, aby zużycie paliwa było jak najmniejsze, dając jednocześnie jak największy efekt. Jediną alternatywą jest skorzystanie z siły grawitacji mijanych obiektów kosmicznych. Przelatując tuż obok planety lub jej księżycy sonda jest chwyтана w jej pole grawitacyjne, zatacza wokół niej łuk i jest „wyrzucana” z większą prędkością. Programy komputerowe potrafią wyszukać taką trasę lotu, aby łączyła punkty, gdzie równoważą się siły oddziaływania ciał grawitacyjnych, gdyż mamy wtedy minimalne zużycie paliwa. Tor lotu sondy zwykle przypomina spiralę, która zatacza kręgi wokół Słońca, zbliżając się do planet, zanim skieruje się w kierunku ostatecznego celu lotu.

Wyobraźmy sobie następującą sytuację: statek kosmiczny krąży wokół Ziemi, a pilot chce wejść na orbitę wyższą. Jakie manewry musi wykonać? Reguła brzmi dość prosto: „aby zwiększyć odległość apogeum, odpal silnik zgodnie z wektorem prędkości w perygeum oraz aby zwiększyć odległość perygeum, odpal silnik zgodnie z wektorem prędkości w apogeum”. Perygeum, to punkt orbity leżący najbliżej Ziemi, apogeum - najdalej. Jak taki manewr wygląda w praktyce? Statek musi być ustawiony dokładnie przodem do kierunku lotu i znajdować się możliwie jak najbliżej Ziemi. Wtedy wykonać należy pierwsze odpalenie silników. Po takim manewrze nasza orbita nie będzie kołowa tylko eliptyczna. Konieczne jest zatem drugie odpalenie silników. Tym razem nie jest obojętne, gdzie ono nastąpi, ale miejscem, w którym wykonywany jest taki manewr musi być dokładnie apogeum, a statek musi być ustawiony zgodnie z kierunkiem ruchu. I dopiero wtedy osiągniemy wyższą orbitę kołową. Jest to tak naprawdę jeden z prostszych manewrów orbitalnych, a samo zagadnienie ma duże znaczenie praktyczne. Chcąc doprowadzić na przykład do spotkania dwóch obiektów np. statku i stacji kosmicznej trzeba najpierw wyrównać ich orbity tak, by znalazły się one w tym samym miejscu i czasie poprzez właśnie takie, jak przed chwilą opisane manewry.

A co ze stabilizacją samej rakiety? Przecież każde uruchomienie silników powoduje obrót. Co więcej, jakiegokolwiek przesunięcie cięższego obiektu będzie powodowało obrót - na przykład wyjście astronauty na zewnątrz pojazdu kosmicznego.

Dodajmy, że będą to obroty w przestrzeni trójwymiarowej. Każda taka utrata stabilności musi być zrównoważona uruchomieniem specjalnych silniczków raketowych, a specjalne programy komputerowe muszą wcześniej obliczyć, jak ustawić silnik, przez jak długi czas ma działać i z jaką siłą ciągu, aby zredukować ilość spalanego paliwa i szybko ustabilizować pojazd w trzech osiach. Opis przesunięcia ciężkich przedmiotów w rakiecie dotyczył niekontrolowanej utraty stabilności, ale w podobny sposób rozwiązuje się problemy z obrotami zamierzonymi i stabilizacją rakiety po wykonaniu obrotu.

Manewry w przestrzeni kosmicznej stają się jeszcze bardziej skomplikowane, gdy chcemy odbyć lot międzyplanetarny. Wymagania są podobne, jak przy manewrach orbitalnych. Na inną planetę musimy dolecieć przy jak najmniejszym zużyciu paliwa, więc wykluczony jest jakikolwiek rodzaj lotu z ciągle włączonym silnikiem. Jednym z najprostszych i najbardziej ekonomicznych jest lot po części elipsy łączącej obydwie orbity. Chcąc odbyć lot np. na Marsa musimy osiągnąć odpowiednią wokółziemską orbitę i na niej odpowiednio ustawić statek względem kierunku ruchu. Następnie przez odpalenie silników (w odpowiednim miejscu i przez odpowiedni czas) przejść na orbitę transferową, która w dalszej części zbliży nas do orbity Marsa. Samą trajektorię komplikuje fakt, że orbity nie są okręgami, ale elipsami. Do tego nie są dokładnie współpłaszczyznowe. Wprawdzie płaszczyzny orbit planetarnych są do siebie zbliżone, ale nie pokrywają się dokładnie.

Jeszcze jednym utrudnieniem jest konieczność lotu w tzw. oknie startowym. Pojęcie to jest związane z faktem, że Mars (i praktycznie każdy inny cel podróży kosmicznej) nie czeka posłusznie na przybycie naszego statku, ale porusza się po swojej orbicie. Oznacza to, że możemy dolecieć na orbitę Marsa i nie zastać tam tej planety, która może być choćby i po drugiej stronie Słońca. Zatem lecąc na Marsa musimy wybrać taki czas, aby spotkać tą planetę i móc zacząć wykonywać manewr lądowania. To właśnie nazywane jest oknem startowym, które dla naszego przykładowego Marsa zdarza się co około 20 miesięcy.

Zupełnie osobnym zjawiskiem związanym z astronawigacją jest wspomniana już wcześniej asysta grawitacyjna (nazywana też procą grawitacyjną). Polega ona na tym, że statek przelatując w pobliżu jakiejś planety może zmienić tor oraz szybkość swojego lotu. Największy efekt uzyskamy po wykonaniu asysty grawitacyjnej (czyli np. największą zmianę prędkości) wykorzystując ciężką planetą o dużej prędkości ruchu. Na pierwszym miejscu takiej klasyfikacji jest oczywiście Jowisz, na drugim Saturn. Trzecia co ciekawe, jest Ziemia. Nasza planeta jest dużo mniejsza od Urana, czy Neptuna, ale będąc na bliższej Słońcu orbicie porusza się o wiele szybciej. Efekt asysty grawitacyjnej po raz pierwszy był wykorzystany podczas misji sondy Mariner 10, która lecąc na Merkurego wykorzystwała pole grawitacyjne Wenus. Asystę wykorzystywały też sondy badające planety zewnętrzne układu: Voyager i Cassini. Asysta grawitacyjna daje tym większy efekt im odległość planety od sondy będzie mniejsza. Jednak na tych niewielkich odległościach istotną staje się atmosfera, która taką sondę będzie hamowała. Przeloty na większych odległościach nie przeszkadzają jednak temu, aby asysta grawitacyjna była bardzo efektywną metodą poruszania się w Układzie Słonecznym.

NAPĘD PRZYSZŁOŚCI

Silnik raketowy, niewielki, sprawny, ekologiczny, czerpiący zapasy z nieograniczonego zbiornika, oto cel podstawowy, przed którym stoją konstruktorzy. Bez takich silników podróże kosmiczne stają się jedynie marzeniami. Jaki jest stan badań na dzisiaj i w jakim kierunku będą podążać w najbliższej przyszłości?

Silnik nuklearny. Nad silnikiem nuklearnym NASA pracowała już w latach pięćdziesiątych i sześćdziesiątych, ale zrezygnowano z niego z powodów politycznych i finansowych. Obecnie głównymi przeciwnikami tego sposobu napędzania rakiet są organizacje ekologów. Prowadzone są natomiast prace w programie Prometeusz. Przy użyciu współczesnej technologii, przy użyciu typowych silników raketowych, podróż na Marsa trwałaby sześć miesięcy w jedną stronę. Z nowym napędem podróż w obie strony zajmie tylko sześć tygodni! Nuklearne reaktory wytwarzające energię elektryczną byłyby wygodniejsze i bardziej niezawodne od baterii słonecznych, a wręcz niezastąpione w dużej odległości od Słońca.

Silnik plazmowy. Silnik plazmowy jest cichy, ekologiczny i bardzo wydajny. Niewielki zapas paliwa wystarcza, by silnik działał nawet i kilkadziesiąt lat. W tym czasie, choć powoli, może rozpędzić sondę do prędkości bliskich prędkości światła. Pozwoli to sondzie przemierzać odległości mierzone w latach świetlnych. Najbliższe gwiazdy, odległe o 4 lata świetlne, znajdowały by się więc w zasięgu człowieka. Pierwszą sondą napędzaną silnikiem jonowym, była Deep Space 1, wystrzelona 24 października 1998 roku. Atomy ksenonu poddawane są w niej jonizacji, a następnie przyspieszane w polu elektrycznym i osiągają prędkość 35 kilometrów na sekundę.

Radioizotopowy generator termoelektryczny. Radioizotopowy generator termoelektryczny, jest to generator prądu elektrycznego, w którym źródłem energii jest rozpad izotopu promieniotwórczego, a wydzielone w ten sposób ciepło zamieniane jest na energię elektryczną. Baterie tego typu są używane głównie jako źródła zasilania w satelitach. Podstawowym elementem generatora jest termopara, która jest źródłem prądu elektrycznego. Rozpad radioaktywny uwalnia energię, która w wyniku zderzeń zmienia się w energię termiczną ogrzewającą jeden koniec termopary. Różnica temperatur między złączami wywołuje siłę elektromotoryczną i przepływ prądu. Stany Zjednoczone użyły po raz pierwszy tego źródła w satelicie nawigacyjnym Transit 4A, w 1961 roku. RTG są używane przede wszystkim na statkach kosmicznych, szczególnie tych, które podróżują na tyle daleko od Słońca, że baterie słoneczne nie spełniają swego zadania, m.in. w sondach Pioneer 10, Pioneer 11, Voyager 1, Voyager 2, Galileo, Ulysses, Cassini-Huygens, New Horizons, Viking i misjach Program Apollo 12-17.

Silnik Stirlinga. Silnik Stirlinga, to silnik cieplny, który przetwarza energię cieplną w energię mechaniczną, jednak bez procesu wewnętrznego spalania paliwa, a w skutek dostarczania ciepła z zewnątrz, dzięki czemu możliwe jest zasilanie go ciepłem z dowolnego źródła. Źródłem ciepła może być w szczególności energia pochodząca z rozpadu promieniotwórczego. Ponieważ rozszerzanie gazu w wysokiej temperaturze daje więcej energii, niż wymaga sprężenie gazu w niskiej temperaturze, silnik wykorzystuje tę różnicę i zamienia energię cieplną na mechaniczną. W roku 2008 firma Lockheed Martin przetestowała napęd składający się z dwóch silników Stirlinga. Taki silnik ma niecały metr długości. Ma on masę dwa razy mniejszą od radioizotopowego generatora termoelektrycznego i zużywa cztery razy mniej paliwa.

Układ ma posłużyć do zasilania sond kosmicznych dalekiego zasięgu. Pierwsze wykorzystanie silnika Stirlinga nastąpi najprawdopodobniej w latach 2012 -2013.

Wiatr słoneczny. Sonda powinna rozwinąć na orbicie gigantyczny żagiel, zbudowany z superlekkiego materiału, który będzie łapał powiewy wiatru słonecznego, czyli naładowanych cząsteczek (elektronów i protonów) wyrzucanych ze Słońca. Wiatr słoneczny będzie odpychał sondę od Słońca, kierując ją w odległe rejony Układu Słonecznego. Po opuszczeniu naszego układu słonecznego, sonda będzie musiała oczywiście ustawić tak swój żagiel, by złapać wiatr innych gwiazd i pomknąć dalej. Inna wersja tego pomysłu mówi, że żagle sondy będą popychane przez wiązki potężnych laserów, umieszczonych na ziemskiej orbicie. Niezwykle słaby wiatr słoneczny nie zdoła jednak popchnąć zbyt ciężkich sond. W tej chwili realizuje się konstrukcje miniaturowych sond, małych, lekkich, ale bardzo tanich, które badać będą Układ Słoneczny.

Plazma. W 2004 roku opracowano projekt silnika opartego na pomysłach wiązki namagnetyzowanej plazmy. Napędzanie statku polega na wysłaniu w przestrzeń stacji kosmicznej, której zadaniem będzie generowanie wąskiej wiązki jonów i „strzelanie” nią w magnetyczny żagiel kosmicznej sondy. Projekt ten przewiduje, że średniej wielkości stacja będzie w stanie wyprodukować wiązkę, która rozpędzi statek do drugiej prędkości kosmicznej. Żeby statek z żaglem magnetycznym mógł wrócić z powrotem na Ziemię należało będzie rozmieścić w różnych miejscach Układu Słonecznego stacje produkujące magnetyczne wiązki.

Lewitacja. Lewitacja magnetyczna, to jeden z najskuteczniejszych sposobów na pokonanie siły tarcia powierzchniowego, która uniemożliwia pojazdom naziemnym osiągnięcie dużych prędkości. Dziś wykorzystuje się ją przede wszystkim w superszybkich pociągach. Dzięki działaniu potężnych elektromagnesów, ważące setki ton składy unoszą się podczas jazdy w powietrze i przemieszczają tuż nad powierzchnią. Specjaliści z NASA chcą wykorzystać oddziaływanie magnetyczne do wynoszenia na orbitę pojazdów kosmicznych. Ostatnie próby pokazały, że dzięki lewitacji magnetycznej możliwe jest nadanie rakiecie ogromnego przyspieszenia w bardzo krótkim czasie.

Silnik fotonowy. Silnik fotonowy wykorzystuje wielokrotne odbicie fotonów pomiędzy układem lusterek. Pierwszy działający silnik fotonowy skonstruowano w 2007 roku. Zanim urządzenie posłuży do napędzania rakiet, planuje się wykorzystać je do produkcji małych silników manewrowych, zdolnych do utrzymania pozycji satelitów w kosmosie z precyzją 100000 razy większą od możliwej do uzyskania obecnie.

Anihilacja. Prędkość pojazdu kosmicznego zbliżona do prędkości światła będzie mogła być osiągnięta za pomocą energii uzyskanej przy anihilacji materii i antymaterii. Gdy elektron anihiluje z pozytonem, energia wyzwała się w postaci dwóch kwantów gamma, które rozbiegają się w przeciwne strony, tak więc nie można ich wykorzystać do nadania siły nośnej. Anihilacja protonów i antyprotonów prowadzi do powstania krótkożyjących cząstek o wielkiej energii zwanych pionami. Cząstek tych można użyć do rozgrzania wolframowego rdzenia, wokół którego przepływałby wodór. Gorący wodór wypływałby pod dużym ciśnieniem z dyszy, dając ciąg silnikowi rakiety. Trzeba jednak umieć wyprodukować duże ilości antycząstek i umieć ją magazynować, co dziś jest poza naszymi możliwościami.

Zakrzywienie czasoprzestrzeni. Innym pomysłem na rozwiązanie problemu odległości jest zakrzywienie przestrzeni. Według niektórych fizyków możliwe jest podróżowanie „na skróty”. Wychodzą oni z założenia, że jeśli nie można pokonać czasu podróży, należy zmienić odległość dzielącą Ziemię od innych obiektów kosmicznych. Do tego celu wykorzystano by zjawisko zakrzywienia czasoprzestrzeni. Powstałby rodzaj „tunelu” łączącego nas z np. drugim krańcem galaktyki. Czy można tak ukształtować przestrzeń, aby rozszerzała się za statkiem, a kurczyła przed nim? Część fizyków sądzi, że tak. Dzięki takiemu napędowi można by szybciej niż światło przemierzać bezmiar kosmosu. Jednak, żeby było to możliwe potrzebne jest olbrzymie pole grawitacyjne, którego oczywiście, na razie nie jesteśmy w stanie wyprodukować.

Bibliografia do rozdziału

Breiter S., Astrodynamika, Obserwatorium Astronomiczne UAM w Poznaniu, 2007-2009

Pawlikowski R., Staniewski E., 15 lat podboju kosmosu, MON 1974

Wołczek O., Loty międzyplanetarne, PWN, 1980

Wołczek O., W kręgu astronautyki, Nasza Księgarnia, Warszawa 1980

<http://ostrokrzew.blogspot.com/2012/04/fizyka-lotow-kosmicznych-cz1-13042011.html>

http://pl.wikipedia.org/wiki/Lot_kosmiczny

http://pl.wikipedia.org/wiki/Lot_orbitalny

http://pl.wikipedia.org/wiki/Lot_suborbitalny

http://pl.wikipedia.org/wiki/Wz%C3%B3r_Cio%C5%82kowskiego

http://www.fizyka.net.pl/index.html?menu_file=astronomia%2Fm_astronomia.html&former_url=http%3A%2F%2Fwww.fizyka.net.pl%2Fastronomia%2Fastronomia_w2.html

http://pl.wikipedia.org/wiki/Saturn_V

RUCH CIAŁ W POLU GRAWITACYJNYM

PITAGOREJSKA IDEA POZNANIA ŚWIATA
PRAWO POWSZECHNEGO CIĄŻENIA
GRAWITACJA W OGÓLNEJ TEORII WZGLĘDNOŚCI



Mgławica spiralna M51. Teleskop Hubble'a (NASA)

RUCH CIAŁ W POLU GRAWITACYJNYM

PITAGOREJSKA IDEA POZNANIA ŚWIATA

Newton dokonał swoich odkryć w XVII wieku, ale wydaje się, że sama idea mogła narodzić się 2000 lat wcześniej. Idea, którą można streścić w następujący sposób: „świat można wyjaśnić”, rządzi nim prawa, które można sformułować w języku liczb, figur i zależności między nimi. Kto dał jej początek - tego prawdopodobnie nie dowiemy się nigdy, ale być może rozpoczęło się od zaobserwowania prostego faktu, że puszczane przedmioty spadają. Starożytni jednak w żaden sposób nie kojarzyli opadania ciał na Ziemi z ruchami planet w niebiosach. Zachowanie ciał niebieskich opisywał model geocentryczny, który nie pozwalał na dostrzeżenie jakichkolwiek analogii pomiędzy ruchem spadającego ciała, a ich torami. Istniało powszechne przekonanie, że ziemia i niebo rządzą się całkowicie odmiennymi prawami.

Pierwszego wyłomu dokonał w roku 1515 Kopernik, proponując heliocentryczny model Układu Słonecznego. Słońce znajdowało się w środku, a planety poruszały się po kołowych orbitach. W roku 1584 Giordano Bruno zaproponował zasadę, według której zarówno Ziemią jak i niebem rządzą te same powszechne prawa. W roku 1604 Galileusz podważył wywodzące się ze starożytności idee dotyczące spadania ciał. Jego zdaniem pozorne różnice między ciężeniem działającym na różne obiekty są skutkiem zjawisk takich jak opór, albo wypieranie.

W latach 1609-18 niemiecki astronom Jan Kepler sformułował prawa dotyczące ruchu orbitalnego. Zgodnie z nimi planety kreślą w przestrzeni wielkie elipsy. Sformułował też prawo wiążące średni promień orbity z okresem obiegu. Kepler w trakcie studiów teologii protestanckiej w Tybindze zapoznał się szczegółowo z teorią heliocentryczną Kopernika i odtąd stał się jej gorącym propagatorem. To, że udało mu się odkryć trajektorie planet, inne niż proponowane przez wszystkie dotychczasowe systemy kosmologiczne, zawdzięczał współpracy z Tychonem Brahe.

Tychon Brahe przez wiele lat regularnie rejestrował położenia planet w ich ruchu po niebie, w szczególności dokonał wielkiej liczby dokładnych pomiarów położenia Marsa. Wysoką ich dokładność osiągnął wyznaczając przestrzenne położenie punktów orbity Marsa na podstawie znajomości średnicy orbity Ziemi oraz kąta widzenia tych samych punktów orbity Marsa w odstępach roku marsjańskiego. Szczęśliwym zbiegiem okoliczności dla skuteczności tej metody było to, że orbita Ziemi jest niemal dokładnie okręgiem, a orbita Marsa jest elipsą o stosunkowo dużym mimośrodzie.

Po śmierci Tychona Brahe w 1601 roku, bogate wyniki jego pomiarów na mocy testamentu stały się własnością Keplera. Dysponując nimi mógł Kepler graficznie wyznaczyć orbitę Marsa względem różnych punktów orbity ziemskiej. Po wieloletnich wytrwałych obliczeniach doszedł do wniosku, że najwłaściwszą krzywą jest elipsa. Głębsza analiza umożliwiła mu precyzyjne określenie zmiennej prędkości orbitalnej planety w jej ruchu po elipsie. Rezultaty tych prac opublikował w roku 1609 w dziele „Astronomia Nova”. Obserwacje księżyców Jowisza, odkrytych w 1610 przez

Galileusza, potwierdziły trafność pierwszych dwóch praw Keplera o ruchu planet. Ułatwiły też Keplerowi, po kilku kolejnych latach, sformułowanie III prawa opublikowanego w roku 1619 w „*Harmonices Mundi*”. Wnioski z obserwacji ruchów Marsa potwierdzono wkrótce także dla orbit innych planet.

W rzeczywistości Kepler sformułował cztery prawa opisujące parametry orbit planet, jednak według współczesnej metodologii naukowej tzw. czwarte prawo nie jest uznawane jako prawo natury, a jedynie jako przypadkowa, ale ciekawa zbieżność. Zostało ono odkryte najwcześniej ze wszystkich jego praw i opublikowane w roku 1596 książce „*Mysterium Cosmographicum*”. Tak zwane „czwarte prawo” wiąże ze sobą promienie orbit planet. Kepler odkrył tę zależność wpisując i opisując na poszczególnych wielościanach foremnych sfery o promieniach odpowiednio dobranych planet.

Odkrycie Keplera, że zarówno planety w Układzie Słonecznym jak i księżycy w układzie Jowisza krążą wokół ciała centralnego po orbitach eliptycznych, było mocnym potwierdzeniem teorii heliocentrycznej Kopernika, dając zarazem niespotykaną dotąd zgodność obliczeń z obserwacjami. Było także definitywnym zerwaniem z pitagorejskim kanonem, zgodnie z którym prostota i elegancja opisu ruchu polegała na jego „rozłożeniu” na ruchy jednostajne po okręgu. Towarzyszyły one wszystkim astronomom od Hipparcha poprzez Ptolemeusza na Koperniku skończywszy. Odkrycie Keplera odrzuciło ten pitagorejsko-platoński kanon - elipsy okazały się równie pięknym i z pewnością prostszym pojęciem systemu kosmologicznego.

Te wydedukowane z danych empirycznych prawa, były w gruncie rzeczy prawami czysto geometrycznymi. Pojawiające się wzmianki dotyczące masy, siły i bezwładności (szczególnie w pracach Galileusza) zupełnie nie znalazły odzwierciedlenia w prawach Keplera. Z punktu widzenia dzisiejszej fizyki jest to opis ruchu w języku kinematyki, brak w nich zupełnie pojęć dynamiki. On sam pisząc „*Astronomia nova*” był przekonany, że tym co wywołuje orbitalny ruch planet jest „*duch planety*”, choć i u niego ten pogląd ewoluował – z biegiem lat zauważywszy ścisłą zależność prędkości liniowej planety na orbicie od jej średnicy doszedł do wniosku, że przyczyna ruchu ma jednak podłoże fizyczne. Mimo to znaczenie praw Keplera dla dalszego rozwoju fizyki trudno przecenić – były one inspiracją i podstawą rozważań dla Newtona szukającego uniwersalnego prawa rządzącego ruchami ciał na powierzchni Ziemi jak i w kosmosie.

PRAWO POWSZECHNEGO CIĄŻENIA

5 lipca 1687 Izaak Newton wydał dzieło, w którym przedstawił spójną teorię grawitacji opisującą zarówno spadanie obiektów na ziemi, jak i ruch ciał niebieskich. Tym samym spełniły się pitagorejskie idee opisu zjawisk przyrodniczych za pomocą abstrakcyjnych pojęć matematyki. Jego sukces dowiódł, że można stworzyć model zjawisk, których nie musimy bezpośrednio pomierzyć czy zaobserwować.

Angielski fizyk oparł się na zaproponowanych przez siebie zasadach dynamiki oraz prawach Keplera dotyczących odległości planety od Słońca. Prawo powszechnego

ciężenia głosi, że: „Między dowolną parą ciał posiadających masy pojawia się siła przyciągająca, która działa na linii łączącej ich środki mas, a jej wartość rośnie z iloczynem ich mas i maleje z kwadratem odległości”. Matematycznie związek ten wyraża się wzorem:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

gdzie: G - stała grawitacji, m_1 i m_2 - masy ciał, r - odległość między ciałami

To jest prawo powszechne, ponieważ stosuje się do wszystkich obiektów posiadających masę; np. wyjaśnia spadanie ciał na Ziemię, ale też tłumaczy ruch planet. Im większe ciało, tym silniej przyciąga inne ciała. Siła ciężkości Słońca jest tak olbrzymia, że utrzymuje razem cały Układ Słoneczny. W podobny sposób tłumaczymy stałość całej naszej galaktyki, którą spaja siła ciężkości ogromnej czarnej dziury.

Prawo grawitacji powszechnej Newtona nie jest prawem w pełni dokładnym. Precyzyjniejszy opis daje ogólna teoria względności Alberta Einsteina. Na szczęście odchylenia od wzoru Newtona przewidywane przez teorię względności w typowych sytuacjach są bardzo niewielkie i do większości zastosowań wzór Newtona jest bardzo użyteczny.

GRAWITACJA W OGÓLNEJ TEORII WZGLĘDNOŚCI

W Ogólnej Teorii Względności stworzonej przez Alberta Einsteina opis matematyczny grawitacji polega na określeniu związku pomiędzy lokalnymi stosunkami długości i interwałów czasowych w czasoprzestrzeni, a energią zawartą w określonym obszarze czasoprzestrzeni. Punktem wyjścia dla teorii jest uogólnienie zasady względności Galileusza, o równoważności opisu zjawisk fizycznych w dowolnych układach inercjalnych, na dowolne, także nieinercjalne, układy odniesienia. Próba takiego zapisania praw mechaniki, aby ich postać matematyczna była identyczna w dowolnym układzie odniesienia, prowadzi do utożsamienia grawitacji i sił bezwładności, masy grawitacyjnej i bezwładnej, i w końcu do równań pola grawitacyjnego łączących krzywiznę czasoprzestrzeni z tensorem energii-pędu. Można powiedzieć, że w ogólnej teorii względności grawitacja jest konsekwencją zakrzywienia czasoprzestrzeni. Generalnie, źródłem grawitacji są wszelkie postacie energii. W szczególności, wkład ciśnienia jest identyczny z wkładem masy, czyli wzrost ciśnienia powoduje wzrost sił przyciągających a nie, jak podpowiada nam intuicja, spadek.

Jak te dość trudne sformułowanie przełożyć na język zrozumiały? To co Albert Einstein odkrył na początku wieku, co przez wiele lat nie było zrozumiałe (między innymi z powodu zawichości matematycznego opisu), da się dzisiaj teoretycznie wyliczyć i dzięki lotom kosmicznym potwierdzić. Naszą przestrzeń ciągle „obmywają” fale grawitacyjne, których pierwsze źródło należy upatrywać w Wielkim Wybuchu, który miał miejsce 14 miliardów lat temu. Oblewają nas fale grawitacyjne, podobnie jak „obmywają” nas nieustannie fale elektromagnetyczne, a wśród nich na przykład światło widzialne. Nie potrafimy co prawda wykryć jeszcze promieniowania grawitacyjnego,

ale już dziś można zaobserwować zmiany, jakie ono wywołuje. Zgodnie z teorią, zmiany w polu grawitacyjnym powodują zmiany w zakrzywieniu czasoprzestrzennym - czas i przestrzeń ulega zmianom pod wpływem ogromnych mas i wywołanych przez nie sił grawitacyjnych. Według Einsteina planety i gwiazdy „wypaczają” czasoprzestrzeń, podobnie jak duża kula umieszczona na elastycznej tkaninie rozciągałaby ją. Mała kulka umieszczona na takiej tkaninie potoczy się oczywiście do środka, i w tym sensie możemy mówić o przyciąganiu. Ale kulka która porusza się z odpowiednią prędkością nie wpadnie do środka - będzie krążyć wokół centrum po eliptycznych torach. I w ten sposób, wychodząc z ogólnej teorii względności, dochodzimy do prostych już zależności opisujących tor lotu planety.

Jak obserwować te zmiany? Każde oddziaływanie wiąże się z wymianą cząstek. Oddziaływanie elektromagnetyczne - fotonów, jądrowe - nukleonów, a oddziaływanie grawitacyjne - grawitonów. O ile foton i nukleony są dość dobrze przebadane i opisane, to o grawitonach możemy dzisiaj powiedzieć: „wiemy, że tam jesteście”. Według obecnej wiedzy, wykrycie pojedynczych grawitonów jest w praktyce niemożliwe. Jest tak, ponieważ grawitacja jest bardzo słabym oddziaływaniem. Obserwacja zderzenia grawitonu z inną cząstką wymagałaby zgromadzenia takiej ilości materii i tak długiej obserwacji, że ludzka cywilizacja nigdy tego nie mogła by osiągnąć.

Einstein przewidział m.in. istnienie „czarnych dziur” - potrafimy je dzisiaj z dużym prawdopodobieństwem zaobserwować, m.in. za pomocą teleskopu Hubble’a. Zaobserwowano również ugięcie światła gwiazd w polu grawitacyjnym Słońca. Sprawdzone także tzw. efekt Shapiro, polegający na opóźnieniu czasowym sygnałów przechodzących w pobliżu masywnych ciał. Niedawno satelity LAGEOS I i LAGEOS II wykryły, że grawitacja ziemska zmienia ich orbity. W Niemczech uruchomiono projekt, którego celem jest mierzenie zmiany długości rzędu milionowych części średnicy atomu, spowodowane oddziaływaniem fal grawitacyjnych szybko obracających się gwiazd neutronowych. Sonda GRAWITY PROBE B wyniosła w przestrzeń kosmiczną bardzo dokładny żyroskop, który będzie badał zmiany kierunku rotacji spowodowane oddziaływaniem grawitacyjnym Ziemi. Widać więc, że już dzisiaj prowadzone są bardzo intensywne prace nad obserwacją efektów, a spodziewać się należy coraz bardziej wyrafinowanych metod.

Bibliografia do rozdziału

- Kordos M., Wykłady z historii matematyki, rozdz. XIII, str.154, WSiP W-wa 1994*
Nadzieja T., Izaak Newton, pitagorejczycy i prawo powszechnego ciężenia, Zielona Góra 2003
http://home.agh.edu.pl/~kakol/wykl_01.htm
<http://jaron.salon24.pl/60483,teoria-grawitacji-i-odkształcenia-czasoprzestrzeni-wg-einstein>
<http://www.iwiedza.net/wiedza/139.html>
<http://pl.wikipedia.org/wiki/Grawiton>
http://www.nauka.gildia.pl/publicystyka/nad_glowami/einstein_i_fale_grawitacyjne
<http://pl.wikipedia.org/wiki/Grawitacja>
http://pl.wikipedia.org/wiki/Og%C3%B3lna_teoria_wzgl%C4%99dno%C5%9Bci
http://pl.wikipedia.org/wiki/Prawa_Keplera
http://pl.wikipedia.org/wiki/Sta%C5%82a_grawitacji

FIZYKA KOMPUTEROWA

SYMULACJE KOMPUTEROWE
ALGORYTM EULERA
DYNAMIKA RUCHU PLANET
ULEPSZONY ALGORYTM EULERA
ALGORYTM VERLETA
ALGORYTM RUNGEGO-KUTTY
ENERGIA CAŁKOWITA UKŁADU



Mgławica Carina w gwiazdozbiorze Cerfeusza. Teleskop Hubble'a (NASA)

FIZYKA KOMPUTEROWA

SYMULACJE KOMPUTEROWE

Symulacja komputerowa jest procesem, w którym stan obiektów jest na bieżąco wyliczany i aktualizowany. Aby przedstawić ruch obiektu podczas symulacji, nie opieramy się na zapisanym ciągu zdarzeń animujących obiekt, lecz korzystamy z fizycznego modelu zjawisk i równań ruchu. Skoro znamy matematyczny model oddziaływań pomiędzy takimi pojedynczymi obiektami, możemy też wyliczyć dynamikę galaktyki składającej się z miliarda gwiazd. I w tym miejscu pojawia się problem. O ile ruch ciał bardzo łatwo scharakteryzować przy pomocy danych początkowych i systemu równań różniczkowych generujących dynamiczny opis zjawisk, o tyle nie ma sposobu na analityczne rozwiązanie tych równań. Już dla trzech ciał przyciągających się wzajemnie nie znamy rozwiązania, a w przypadku dwóch ciał podanie takiego rozwiązania wcale nie jest rzeczą prostą. Te problemy możemy ominąć korzystając z możliwości rozwiązań numerycznych tych procesów.

Zakładamy, że obiektami, które będziemy analizować będą planety i gwiazdy, dla których zasady oddziaływania grawitacyjnego podał Newton. Mając dane równania ruchu, należy je jeszcze rozwiązywać na bieżąco podczas symulacji. Ponieważ obliczenia wykonywane są na komputerach, dlatego wyniki obliczeń numerycznych będą dawały jedynie przybliżone rozwiązania równań. „Przybliżone”, gdyż obliczenia numeryczne nie dają wyników dokładnych. Zawsze są one obciążone błędem, którego wielkość zależy od wybranej metody obliczeniowej i możliwości samej maszyny obliczeniowej. Dodatkowo, należy wziąć pod uwagę ogromną rozpiętość wartości, które będą podlegały przekształceniom. I tak, jeśli chcemy prowadzić symulację w czasie rzeczywistym, tylko dla obiektów w naszym układzie planetarnym, z możliwością kontroli poruszającej się między tymi planetami rakiety, ta rozpiętość liczb wynosi bez mała: od 10^{-20} do 10^{+30} .

Wydawać by się mogło, że problem analizy numerycznej prowadzącej do animacji w czasie rzeczywistym i ogólnie symulacji procesów fizycznych jest szczególnie zawiły i trudny do opanowania. Otóż okazuje się, że każdy, kto potrafi posługiwać się arkuszem kalkulacyjnym jest w stanie w kilka minut przeprowadzić taki fizyczny eksperyment. Co więcej (biorąc pod uwagę szybkość współczesnych komputerów), znaleźć można rozwiązanie tych skomplikowanych problemów z bardzo dużą dokładnością. A poza tym, możliwa jest dalsza analiza i przeprowadzenie wnioskowania dotyczącego praw rządzących zjawiskami rzeczywistymi.

ALGORYTM EULERA

Ruch harmoniczny jest jednym z najprostszych, a przy okazji istotnym zjawiskiem fizycznym. Dla uproszczenia zajmiemy się na początku ruchem jednowymiarowym; będą to drgania punktu materialnego wokół położenia równowagi. Na taki punkt działa siła proporcjonalna do wychylenia z położenia równowagi. Ruch układu opisuje równanie różniczkowe drugiego rzędu:

$$\ddot{x} = -k^2 x$$

gdzie k oznacza stałą sprężystości, x - położenie punktu (odchylenie od położenia równowagi), a symbole z kropkami będą zawsze oznaczać kolejne pochodne względem czasu, czyli w naszym przypadku będzie to przyspieszenie.

Równanie to posiada jednoznaczne rozwiązanie, jeśli tylko zadane są: położenie początkowe $x(0)$ i prędkość początkowa $\dot{x}(0)$, którą oznaczymy przez v . Dla naszych celów pokazane będzie numeryczne podejście do rozwiązania problemu metodą Eulera, która jest najprostszą metodą, ale dla celów edukacyjnych spełniającą bardzo dobrze swoje zadanie. Zgodnie z tą metodą rozwiązanie w chwili $t + dt$ wyznaczyć można znając dane w chwili początkowej t za pomocą równań:

$$x(t + dt) = x(t) + \dot{x}(t) \cdot dt$$

$$v(t + dt) = v(t) + \ddot{x}(t) \cdot dt$$

Jeśli naszym celem będzie graficzne przedstawienie ruchu cząstki, to po doborze kroku symulacji (zmiany czasu) $dt = 0,01$ i czasu od $t = 0$ do $t = 10$ rozwiązanie będzie dla współczesnych komputerów trywialne, a my otrzymamy dane do utworzenia wykresu. Poniższy fragment kodu stanowi główną część takiego programu. Konkretnie rozwiązanie dostępne jest na stronie internetowej zso.bobowa.eu w dziale nauczyciele/fizyka. Dodać należy, że arkusz musi mieć włączoną możliwość wykonywania makropoleceń.

```

t = 0
x = 1
dt = 0.01
k = 1
Do
  a = -k * k * x
  v = v + a * dt
  x = x + v * dt
  t = t + dt
Loop Until t >= 10

```

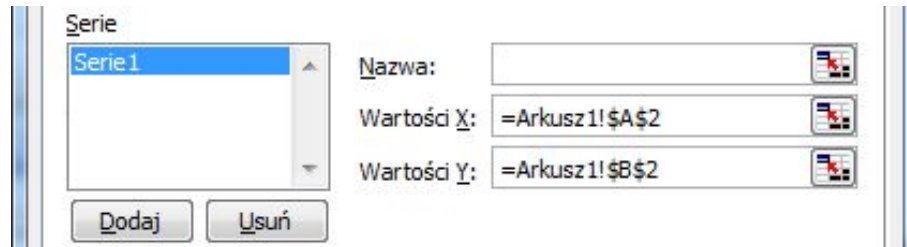
Jeżeli wartości zmiennych x i t wstawimy do komórek arkusza i zawartości komórek umieścimy na wykresie punktowym, będziemy mogli zaobserwować tor ruchu. Wystarczy do pętli głównej wprowadzić dwie dodatkowe instrukcje:

```

Range("A2") = t
Range("B2") = x

```

Wartość na osi X wykresu pobierana jest z komórki A2, do której wstawiamy czas t , wartość na osi Y pobierana jest z komórki B2, do której wstawiamy położenie x . Okno ustawiania tych wartości można wywołać wybierając z menu: Wykres / Dane źródłowe / Serie (wersja Excel 2003).



Rysunek 1 Współrzędne punktu wykresu punktowego

W prosty sposób można zmodyfikować program, zmienić dynamikę ruchu, wprowadzając inny sposób obliczania przyspieszenia lub obliczenia w pętli wstawić do kolejnych komórek arkusza i poddać dalszej analizie

DYNAMIKA RUCHU PLANET

Planety przyciągają się grawitacyjnie. Jak już wcześniej wspomniano: dla dwóch ciał zagadnienie posiada analityczne rozwiązanie. Są to tzw. krzywe stożkowe. Matematycznie rzecz ujmując: ruch całego układu N cząstek wyznaczany jest z układu $3N$ równań różniczkowych drugiego rzędu, po jednym w każdym z trzech kierunków w przestrzeni dla każdej cząstki. Równania te są równaniami Newtona:

$$\ddot{x}_i = F_i(x_1, \dots, x_N)$$

gdzie siła działająca na cząstkę F_i jest wypadkową sił grawitacyjnych od wszystkich pozostałych obiektów:

$$F_i = \sum_j \frac{m_i m_j (x_i - x_j)}{(r_{ij})^3}$$

gdzie m_i i m_j to masy obiektów, x_i i x_j położenia, a r_{ij} jest odległością pomiędzy nimi.

Dodać należy, że w podczas obliczeń numerycznych rozwiązanie jest jednoznaczne, jeśli tylko podane będą początkowe położenia cząstek i ich prędkości. W najprostszym podejściu, wykorzystującym metodę Eulera, układ można symulować (w dwóch wymiarach) przy pomocy następujących zmodyfikowanych wzorów i poniższego algorytmu:

$$r(t + \Delta t) = r(t) + v(t)\Delta t$$

$$v(t + \Delta t) = v(t) + f(t)\Delta t$$

gdzie: Δt jest krokiem czasowym, $v(t)$ prędkością w chwili t , $r(t)$ - położeniem obiektu w chwili t i $f(t)$ - przyspieszeniem w chwili t .

```

For i = 0 To N
  AX(i) = 0
  AY(i) = 0
  For j = 0 To N
    If i <> j Then
      R = ((RX(i) - RX(j)) ^ 2 + (RY(i) - RY(j)) ^ 2) ^ (1 / 2)
      AX(i) = AX(i) + -G * MA(j) * (RX(i) - RX(j)) / R^3
      AY(i) = AY(i) + -G * MA(j) * (RY(i) - RY(j)) / R^3
    End If
  Next j
  VX(i) = VX(i) + AX(i) * dt
  VY(i) = VY(i) + AY(i) * dt
  RX(i) = RX(i) + VX(i) * dt
  RY(i) = RY(i) + VY(i) * dt
Next i

```

W tablicach RX i RY przechowywane są położenia, VX i VY - prędkości, AX i AY - przyspieszenia. Gotowy program przygotowany w arkuszu kalkulacyjnym jest w stanie bez problemów zasymulować ruch układu kilku planet.

Jeżeli krok czasowy jest niewielki otrzymujemy dość dokładne i powtarzalne symulacje, ale przebiega ona bardzo wolno. Większe wartości przyrostu czasu prowadzą do zwiększenia prędkości symulacji, ale również do wystąpienia zauważalnych błędów numerycznych. Jest to typowe zjawisko dla obliczeń numerycznych, gdzie pojawiają się błędy związane z zaokrągleniem wyniku dla liczb rzeczywistych. Niedokładności obliczeń mogą prowadzić do coraz większej rozbieżności z rozwiązaniem dokładnym, ale także do pewnej „stabilności”, która z reguły objawia się oscylacją wokół rozwiązania dokładnego.

Jedną z metod uporania się z trudnościami jest metoda zmiany wielkości kroku czasowego w trakcie obliczeń, zależnie od wartości przewidywanego błędu. Dokładność obliczeń rośnie, ale wierność symulacji wyraźnie może na tym ucierpieć. Można również zastosować inny algorytm obliczeń. Wiąże się to z reguły z koniecznością wykonywania większej liczby obliczeń, ale nie powinno to stanowić problemów dla współczesnych komputerów.

ULEPSZONY ALGORYTM EULERA

Z matematycznego punktu widzenia, najlepiej obliczyć przybliżoną wartość funkcji w punkcie rozwijając ją w szereg Taylora. Umówiona w poprzednim fragmencie standardowa metoda Eulera, korzysta zaledwie z pierwszego wyrazu takiego rozwinięcia w szereg. Posługiwanie się kolejnymi będzie oczywiście skutkowało zwiększeniem dokładności, ale i ilości niezbędnych obliczeń.

Algorytm postępowania przedstawiają poniższe wzory ogólne:

$$y_{n+1} = y_n + \frac{1}{2} h(k_1 + k_2)$$

$$k_1 = f(t_n, y_n)$$

$$k_2 = f(t_n + h, y_n + hk_1)$$

gdzie t oznacza czas, h - krok czasu przyjęty do obliczeń.

For i = 0 To N

$$RX0(i) = RX(i)$$

$$RY0(i) = RY(i)$$

$$VX0(i) = VX(i)$$

$$VY0(i) = VY(i)$$

{K1}

$$AX(i) = 0$$

$$AY(i) = 0$$

For j = 0 To N

If i <> j Then

$$R = ((RX(i) - RX(j))^2 + (RY(i) - RY(j))^2)^{1/2}$$

$$AX(i) = AX(i) + -G * MA(j) * (RX(i) - RX(j)) / R^3$$

$$AY(i) = AY(i) + -G * MA(j) * (RY(i) - RY(j)) / R^3$$

End If

Next j

$$VX1(i) = AX(i) * dt$$

$$VY1(i) = AY(i) * dt$$

$$RX(i) = RX0(i) + VX1(i) * dt$$

$$RY(i) = RY0(i) + VY1(i) * dt$$

{K2}

$$AX(i) = 0$$

$$AY(i) = 0$$

For j = 0 To N

If i <> j Then

$$R = ((RX(i) - RX(j))^2 + (RY(i) - RY(j))^2)^{1/2}$$

$$AX(i) = AX(i) + -G * MA(j) * (RX(i) - RX(j)) / R^3$$

$$AY(i) = AY(i) + -G * MA(j) * (RY(i) - RY(j)) / R^3$$

End If

Next j

$$VX2(i) = AX(i) * dt$$

$$VY2(i) = AY(i) * dt$$

{właściwe wyliczenie położenia i prędkości}

$$VX(i) = VX0(i) + (VX1(i) + VX2(i)) / 2$$

$$VY(i) = VY0(i) + (VY1(i) + VY2(i)) / 2$$

$$RX(i) = RX0(i) + VX(i) * dt$$

$$RY(i) = RY0(i) + VY(i) * dt$$

Next i

ALGORYTM VERLETA

Algorytm Verleta łączy w sobie szybkość obliczeń, a jednocześnie spełnia kluczowe dla obliczeń fizycznych postulaty: jest odwracalny w czasie oraz całkowita energia układu (co prawda nie jest zachowana) w dłuższych okresach czasu oscyluje wokół jednej wartości. Z tych też powodów algorytm bardzo często stosowany jest do symulowania wszelkiego rodzaju symulacji fizycznych, w których dużo ważniejsze jest utrzymanie trajektorii ruchu niż dokładność obliczeń. Istnieje kilka równoważnych matematycznie wariantów algorytmu Verleta. Opisany zostanie algorytm prędkościowy, którego ogólny wzór wyraża się w następujący sposób:

$$r(t + \Delta t) = r(t) + v(t)\Delta t + \frac{f(t)}{2m} \Delta t^2$$

$$v(t + \Delta t) = v(t) + \frac{f(t + \Delta t) + f(t)}{2m} \Delta t$$

gdzie: Δt jest krokiem czasowym, $v(t)$ prędkością w chwili t , $r(t)$ - położeniem obiektu w chwili t i $f(t)$ - siłą w chwili t .

```

For i = 0 To N
  AX(i) = 0
  AY(i) = 0
  For j = 0 To N
    If i <> j Then
      R = ((RX(i) - RX(j)) ^ 2 + (RY(i) - RY(j)) ^ 2) ^ (1 / 2)
      AX(i) = AX(i) + -G * MA(j) * (RX(i) - RX(j)) / R^3
      AY(i) = AY(i) + -G * MA(j) * (RY(i) - RY(j)) / R^3
    End If
  Next j
  RX(i) = RX(i) + VX(i) * dt + 1/2 * AX(i) * dt^2
  RY(i) = RY(i) + VY(i) * dt + 1/2 * AY(i) * dt^2
  VX(i) = VX(i) + AX(i) * dt + 1/2 * AX(i) * dt
  VY(i) = VY(i) + AY(i) * dt + 1/2 * AY(i) * dt

  AX(i) = 0
  AY(i) = 0
  For j = 0 To N
    If i <> j Then
      R = ((RX(i) - RX(j)) ^ 2 + (RY(i) - RY(j)) ^ 2) ^ (1 / 2)
      AX(i) = AX(i) + -G * MA(j) * (RX(i) - RX(j)) / R^3
      AY(i) = AY(i) + -G * MA(j) * (RY(i) - RY(j)) / R^3
    End If
  Next j
  VX(i) = VX(i) + AX(i) * dt + 1/2 * AX(i) * dt
  VY(i) = VY(i) + AY(i) * dt + 1/2 * AY(i) * dt
Next i

```

ALGORYTM RUNGEGO-KUTTY

Istnieje wiele metod Rungego-Kutty, różniących się między sobą różnymi własnościami, choć potocznie określa się nią metodę tzw. czwartego rzędu. Względnie prosty algorytm, duża szybkość i dokładność obliczeń czynią z niej bardzo dobre narzędzie do przeprowadzania symulacji. Algorytm postępowania przy tej metodzie określają następujące wzory ogólne:

$$y_{n+1} = y_n + \frac{1}{6} h(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)$$

$$k_1 = f(t_n, y_n)$$

$$k_2 = f(t_n + \frac{1}{2} h, y_n + \frac{1}{2} h k_1)$$

$$k_3 = f(t_n + \frac{1}{2} h, y_n + \frac{1}{2} h k_2)$$

$$k_4 = f(t_n + h, y_n + h k_3)$$

Wielkość oznaczona jako t oznacza czas, h - krok czasu przyjęty do obliczeń. Jak widać nie są one zbyt skomplikowane i łatwo nadają się do zaimplementowania w programie komputerowym, który przedstawiono poniżej.

```

For i = 0 To N
  RX0(i) = RX(i)
  RY0(i) = RY(i)
  VX0(i) = VX(i)
  VY0(i) = VY(i)
  {K1}
  AX(i) = 0
  AY(i) = 0
  For j = 0 To N
    If i <> j Then
      R = ((RX(i) - RX(j)) ^ 2 + (RY(i) - RY(j)) ^ 2) ^ (1 / 2)
      AX(i) = AX(i) + -G * MA(j) * (RX(i) - RX(j)) / R^3
      AY(i) = AY(i) + -G * MA(j) * (RY(i) - RY(j)) / R^3
    End If
  Next j
  VX1(i) = AX(i) * dt
  VY1(i) = AY(i) * dt
  RX(i) = RX0(i) + VX1(i) * dt / 2
  RY(i) = RY0(i) + VY1(i) * dt / 2
  {K2}
  AX(i) = 0
  AY(i) = 0
  For j = 0 To N
    If i <> j Then
      R = ((RX(i) - RX(j)) ^ 2 + (RY(i) - RY(j)) ^ 2) ^ (1 / 2)
      AX(i) = AX(i) + -G * MA(j) * (RX(i) - RX(j)) / R^3
      AY(i) = AY(i) + -G * MA(j) * (RY(i) - RY(j)) / R^3
    End If
  Next j

```



```

VX2(i) = AX(i) * dt
VY2(i) = AY(i) * dt
RX(i) = RX0(i) + VX2(i) * dt / 2
RY(i) = RY0(i) + VY2(i) * dt / 2
{K3}
  AX(i) = 0
  AY(i) = 0
  For j = 0 To N
    If i <> j Then
      R = ((RX(i) - RX(j)) ^ 2 + (RY(i) - RY(j)) ^ 2) ^ (1 / 2)
      AX(i) = AX(i) + -G * MA(j) * (RX(i) - RX(j)) / R^3
      AY(i) = AY(i) + -G * MA(j) * (RY(i) - RY(j)) / R^3
    End If
  Next j
  VX3(i) = AX(i) * dt
  VY3(i) = AY(i) * dt
  RX(i) = RX0(i) + VX3(i) * dt
  RY(i) = RY0(i) + VY3(i) * dt
{R4}
  AX(i) = 0
  AY(i) = 0
  For j = 0 To N
    If i <> j Then
      R = ((RX(i) - RX(j)) ^ 2 + (RY(i) - RY(j)) ^ 2) ^ (1 / 2)
      AX(i) = AX(i) + -G * MA(j) * (RX(i) - RX(j)) / R^3
      AY(i) = AY(i) + -G * MA(j) * (RY(i) - RY(j)) / R^3
    End If
  Next j
  VX4(i) = AX(i) * dt
  VY4(i) = AY(i) * dt
{końcowe obliczenia}
  VX(i) = VX0(i) + (VX1(i) + 2 * VX2(i) + 2 * VX3(i) + VX4(i)) / 6
  VY(i) = VY0(i) + (VY1(i) + 2 * VY2(i) + 2 * VY3(i) + VY4(i)) / 6
  RX(i) = RX0(i) + VX(i) * dt
  RY(i) = RY0(i) + VY(i) * dt
Next i

```

ENERGIA CAŁKOWITA UKŁADU

Osobną uwagę poświęcić należy obliczanej energii całkowitej układu. To, że energia całkowita układu jest ważną wielkością wynika z prostego faktu - zasada zachowania energii obowiązuje zawsze. Powinna obowiązywać również podczas prowadzenia naszych komputerowych eksperymentów fizycznych. Ponieważ jednak eksperyment fizyczny polega na wykonywaniu obliczeń przez komputer, a ten (ze swojej natury) obciążony jest mankamentem związanym w niedokładnym zapamiętywaniem liczb rzeczywistych, dlatego też będą pojawiać się błędy

w obliczeniach. Jest to nieuniknione - błędy pojawiają się zawsze, mimo tego, że traktujemy komputery wręcz, jako urządzenia nieomyłne.

Wszystko się zgadza, jeśli prowadzimy obliczenia w obszarze liczb rzędu kilku miejsc po przecinku, nie jest nam potrzebna większa dokładność i wykonujemy tych obliczeń stosunkowo niewiele. Sytuacja jednak znacznie się komplikuje, gdy dochodzą do głosu liczby duże i obliczania powtarzamy wiele razy - jak w naszych eksperymentach. Nie ma również znaczenia, że podczas obliczeń korzystamy ze zmiennych, które potrafią zapamiętać kilkadziesiąt cyfr po przecinku. Jeszcze raz, trzeba jasno to stwierdzić - komputer generuje błędne obliczenia. Błędy te mogą narastać lub oscylować wokół pewnej wartości. Co zrobić, żeby błędy były jak najmniejsze? Po pierwsze: wiedzieć, że na pewno się pojawią, a po drugie: stosować odpowiednie algorytmy obliczeń.

W pracy opisano cztery algorytmy: Eulera - najbardziej podstawowy, ulepszony algorytm Eulera, Verleta - częściowo spełniający zasadę zachowania energii układu i metodę Runge-Kutty czwartego rzędu. Wszystkie dość dobrze sprawdzają się podczas symulacji, jeśli mamy niewielkie przyrosty czasu. Istnieje oczywiście wiele innych sposobów prowadzenia obliczeń numerycznych, jednak naszym celem nie jest prawdziwy lot kosmiczny (konieczna bardzo duża dokładność obliczeń), ale komputerowa symulacja tego lotu dla celów edukacyjnych, dlatego też zdecydowano, że większość gotowych symulacji będzie działać w oparciu o algorytm Verleta, który co prawda nie zachowuje energii całkowitej ale, jak wykazały badania, daje najmniejsze wahania energii podczas symulacji.

Czym jest energia całkowita układu? - jest energią zawierającą wszystkie jej możliwe postacie: kinetyczną, potencjalną ciężkości, potencjalną sprężystości, elektryczną, magnetyczną, chemiczną, jądrową, itd... Ze względów praktycznych, w naszym eksperymencie fizycznym będziemy zajmować się jedynie energią kinetyczną i energią potencjalną.

Czego tak naprawdę dotyczy zasada zachowania energii? Przyjmijmy, że nasz eksperyment odbywa się w układzie izolowanym, co oznacza, że wszystkie obiekty układu są w nim na stałe zdefiniowane: nie pojawiają się i nie znikają. W ujęciu bardziej ścisłym oznacza to, że układ nie wymienia energii z otoczeniem, albo inaczej, że energia całkowita układu jest stała. Możemy to sformułować w inny sposób: energia całkowita układu jest taka sama przed, jak i po wystąpieniu przemian w układzie.

$$E_k + E_p = const \text{ lub } \Delta E_k + \Delta E_p = 0$$

Aby obliczyć energię całkowitą układu podczas symulacji należy podsumować energie potencjalne i kinetyczne wszystkich obiektów biorących udział w eksperymencie. Czym jest w takim razie energia potencjalna układu ciał? Zgodnie z definicją, jest to praca, która musi być wykonana na przeniesienie obiektów z nieskończoności do obecnego położenia. Położeniu ciała w nieskończoności przypisujemy energię potencjalną równą zero i jest to również stan zerowej siły grawitacji. Ponieważ wiemy, jak obliczyć siłę grawitacji, więc pracę (i energię potencjalną) wyliczymy całkując siłę na drodze z nieskończoności do danego położenia. Aby uprościć obliczenia zakładamy, że cała masa skupiona jest w centrum układu i centrum pozostaje nieruchome - nie rozpatrujemy energii względem środka masy.

Wyprowadzony wzór na energię potencjalną ma postać:

$$E_p = -G \frac{Mm}{r}$$

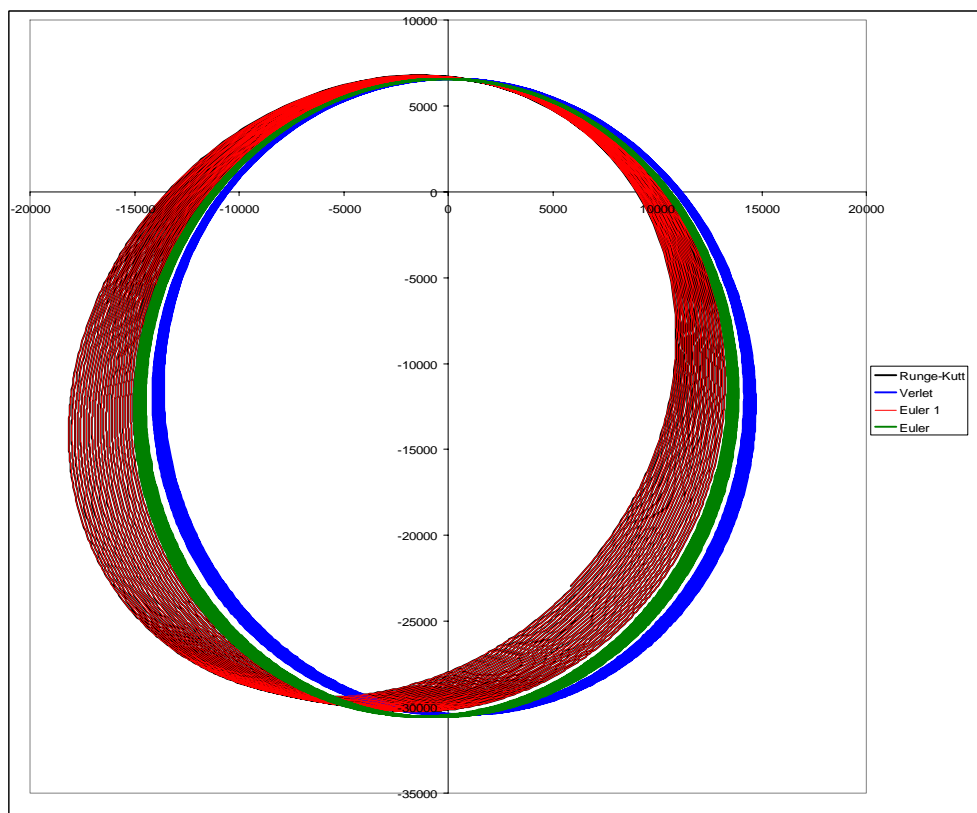
gdzie G jest stałą grawitacji, r - odległością między ciałami, m - masa ciała, M - masa centrum. Ponieważ obiekty nie obracają się, dlatego wzór na energię kinetyczną ciała, poruszającego się z prędkością v o masie m jest znany i ma postać:

$$E_k = \frac{mv^2}{2}$$

Mamy do czynienia z układem ciał, więc całkowita energia układu będzie sumą tych wszystkich składowych energii.

Przechodząc do naszego eksperymentu: można w każdej chwili obliczać energię całkowitą układu (kinetyczną i potencjalną) i badać jej wahania. Jeżeli różnica pomiędzy obliczonymi: maksymalną, a minimalną energią całkowitą jest duża, oznaczać to będzie, że błędy w obliczeniach numerycznych w naszym eksperymencie powodują duże niedokładności i możemy mieć wątpliwość, co do rzeczywistego obrazu symulacji - trajektorii obiektów wyliczanych przez program.

Poniższy wykres przedstawia trajektorie lotu rakiety wokół Ziemi dla czterech opisanych wcześniej algorytmów. Prędkość początkowa rakiety wynosiła 10 km/s, waga - 100000 kg. Najmniejsza odległość od Ziemi - 200 km, największa - 24000 km. Skok czasu w symulacji wynosił 60 sekund. Rakieta wykonała 25 okrążeń wokół Ziemi.



Rysunek 2 Trajektorie lotu rakiety wokół Ziemi

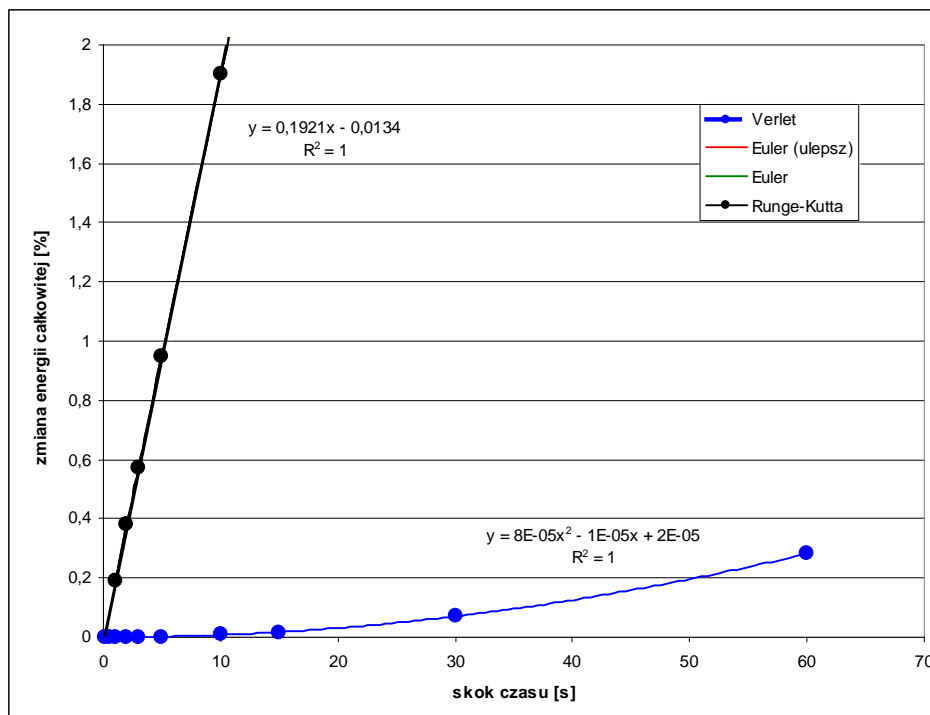
W naszym doświadczeniu Ziemia porusza się w granicach 10^{-13} km, więc możemy założyć, że jest nieruchoma, więc odchylenia rakiety od toru lotu powinny być minimalne. To założenie spełniają dwa algorytmy: Verleta i podstawowy Eulera, choć ich tory lotu się nie pokrywają. Metoda Rungego-Kutty i ulepszony algorytm Eulera dają zdecydowanie większe odchylenia, a jednocześnie identyczne tory lotu.

Twierdzenie o wiriale, pozwala sprawdzić zachowanie się poruszającego się układu w polu grawitacyjnym i opisuje zależność pomiędzy średnią energią kinetyczną a średnią energią potencjalną układu. Zgodnie z twierdzeniem średnia energia potencjalna powinna być dwa razy większa od średniej energii kinetycznej. Dla przeprowadzonych symulacji zależności te przedstawia poniższa tabela i jak widać, stosunek tych dwóch energii jest bliski teoretycznej wartości. Warto również zauważyć, że algorytm Runge-Kutty i ulepszony Euler są prawie identyczne.

	średnia energia potencjalna	średnia energia kinetyczna	$-E_p/E_k$
Runge-Kutta	-2179465,4435	1095598,1776	1,9892927
Euler (ulepsz.)	-2179454,9419	1095591,1785	1,9892958
Verlet	-2159461,2015	1078391,4672	2,0024836
Euler	-2144717,6386	1067964,3051	2,0082297

Tabela 1. Średnia energia potencjalna i kinetyczna.

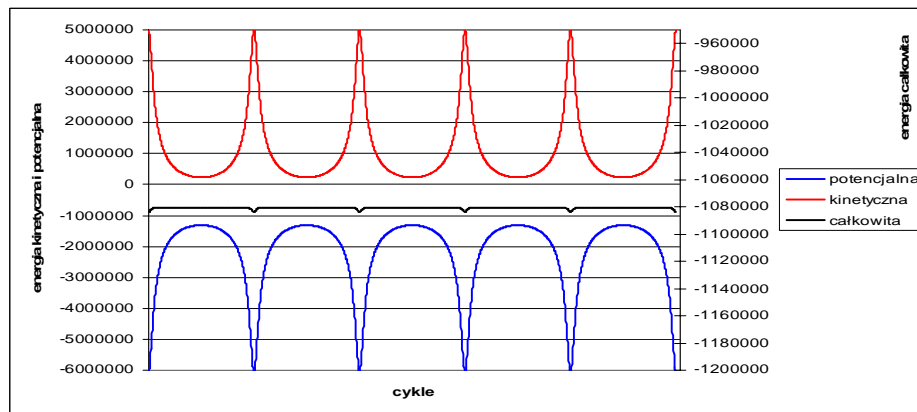
Dla takich samych warunków symulacji zbadano zmiany energii całkowitej układu w zależności od wielkości skoku czasowego. Zbiorcze zestawienie przedstawia poniższy wykres.



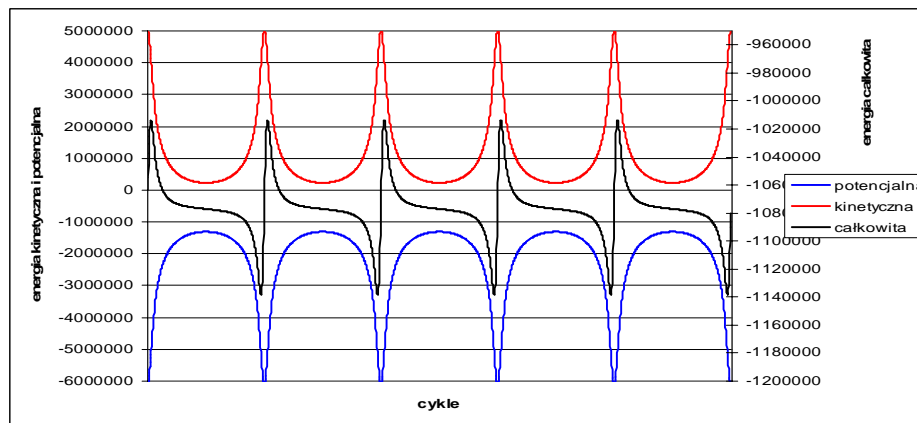
Rysunek 3 Zmiana energii całkowitej w funkcji skoku czasu

Algorytm Verleta daje wyraźnie lepsze wyniki niż pozostałe trzy (odchylenia energii całkowitej układu są znacznie mniejsze) i jest to zależność wykładnicza. Zauważyć należy, że przy kroku czasowym 60 sekund wartość odchylenia energii całkowitej układu wynosi niecałe 0,3%, a przy kroku mniejszym niż 10 sekund odchylenia są pomijalnie małe. Co ciekawe: pozostałe algorytmy mają prawie identyczne wartości odchyłeń, które układają się liniowo. Podobne symulacje wykonano również dla innych układów: duża planeta krąży wokół gwiazdy oraz Ziemia, Księżyc i Mars krążą wokół Słońca.

Jak zmienia się energia w czasie trwania symulacji? Poniższe wykresy wykonano w trakcie tej samej symulacji i opisują pięć pierwszych pełnych cykli obiegu rakiety wokół Ziemi.



Rysunek 4 Zmiany energii - algorytm Verleta



Rysunek 5 Zmiany energii - algorytm Eulera

Energie na wykresach przedstawiono w identycznych skalach. Bardzo charakterystyczna jest różnica pomiędzy energią całkowitą układu (czarna linia) uzyskaną algorytmem Verleta (pierwszy rysunek), a uzyskaną za pomocą algorytmu Eulera (drugi rysunek).

Bibliografia do rozdziału

- Borkowski K., *Obliczenia astronomiczne nie tylko dla geografów*, UMK Toruń
- Bourg D.M., *Fizyka dla programistów gier*, Helion, 2003
- Kiedrowicz G., *Informatyczne wspomaganie nauczania*, Pedagogika Pracy, Radom 2000.
- Kąkol Z., *Wykłady z fizyki*, AGH WFiIS, w: http://home.agh.edu.pl/~kakol/wykl_01.htm
- Kozielska M., *Komputerowe wspomaganie edukacji*, Wyd. „Pedagogium”, Szczecin 2003.
- Małecki P., *Modelowanie procesów fizycznych*, WSIZ
- Matulewski J., *Grafika. Fizyka. Metody numeryczne. Symulacje fizyczne z wizualizacją 3D*, Naukowe PWN, 2010
- Matyka M., *Symulacje komputerowe w fizyce*, Helion 2002
- Napiórkowska J., *Numeryczne całkowanie układów dynamicznych metodą Rungego-Kutty*, Uniwersytet Opolski, IMiI
- Patkaniowski B., *Ruch dwóch planet wokół gwiazdy*, WFiTJ AGH
- Przybylak J., *Metody nauczania fizyki – symulacje komputerowe czy tradycyjne środki dydaktyczne*
- Selajda W., *Studenckie laboratorium obliczeniowe*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2011
- http://aragorn.pb.bialystok.pl/~mosdorf/WYK/mn/Metoda_Runego-Kutty.htm
- http://en.wikipedia.org/wiki/Euler_method
- http://pl.wikipedia.org/wiki/Algorytm_Runego-Kutty
- http://pl.wikipedia.org/wiki/Algorytm_Verleta
- http://pl.wikipedia.org/wiki/Uk%C5%82ad_%C5%9Brodka_masy
- http://pl.wikipedia.org/wiki/Twierdzenie_o_wiriale
- http://pl.wikipedia.org/wiki/Problem_n_cia%C5%82
- http://www.ch.embnet.org/MD_tutorial/pages/MD.Part1.html
- <http://www.fisica.uniud.it/~ercolessi/md/md/node21.html>
- http://www.myphysicslab.com/runge_kutta.html
- <https://www.fizyka.umk.pl/~jacek/docs/nrc/c16-1.pdf>
- http://www.fizykon.org/dynamika/en_zasada_zachowania_energii.htm
- <http://www.astro.uni.torun.pl/~kb/Books/AstronomiczneObliczenia.pdf>
- http://fatcat.ftj.agh.edu.pl/~mof/patkaniowski_3/planety.php
- <http://www.profesor.pl/publikacja,21041,Referaty,Metody-nauczania-fizyki-8211-symulacje-komputerowe-czy-tradycyjne-srodki-dydaktyczne>

PROGRAM KOMPUTEROWY - GRAWITACJA

OPIS DZIAŁANIA
PARAMETRY POCZĄTKOWE
OBSŁUGA I STEROWANIE
GOTOWE SYMULACJE
ZAWAROŚĆ PŁYTKI CD



Galaktyka Centaurus. Teleskop Hubble'a (NASA)

PROGRAM KOMPUTEROWY - GRAWITACJA

OPIS DZIAŁANIA

Program komputerowy GRAWITACJA, zgodnie z tytułem pracy, służy do przeprowadzania eksperymentów fizycznych na komputerze. Eksperymenty te dotyczą symulowania ruchu obiektów kosmicznych w polu grawitacyjnym oraz lotów statkami kosmicznymi. Program działa w środowisku Microsoft Excel i został napisany przy użyciu języka VBA (Visual Basic dla Aplikacji). Testowany był na używanych obecnie wersjach arkusza: XP, 2003, 2007, 2010. Jeśli chodzi o wymagania dotyczące mocy komputerów, to również nie sprawiał będzie kłopotów. Już procesor z zegarem 1 GHz powinien wystarczyć do zadowalającego działania. Aktualna wersja programu to prawie 1500 wierszy kodu źródłowego i ponad 30000 znaków.

Dlaczego arkusz kalkulacyjny? Wydawać by się mogło, że arkusz kalkulacyjny, to zestaw tabel, które służą do szybkiego obliczania, związanego raczej z finansami niż z grawitacją, nie wspominając już o symulacji komputerowej fizycznych zjawisk. Był to rzeczywiście jeden z powodów, dla których zdecydowałem się na zastosowanie takiego środowiska - pokazać, że arkusz, to rzeczywiście potężne narzędzie. A w związku z tym, że arkusz kalkulacyjny jest podstawowym narzędziem, dostępnym dla wszystkich, to jednocześnie chciałem unaocznić, że bardzo w prosty sposób, przeprowadzać można eksperymenty fizyczne i badać zjawiska zachodzące w wirtualnym świecie. I kolejną ważną przyczyną - kod źródłowy programu jest dostępny, dla każdego, i każdy może zobaczyć: „jak to zostało zrobione”, poprawić, ulepszyć, czy też wykorzystać do przeprowadzenia swoich eksperymentów, i być może stwierdzić: „patrzcie, jakie to jest proste”.

Obecna wersja programu umożliwi zdefiniowanie początkowych wartości dla czterech obiektów kosmicznych i rakiety. Dlaczego tylko cztery? Ponieważ w niedługim czasie czeka nas wyprawa kolonizacyjna na Marsa, więc tylko cztery obiekty kosmiczne są dla niej istotne. Wszystkie inne sytuacje kosmiczne i manewry można z powodzeniem zasymulować z tak ubogim zestawem.

Wszystkie parametry możemy podawać w jednostkach układu SI (metry, sekundy, kilogramy) lub w dowolnych innych, zależnych od ustawienia stałej grawitacji. Każdą planetę opisują wartości początkowe: położenie i prędkość w kartezjańskim układzie współrzędnych, masa oraz promień. Rakieta, ma podobne parametry startowe (położenie, prędkość, masa, promień), dodatkowo wyposażona jest w możliwość ustawienia ilości paliwa, szybkości spalania i szybkości wypływu spalin z dysz oraz kilka innych dodatkowych własności. Tory planet i rakiety wyliczane są z równań ruchu, które wywodzą się wprost z prawa powszechnego ciążenia Newtona. Siła ciągu rakiety uwzględnia zmianę jej masy, co jest zgodne z wzorami wyprowadzonymi przez Konstantina Ciołkowskiego. W trakcie lotu możemy obracać rakieta wokół osi oraz sterować siłą ciągu. Wszelkie zmiany mogą być dokonywane w trakcie symulacji.

Bardzo ważne z punktu widzenia użytkownika jest sterowanie upływem czasu. Skok upływu czasu możemy zmieniać bardzo dokładnie w przedziale od setnych części sekundy do kilku lat. Możliwa jest również zmiana kierunku upływającego czasu. Wspomnieć należy jeszcze o tym, że symulacja może toczyć się w czasie rzeczywistym (skok upływu czasu wynosi 1 sekundę) i ma to jedynie sens w przypadku wykonywania skomplikowanych manewrów rakiety. Można także wykonywać kolejne cykle programu krok po kroku. Podczas normalnej symulacji, skok upływającego czasu ustawiamy zależnie od tego, co chcemy zobaczyć. Obserwacja ruchu Ziemi wokół Słońca będzie wymagała skoku czasu rzędu godzin i dni, manewry rakiety na orbicie najlepiej wykonywać, gdy skok wynosi sekundy, a rozwiązywanie problemów związanych z rzucaniem przedmiotów na powierzchni planet wymagało będzie setnych części sekundy lub uruchamiania programu krok po kroku. Oczywiście szybkość symulacji zależna jest od mocy samego komputera i co dziwne, od wersji arkusza kalkulacyjnego. Stwierdzono bowiem zadziwiającą zależność - im nowsza wersja arkusza, tym symulacja działa wolniej!

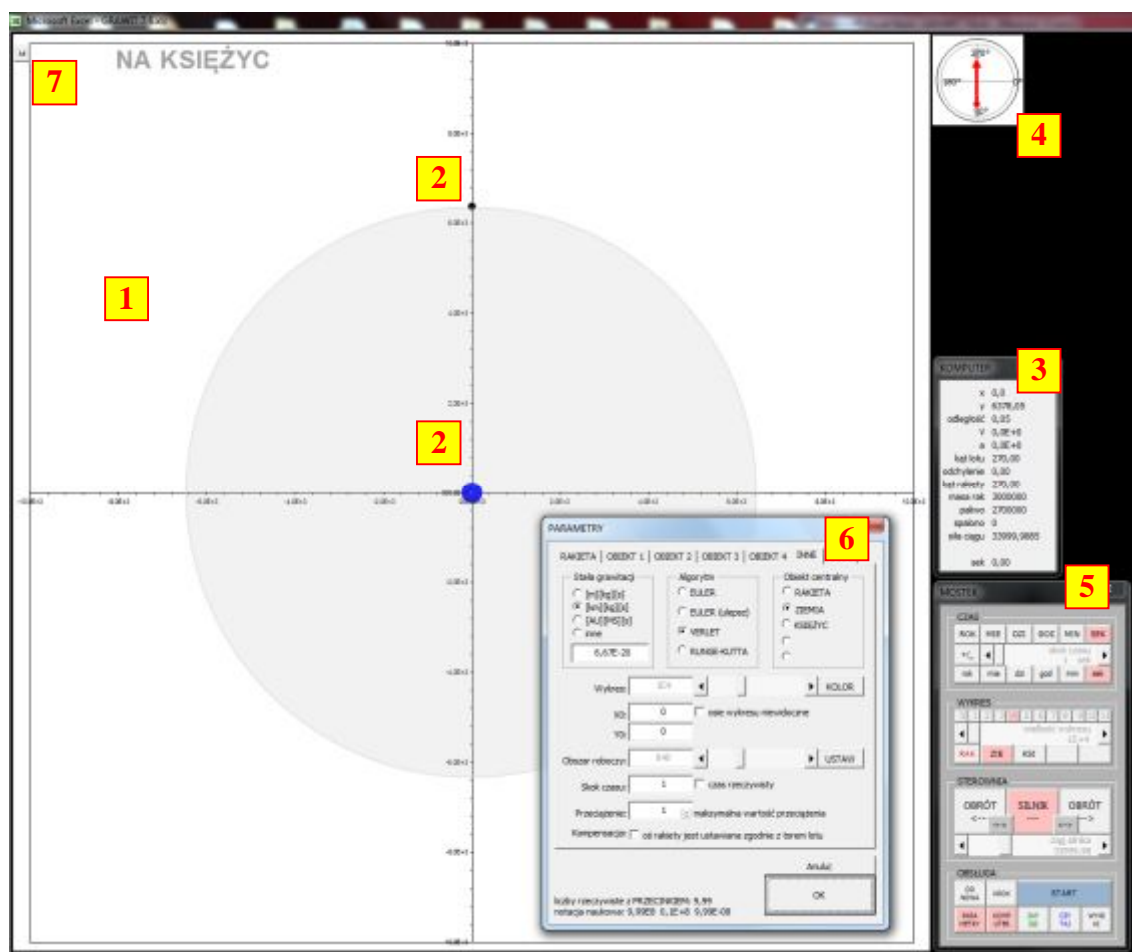
Kolejną istotną właściwością, z punktu widzenia użytkownika jest możliwość skalowania wykresu, czyli naszego wirtualnego kosmosu. Odległości, podobnie zresztą, jak i masy zależne są od przyjętej stałej grawitacji. Standardowo stałą grawitacji podajemy w jednostkach układu SI (metry, kilogramy, sekundy). Dodatkowo zdefiniowaną stałą w jednostkach bardziej astronomicznych (MS - masa słońca, AU - odległość Ziemi od Słońca). Nic nie stoi na przeszkodzie, aby zdefiniować stałą grawitacji w dowolny sposób i takie też będą jednostki obowiązywać podczas symulacji. Przy tak dowolnym definiowaniu jednostek mamy możliwość skalowania wykresu w zakresie od jednostek do wielkości rzędu 10^{12} .

OBSŁUGA I STEROWANIE

Po uruchomieniu arkusza kalkulacyjnego (musi być włączona możliwość uruchamiania makropoleczeń) przeprowadzane są czynności porządkujące i pojawia się ekran przedstawiony na poniższym rysunku. Widać na nim wszystkie możliwe okienka - podczas normalnej pracy nie są one niezbędne. Symulacja odbywa się w arkuszu o nazwie GRAWITACJA. Arkusz DANE przechowuje parametry startowe dla symulacji. Na arkuszu WYNIKI użytkownik programu może zapisać wartości chwilowe podczas symulacji, które będzie mógł wykorzystać do dalszych obliczeń. Wszystkie obliczenia odbywają się w makropoleceniach.

Poniższy rysunek pokazuje typowy wygląd ekranu. Widoczne są:

1. Obszar animacji - wykres.
2. Obiekty kosmiczne - kolorowe kropki na wykresie.
3. Panel KOMPUTER - parametry lotu rakiety.
4. Panel RADAR - pokazuje kierunek lotu i pochylenie rakiety.
5. Panel MOSTEK - centrum dowodzenia.
6. Panel PARAMETRY - ustawianie parametrów startowych obiektów.
7. Przycisk MOSTEK - ponowne wywołanie panel MOSTEK.



Rysunek 6 Wygląd ekranu podczas symulacji. Widoczne wszystkie dostępne panele

Niewidoczne dla użytkownika są: tabela z wartościami chwilowymi (pod obszarem animacji), arkusz DANE z danymi startowymi i arkusz WYNIKI z zapisanymi wartościami chwilowymi oraz oczywiście kod programu.

OBSZAR ANIMACJI

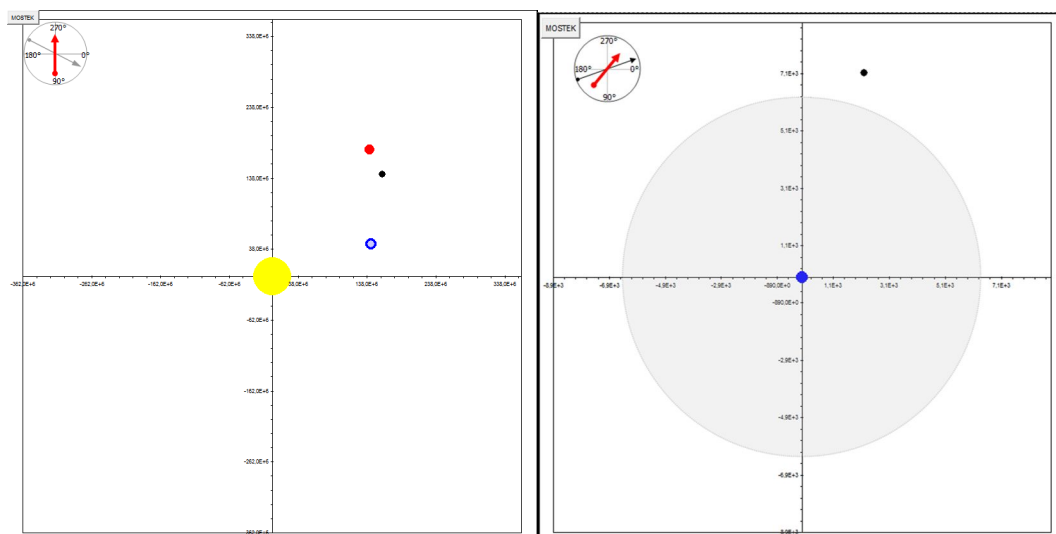
Obszar animacji, to po prostu wykres XY (Punktowy) arkusza kalkulacyjnego. Po uruchomieniu programu następuje automatyczne dopasowanie wielkości wykresu do wielkości okna arkusza kalkulacyjnego. W trakcie symulacji możemy zmieniać wielkość wykresu oraz kolor obszaru, po którym poruszają się planety. Można również usunąć z wykresu osie.

OBIEKTY KOSMICZNE

Na wykresie może poruszać się jednocześnie (zgodnie z prawami grawitacji) cztery obiekty kosmiczne i rakieta. Ich parametry startowe definiujemy po naciśnięciu przycisku PARAMETRY na panelu MOSTEK. Podczas symulacji jeden z wybranych obiektów może być umieszczony centralnie na wykresie i to względem niego obserwujemy ruch innych obiektów. Wielkość punktów na wykresie ma jedynie znaczenie poglądowe - nie można ich dowolnie zmieniać, proporcjonalnie do wielkości obszaru symulacji. Niestety wykresy arkusza kalkulacyjnego nie pozwalają na dowolne

ich ustawianie. Można oczywiście rysować koła o odpowiednich wielkościach, ale przeprowadzone próby wykazały, że wydajność programu bardzo spada. Również próby rysowania trajektorii powodują znaczne spowolnienie symulacji, dlatego nie zostały zaimplementowane, choć można je rysować na osobnych wykresach.

Poniższe rysunki pokazują przykładowe ekrany podczas symulacji. Rysunek z lewej - ruch planet wokół gwiazdy centralnej. W tym wypadku widoczne jest centralnie umieszczone żółte Słońce i krążące wokół niego niebieska Ziemia, szary Księżyc i czerwony Mars. Jeżeli wielkość wykresu jest zbliżona do wielkości obiektu umieszczonego centralnie, to wokół niego pojawia się szare koło o wymiarach proporcjonalnych do rzeczywistych. Sytuację taką pokazuje rysunek z prawej strony, na którym wokół Ziemi krąży czarny punkt rakiety.



Rysunek 7 Obiekty na wykresie

PANEL KOMPUTER

Panel pokazuje ważne parametry pracy rakiety w czasie lotu. Wszystkie przeliczane są względem obiektu umieszczonego w centrum wykresu. X i Y - położenie rakiety w układzie kartezjańskim. ODLEGŁOŚĆ - odległość od powierzchni obiektu. DROGA - przebyta przez raketę droga. PRĘDKOŚĆ - prędkość rakiety, PRZYSPIESZ - przyspieszenie rakiety. KĄT LOTU - chwilowy kierunek lotu, styczny do trajektorii (czarna strzałka na „radarze”). ODCHYLENIE - kąt pomiędzy trajektorią a osią rakiety. KĄT RAKIETY - kąt osi rakiety, wskazuje w którym porusza się rakieta z włączonym silnikiem (czerwona strzałka na „radarze”). MASA RAK - masa rakiety, pomniejszana w miarę spalania paliwa. PALIWO - dostępna ilość paliwa, zmniejszana w trakcie pracy silnika zgodnie z ustawioną w parametrach szybkością spalania. SPALONO - ilość paliwa, która została spalona. SIŁA CIĄGU - obliczona na podstawie

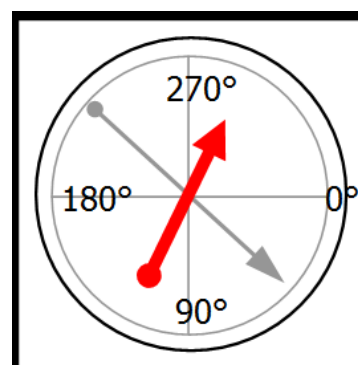
KOMPUTER	
x	65,314
y	6395,5392
odległość	17,8727
droga	72,3811
prędkość	0,9354
przyspiesz	6,6981
kąt lotu	356,33
odchylenie	351,01
kąt rakiety	306,00
masa rak	2946000
paliwo	2646000
spalono	54000
siła ciągu	34000
sek	216,00

Rysunek 8
Panel KOMPUTER

szybkości spalania i szybkości wypływu spalin siła, z jaką porusza się rakieta. W ostatnim wierszu pokazywany jest upływ czasu symulacji w odpowiedniej jednostce: sekundy, minuty, godziny, dni, miesiące i lata.

PANEL RADAR

Dwie strzałki na panelu pokazują zorientowanie rakiety, w stosunku do wybranego obiektu centralnego. Czarna, długa strzałka, to chwilowy kierunek lotu, styczny do trajektorii lotu, wyliczonej z oddziaływań grawitacyjnych wszystkich obiektów symulacji. Czerwona strzałka pokazuje położenie rakiety (jej osi) w stosunku do kierunku lotu. Przy pracującym silniku, gdy oba kierunki są zgodne, rakieta będzie przyspieszać, przy przeciwnych zwrotach - hamować. Przy dowolnym innym układzie obu kierunków, ruch rakiety będzie stanowił wypadkową.



Rysunek 9 Panel RADAR. Kierunek lotu i odchylenia rakiety

Jeżeli oba kierunki są przeciwne, to przy włączonym silniku rakieta hamuje. Gdy prędkość rakiety zbliża się do zera następuje automatyczna zmiana kierunku lotu. Przy szczególnie niebezpiecznych manewrach nasz statek kosmiczny potrafi samodzielnie wyjść z tzw. „korkociągu”. W całym programie obowiązują również zależności kątowe pokazane na „radarze”: kąt zerowy zgodny z osią X układu kartezjańskiego i obrót zgodny z ruchem wskazówek zegara.

PRZYCIISK MOSTEK

Przycisk znajduje się w lewym górnym rogu ekranu i umożliwia ponowne wyświetlenie na ekranie głównego panelu sterowniczego - MOSTEK. Panel można usunąć z ekranu, dlatego umieszczono ten przycisk dla bezpieczeństwa. Posłuży o zapewne też bardziej zaawansowanym użytkownikom, którzy będą modyfikować program.

PANEL MOSTEK

Panel ten służy jako mostek kapitański naszego statku kosmicznego, a także centrum obsługi programu. Tutaj wywołuje się też panele pomocnicze: KOMPUTER i PARAMETRY.

W dalszej części omówione zostaną poszczególne części panelu, w skład których wchodzi, kolejno od góry: CZAS - sterowanie czasem symulacji, WYKRES - sterowanie obszarem, po którym poruszają się obiekty, STEROWNIA - sterowanie rakieta i OBSŁUGA - część zarządzająca symulacją.



Rysunek 10 Panel MOSTEK

CZAS - sterowanie czasem symulacji. Zdecydowano się na dość szeroki zakres czasu, aby była możliwość przeprowadzania różnorodnych symulacji. Skok upływu czasu można zmieniać w zakresie od setnych części sekundy do kilku lat, możliwa jest także zmiana kierunku upływu czasu.



Rysunek 11 Sterowanie czasem symulacji

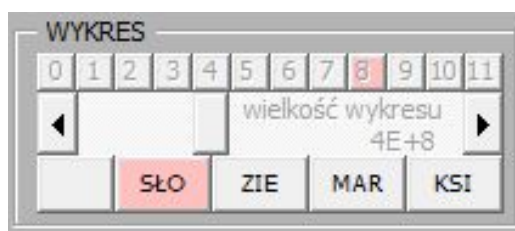
Przyciski zmiany przyrostu czasu. Sześć górnych przycisków odpowiada za ustawienie głównego skoku upływu czasu symulacji. Zgodnie z nazwą (od prawej): przycisk SEK - skok upływu czasu wynosi dokładnie jedną sekundę. MIN - skok upływu czasu wynosi dokładnie 1 minutę, czyli 60 sekund. W podobny sposób działają pozostałe górne przyciski. Czas symulacji możemy obserwować na panelu KOMPUTER i dodatkowo na panelu MOSTEK. Jeżeli skok upływu czasu zmieniony został suwakiem, to po naciśnięciu jednego z opisywanych przycisków, zawsze wracamy do skoku jednostkowego, np. wynosił 15 sekund, to po wciśnięciu przyciski SEK skok będzie wynosił dokładnie jedną sekundę.

Suwak zmiany przyrostu czasu. Suwak znajdujący się pod przyciskami służy do dokładnego ustawiania: zwiększania bądź zmniejszania upływu czasu. Jeżeli górnym przyciskiem ustawiliśmy upływający czas w sekundach (przycisk SEK), to automatycznie ustawiany jest skok wynoszący dokładnie 1 sekundę. Suwakiem natomiast możemy korygować ustawienie głównego czasu w granicach 0 do 60 sekund co 0,01 sekundy. Jeżeli górnym przyciskiem ustawiono skok wynoszący 1 godzinę (jak na rysunku), to suwakiem można zmieniać dodatkowo skok w granicach 0 do 24 godzin, co 0,01.

Przyciski zmiany kierunku czasu. Z lewej strony suwaka znajduje się przycisk oznaczony „+/_”, którym zmieniamy kierunek upływu czasu. W ten prosty sposób możemy prześledzić całą symulację wstecz. Należy jednak mieć tu na uwadze fakt, że obliczenia są cały czas przeprowadzane na bieżąco i kolejne błędy związane z niedokładnością obliczeń mogą spowodować drobne odchylenia.

Przyciski zmiany jednostki czasu. Sześć dolnych przycisków (noszących identyczne nazwy, ale małymi literami) służy do zmiany sposobu pokazywania upływającego czasu - zmiany jednostki czasu. Na rysunku zaznaczono przycisk „sek”, co oznacza, że upływ czasu pokazywany jest w sekundach. A skoro górny przycisk ustawiony jest na skok godzinowy, to czas będzie zmieniał się dokładnie co 3600 sekund.

WYKRES - sterowanie wielkością obszaru roboczego. W tej części możemy skalować wykres (osie wykresu) oraz wybierać obiekt, który będzie umieszczony centralnie na wykresie.



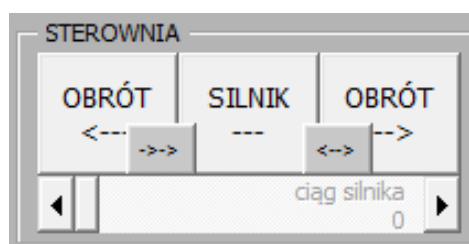
Rysunek 12 Sterowanie wielkością wykresu i obiektem centralnym

Przyciski głównej skali wykresu. Za pomocą małych przycisków możemy ustawić główny rozmiar skali wykresu - wykładnik potęgi, w przedziale od 0 do 11.

Suwak zmiany skali wykresu. Suwak pozwala na dokładne ustawienia w granicach 1 do 10 ze skokiem 0,01. Przyciski wraz suwakiem pozwalają więc zmieniać skalę wykresu (maksymalny i minimalny wymiar osi X i Y wykresu) w przedziale od 1 do 9,99E+11. Po osiągnięciu maksimum (minimum) na skali, wartości suwaka są automatycznie zwiększane (zmniejszane) o jeden rząd wielkości.

Przyciski zmiany obiektu centralnego. Pięć przycisków poniżej suwaków służy do ustawiania obiektu centralnego. Standardowo obiektem centralnym staje się obiekt, który w parametrach startowych ma ustawione zerowe współrzędne X i Y. Może to być na przykład Słońce, jeśli symulacja dotyczy ruchu planet wokół Słońca lub też Ziemia, gdy symulujemy start rakiety z powierzchni Ziemi. Obiekt centralny podobnie zresztą jak i wielkość wykresu, możemy w każdej chwili zmieniać. Napisy na przyciskach pojawiają się po zdefiniowaniu nazw obiektów w parametrach.

STEROWNIA. Sterowanie naszym statkiem kosmicznym jest bardzo uproszczone. Możemy nim obracać w obie strony, uruchamiać i zatrzymywać silnik oraz zmieniać siłę ciągu.



Rysunek 13 Sterowanie pracą silnika rakiety

Przyciski OBRÓT. Dwa duże przyciski OBRÓT, służą do obracania rakiety wokół swojej osi. Kliknięcie w przycisk powoduje, że rakieta zacznie się automatycznie obracać, co sygnalizowane jest zmianą koloru przycisku, a na panelu RADAR zmienia się kąt pochylenia czerwonej strzałki. Powtórne wciśnięcie przycisku zatrzymuje obrót rakiety. Szybkość tej zmiany regulowana jest odpowiednim parametrem i standardowo wynosi jeden stopień.

Jak należy przypuszczać, w znacznym stopniu uproszczono również i ten element programu. Po pierwsze: obrót rakiety nie powoduje utraty paliwa. Zużywa się go niewielka ilość i nie powoduje istotnych zmian w trajektorii lotu. Po drugie: obracamy rakieta tylko w płaszczyźnie dwuwymiarowej. I po trzecie: bardziej złożona jest sama technika obracania i zatrzymywania obrotu.

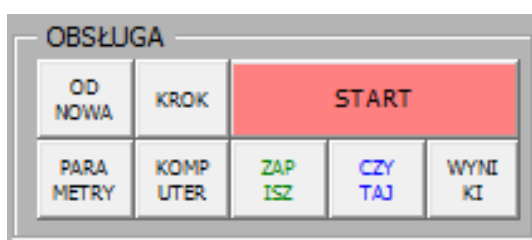
Przyciski wyrównania osi rakiety i kierunku lotu. Dwa małe przyciski oznaczone symbolami „→→” i „←←” ustawiają automatycznie oś rakiety zgodnie lub przeciwnie z osią lotu. Przydaje się to w praktycznych manewrach rakieta.

Przycisk SILNIK. Duży przycisk SILNIK służy do włączania i wyłączania silnika rakiety. Jeżeli oś rakiety jest ustawiona zgodnie z kierunkiem lotu - rakieta przyspiesza, gdy oś jest zorientowana przeciwnie - hamuje. Jeżeli oś lotu nie pokrywa się z osią rakiety - wyliczana jest wypadkowa. Kąt pochylenia rakiety można zmieniać w trakcie pracy silnika przyciskami OBRÓT.

Suwak zmiany ciągu silnika. Suwak poniżej przycisków służy do zmiany ciągu silnika w granicach 0 (silnik nie pracuje) do 100000 jednostek. Początkowo suwak jest ustawiany zgodnie z podanymi w parametrach: szybkością spalania i szybkością wypływu spalin, jako ich iloczyn. Suwak siły ciągu działa w zakresach: 0-10, 10-100, 100-1000 itd. w zależności od aktualnej siły ciągu. Przeciągnięcie suwaka w lewo lub w prawo spowoduje przejście do następnego zakresu.

Tak duży zakres siły ciągu może powodować bardzo duże przyspieszenia i przeciążenia. Maksymalną wartość przeciążenia można ustawić w parametrach. Po jej przekroczeniu, siła ciągu zostanie automatycznie zmniejszona do wartości zależnej od podanej w parametrach maksymalnej wielkości przeciążenia.

OBSŁUGA. Uruchamianie i zatrzymywanie eksperymentu, wywoływanie dodatkowych paneli oraz zapis i odczyt parametrów.



Rysunek 14 Obsługa symulacji

Przycisk OD NOWA. Przycisk służy do restartowania symulacji - wszystkie parametry wracają do wartości początkowych.

Przycisk KROK. Przycisk umożliwia symulację „krok po kroku”. Kolejny etap symulacji wyliczany jest zgodnie z przyjętym skokiem upływu czasu, po czym następuje zatrzymanie symulacji.

Przycisk START - STOP. Uruchamiamy symulację, która przebiega w sposób automatyczny zgodnie z ustawionym skokiem upływem czasu. Przycisk zmienia swój

kolor na czerwony i pojawia się napis STOP. Powtórne wciśnięcie przycisku zatrzymuje animację, przycisk zmienia kolor na niebieski i pojawia się napis START. Symulacja może być nadal kontynuowana, po ponownym wciśnięciu przycisku.

Przycisk PARAMETRY. Wywołujemy na ekran panel PARAMETRY, w którym można zmieniać wszystkie ustawienia symulacji. Obsługa panelu omówiona zostanie w osobnej części pracy. Ponowne wciśnięcie przycisku zamyka panel z jednoczesnym zapamiętaniem wszystkich zmian.

Przycisk KOMPUPER. Wywołujemy na ekran panel KOMPUPER, który pokazuje parametry rakiety. Ponowne wciśnięcie przycisku zamyka panel.

Przycisk ZAPISZ. Przycisk umożliwia zapisanie na dysku aktualnej konfiguracji programu. Pojawia się standardowe okno zapisu, w którym wybieramy miejsce i nazwę zapisywanego dokumentu. Konfiguracja zapisywana jest z rozszerzeniem „GRA”. Doświadczony użytkownik może edytować taki plik, gdyż jest to typowy arkusz kalkulacyjny. Dodać należy, że nie jest zapamiętywany aktualny stan, widoczny na ekranie, ale tylko ustawienia parametrów startowych.

Przycisk CZYTAJ. Pobieramy konfigurację ustawień początkowych, zapisaną wcześniej na dysku. Automatycznie wyszukiwane są pliki z rozszerzeniem „GRA”. Po odczytaniu konfiguracji symulacja zawsze rozpoczyna się od stanu zerowego.

Przycisk WYNIKI. Po wciśnięciu przycisku (zmienia swój kolor na różowy) zapisywane są wszystkie wartości chwilowe na osobnym arkuszu WYNIKI. Po ponownym wciśnięciu zapisywanie zostanie zakończone. Zapisywane są położenia, prędkości, przyspieszenia wszystkich obiektów oraz energia kinetyczna i potencjalna. Można zapisać maksymalnie 65000 kolejnych cykli obliczeniowych. Zapisane wartości można zapisać na dysku w osobnym skoroszycie. Wszystkie dodatkowe opcje dostępne są po przejściu na zakładkę INNE 1 w panelu PARAMETRY.

WARTOŚCI CHWILOWE

Na arkuszu, w komórkach B9..H16, bezpośrednio pod wykresem, wstawiane są wartości chwilowe, wyliczane przez program. Są one niezbędne do wizualizacji symulacji. Korzysta z nich między innymi wykres, na którym tworzona jest cała symulacja. Przykładowo kolumny X i Y, to współrzędne punktów pojawiających się na wykresie. W pozostałych kolumnach przechowywane są prędkości i przyspieszenia obiektów, a pod tabelą wyliczana jest energia całkowita układu.

	X	Y	Vx	Vy	Ax	Ay
RAKIETA	2,8422E-14	6377,9713	29,9	-0,0393753	-4,368E-12	-0,009844
O1	-119,6	-150000000	2,9414E-17	7,5298E-11	1,4707E-17	1,8825E-11
O2	0	0	29,9	-2,346E-05	-4,385E-12	-5,866E-06
O3	-23,2	780000000	24,1	-1,021E-05	-1,08E-12	-2,553E-06
O4	3,688	384400	30,822	-3,431E-05	-3,08E-11	-8,578E-06
ENERGIA	-8,591E+27	-8,591E+27	-1,792E-13			
	max	min	%			

Rysunek 15 Arkusz z obliczeniami w trakcie symulacji

Kolumny ze współzrędnymi obiektów są niezbędne dla wykresu, a pozostałe służyły w czasie testowania programu. Doświadczony użytkownik arkusza może wykorzystać ją do swoich własnych badań. Wszystkie obliczenia w tabeli podawane są w skali bezwzględnej (względem początku układu współzrędných), a nie względem wybranego w danym momencie obiektu centralnego.

PANEL PARAMETRY

Panel składa się z sześciu zakładek: RAKIETA, OBIEKT 1, OBIEKT 2, OBIEKT 3, OBIEKT 4, INNE, na których ustawiamy: parametry rakiety, czterech obiektów i wszystkie pozostałe, wśród nich m.in. wartość stałej grawitacji. Większość wartości dotyczących symulowanych obiektów wpisujemy ręcznie do białych pól zgodnie z uwagą umieszczoną w dolnej części panelu. Liczby dziesiętne powinny być wpisywane z przecinkiem, a do zapisu bardzo dużych (małych) liczb możemy używać notacji naukowej. Na przykład masa rakiety na następnym rysunku wynosząca 3000000 może być zapisana w postaci 3E+6. Obowiązujące jednostki widoczne są w lewej, górnej części panelu. W polach nie można przeprowadzać obliczeń.

Przycisk OK.

Zatwierdzamy wszystkie zmiany dokonane w parametrach początkowych. Po ponownym uruchomieniu symulacji będą obowiązywały nowe parametry.

Przycisk ANULUJ.

Wpisane parametry nie są zapisywane - pozostajemy przy ustawieniach poprzednich. Niektóre z ustawianych wielkości nanoszone są jednak w sposób automatyczny, np. wielkość wykresu i w takim przypadku program nie wraca do wartości poprzednich.

Rysunek 16 Panel PARAMETRY

Zakładka RAKIETA zawiera wszystkie ustawienia dotyczące pojazdu kosmicznego, którym możemy sterować w trakcie symulacji. Ponieważ jest to obiekt szczególnie, dlatego pole to zawiera szereg elementów, które nie występują w zakładkach innych obiektów.

PARAMETRY

RAKIETA | OBIEKT 1 | OBIEKT 2 | OBIEKT 3 | OBIEKT 4 | INNE | INNE1

RAKIETA

Nazwa: RAKIETA

Wykres: KOLOR 8

x: 0

Vx: 0 =

Masa: 3000000

Paliwo: 2700000

Spalanie: 250

Spaliny: 13,8634 =

Siła ciągu: 34000,0 =

jednostki
[km] [kg] [s]

Rozmiar: []

y: 6378,05

Vy: 0 =

Promień: 0,05

Prędkość: 0 =

Kąt lotu: 270 =

Kąt rakiety: 270

Skok obrotu: 1

Spalaj paliwo
 Włącz silnik od startu
 Uwzględniaj rakieta w obliczeniach

GRAWITACJA (freeware)
Wacław Libront Bobowa 2012

Anuluj

OK

liczby rzeczywiste z PRZECINKIEM: 9,99
notacja naukowa: 9,99E8 0,1E+8 9,99E-08

Rysunek 17 Panel PARAMETRY. Ustawienia początkowe rakiety

Pole NAZWA. Trzy pierwsze litery wpisanej nazwy obiektu będą wyświetlane na odpowiednich przyciskach panelu MOSTEK.

Pole JEDNOSTKI. Pole pokazuje obecnie obowiązujące jednostki, które zależą oczywiście od wybranej stałej grawitacji na zakładce INNE. Ponieważ rakieta jest specjalnym obiektem, ze względu na swoje bardzo małe wymiary i masę w stosunku do normalnych kosmicznych obiektów, dlatego też tylko na tej zakładce mamy możliwość przeliczania obowiązujących jednostek (zwłaszcza tych dużych) na kilogramy, metry i sekundy. Pole JEDNOSTKI jest właściwie przyciskiem do ich przeliczania. Wciśnięcie przycisku przelicza wartości w polach na kilogramy, metry i sekundy, ponowne wciśnięcie spowoduje przeliczenie na jednostki zależne od stałej grawitacji. Więcej o przeliczaniu przy omawianiu stałej grawitacji na zakładce INNE.

Przycisk KOLOR. W standardowym okienku kolorów wybieramy kolor punktu na wykresie, który będzie symbolizował poruszającą się raketę.

Suwak - wielkość rakiety. Suwakiem ustawiamy wielkość punktu na wykresie w przedziale od 2 do 72. Na tyle pozwalają możliwości wykresów na arkuszu kalkulacyjnym.

Pola X i Y - położenie. Do pól wpisujemy początkowe położenie obiektu na wykresie. Przykład na rysunku dotyczy rakiety, która znajduje się na osi Y, w odległości 6378,05 od środka, co odpowiada powierzchni Ziemi.

Pola V_x i V_y - prędkość początkowa. Oba pola zawierają składowe prędkości. Przykład na rysunku dotyczy rakiety, która jest nieruchoma. Jeżeli rakietą ma początkowo znajdować się na powierzchni Ziemi, która porusza się wokół Słońca ze średnią prędkością 29,9, to również prędkość rakiety musi wynosić dokładnie 29,9. Jeżeli rakietą znajduje się na orbicie, to należy w odpowiedni sposób ustawić jej położenie (większe od sumy promienia rakiety i promienia planety) oraz nadać jej prędkość początkową równą co najmniej prędkości planety i pierwszej prędkości kosmicznej. Więcej o ustawieniach rakiety w rozdziale poświęconym gotowym symulacjom. Przyciski „=” przy obu polach służą do obliczania prędkości wypadkowej i kąta lotu rakiety na podstawie wpisanych składowych.

Pole MASA. Jeżeli masa obiektu wynosi zero, obiekt taki nie jest wyświetlany w obszarze symulacji - nie bierze udziału w obliczeniach.

Pole PROMIEN. Obiekty kosmiczne (gwiazdy i planety) są z natury kuliste, więc promień określa ich rzeczywisty rozmiar. Promień rakiety należy przyjąć w takim wypadku, jako wartość umowną. Ma ona jednak znaczenie podczas symulacji, gdyż zbliżenie się obiektów na odległość mniejszą niż suma ich promieni spowoduje wyświetlenie komunikatu o zderzeniu i zakończenie symulacji. Na rysunku rakietą ma promień 0,05 kilometra, czyli 50 metrów.

Omówione dotychczas parametry startowe rakiety mają identyczne znaczenie dla pozostałych czterech obiektów na kolejnych zakładkach. Nie można jedynie przeliczać jednostek. Pozostałe pola, omówione poniżej są charakterystyczne wyłącznie dla rakiety.

Pole PALIWO. Ilość paliwa powinna być mniejsza niż masa rakiety. Jeżeli włączymy silnik i w parametrach rakiety ustawimy spalanie paliwa, to silnik będzie działał do momentu wyczerpania się zapasów.

Pole SPALANIE. Ilość jednostek paliwa spalana w ciągu jednostkowego przyrostu czasu. Jeżeli masa paliwa podana jest w kilogramach, a czas przyrasta w sekundach, to w każdej sekundzie spalane jest (zgodnie z rysunkiem) 250 kilogramów paliwa. Jeżeli czas upływa szybciej (przyrost czasu wynosi np. 30 minut), to również co 30 minut zostanie spalone 250 kilogramów paliwa. Zależność ta nie jest zgodna z rzeczywistym spalaniem, ale dla płynności działania programu wygodniej jest postąpić w ten sposób. Mogło by się okazać, że w jednorazowym przyroście czasu spalane zostanie całe dostępne paliwo.

Pole SPALINY. Szybkość wypływu spalin z dyszy rakiety. Jeżeli odległości podajemy w kilometrach, to podana na rysunku wartość wynosi prawie 14 kilometrów na sekundę.

Pole SIŁA CIĄGU. Siła ciągu rakiety wyliczana z poprzednich dwóch wartości. Jeżeli jednostką szybkości spalania są kilogramy na sekundę, a jednostką szybkości wypływu spalin kilometry na sekundę, to siła ciągu obliczona zostanie w kiloniutonach - na rysunku 34000 kN. Przyciski „=” przy obu polach służą do obliczania szybkości spalin, jeśli podane jest szybkość spalania i siła ciągu lub siły ciągu, jeśli podane są obie szybkości.

Pola PRĘDKOŚĆ, KĄT LOTU i KĄT RAKIETY. Prędkość wypadkowa rakiety i kąt lotu (identyczny jak kąt rakiety), który za pomocą przycisku „=” możemy przeliczyć na składowe prędkości V_x i V_y . Jeżeli nie ma określonych początkowych wartości prędkości rakiety (V_x i V_y), to rakieta zostanie ustawiona pod wpisaniem do pola „kąt rakiety” kątem; gdy jest ustawiona prędkość, to kąt jest wyliczany z wypadkowej tych dwóch wartości. Pole „kąt lotu” nie odgrywa tutaj żadnej roli. Na rysunku obie wartości mają wartość 270 (stopni), co oznacza, że początkowo rakieta obrócona jest pionowo do góry (patrz wartości kątów na „radarze”).

Pole SKOK OBRÓTU. Gdy naciskamy przyciski OBRÓT na panelu MOSTEK, to rakieta się obraca wokół swojej osi, zmienia się kąt pochylenia rakiety. Rakieta obraca się automatycznie: w każdym kolejnym kroku czasowym o wpisaną do pola wartość. Na rysunku wartość wynosi 1 (stopień).

Pole wyboru SPALAJ PALIWO. Gdy pole jest zaznaczone, to po wciśnięciu przycisku SILNIK na panelu MOSTEK, zaczyna pracować silnik rakiety i spalane jest paliwo (w ilości zgodnej z polem SPALANIE). Jego ilość jest zmniejszana i kontrolowana. Po wyczerpaniu zapasów paliwa silnik nie może dalej pracować. Jednocześnie ze zmniejszającą się ilością paliwa zmniejsza się masa rakiety, która może nabierać większych przyspieszeń (zgodnie z równaniem Ciołkowskiego). Gdy pole nie jest zaznaczone - silnik może pracować cały czas. W takim wypadku masa paliwa i masa rakiety nie ulegają zmianom.

Pole wyboru WŁĄCZ SILNIK OD STARTU. Gdy pole jest zaznaczone i włączymy symulację (przycisk START na panelu MOSTEK), to zaraz po rozpoczęciu symulacji silnik zaczyna pracować. Jest to opcja stosowana, gdy chcemy automatycznie wystartować rakieta z powierzchni Ziemi. Każda zwłoka, gdy rakieta jest na powierzchni spowoduje natychmiastowe zderzenie.

Pole wyboru UWZGLĘDNIJ RAKIETĘ W OBLICZENIACH. Jeżeli zaznaczymy pole, to rakieta będzie uwzględniana w obliczeniach, musi mieć jednak masę większą od zera.

Zakładki OBIEKT1, OBIEKT 2, OBIEKT 3, OBIEKT 4. Przyciski, suwaki i pola wyglądają i działają dokładnie tak samo, jak opisywane poprzednio na zakładce RAKIETA (oprócz oczywiście przeliczania jednostek). Na zamieszczonym rysunku wpisane są dane nieruchomego Słońca, umieszczonego w środku obszaru roboczego.

OBIEKT 1

Nazwa: SŁOŃCE

jednostki: [km] [kg] [s]

Wykres: KOLOR 40 Rozmiar: []

x: 0 y: 0

Vx: 0 Vy: 0

Masa: 1,99E+30 Promień: 696000

Rysunek 18 Panel PARAMETRY. Ustawienia początkowe czterech obiektów

Zakładka INNE zawiera szereg parametrów ogólnych, wśród których należy zwrócić uwagę na stałą grawitacji, od wartości której zależą jednostki, którymi będziemy się posługiwać podczas definiowania obiektów.

PARAMETRY

RAKIETA | **OBIEKT 1** | OBIEKT 2 | OBIEKT 3 | OBIEKT 4 | INNE

Stała grawitacji

[m][kg][s]

[km][kg][s]

[AU][MS][s]

inne

6,67E-20

Algorytm

EULER

EULER (ulepsz)

VERLET

RUNGE-KUTTA

Obiekt centralny

SŁOŃCE

ZIEMIA

MARS

KSIEŻYC

Wykres: 4E8 KOLOR

X0: 0 osie wykresu niewidoczne

Y0: 0

Obszar roboczy: 633 USTAW

Skok czasu: 86400 czas rzeczywisty

Przeciążenie: 5 [g] maksymalna wartość przeciążenia

Kompensacja: oś rakiety jest ustawiana zgodnie z torem lotu

Anuluj

OK

liczby rzeczywiste z PRZECINKIEM: 9,99
notacja naukowa: 9,99E8 0,1E+8 9,99E-08

Rysunek 19 Panel PARAMETRY - zakładka INNE

Pole STAŁA GRAWITACJI. Jest to fundamentalne pole dla symulacji komputerowej. Od stałej zależą jednostki, którymi będziemy się posługiwać, w których będziemy wpisywać parametry startowe rakiety i obiektów. Dostępne pola opcji pozwalają wybrać spośród: [m][kg][s] - 6,67E-11, [km][kg][s] - 6,67E-20, [AU][AS][s] - 3,96E-14 oraz inne. Jednostka AU, to średnia odległość Ziemi od Słońca, MS - masa Słońca. Po wybraniu opcji INNE, możemy wpisać do pola dowolną wartość stałej grawitacji; pamiętać należy w takim wypadku, że wszystkie inne parametry (odległości, masy i ich pochodne) będą miały konkretnie określonych jednostek.

Pole ALGORYTM. Określamy sposób (algorytm) wykonywania obliczeń. W program zaimplementowano cztery popularne algorytmy: elementarny Eulera, ulepszony algorytm Eulera, algorytm prędkościowy Verleta i algorytm Rungego-Kutty czwartego rzędu. Dla każdego algorytmu obliczenia nieznacznie różnią się od siebie, co skutkuje niewielkimi zmianami w trajektorii lotu. Szybkość symulacji nie ulega zasadniczym zmianom, mimo różnego stopnia skomplikowania algorytmów.

Pole OBIEKT CENTRALNY. Wybieramy obiekt który ma zostać ustawiony po starcie, jako centralny na wykresie. W trakcie symulacji można oczywiście zmieniać obiekt centralny odpowiednimi przyciskami na panelu MOSTEK. Dodać należy również, że wartości pokazywane na panelu KOMPUTER będą przeliczane względem wybranego obiektu centralnego. Gdy symulacja dotyczy na przykład ruchu planet wokół Słońca, to Słońce właśnie jest obiektem centralnym, ale w każdej chwili możemy wcisnąć przycisk ZIE i od tej chwili Ziemia staje się obiektem, z punktu widzenia którego obserwujemy ruch pozostałych obiektów.

WYKRES. Suwakiem ustawiamy początkową wielkość wykresu. Przyciskiem KOLOR wywołujemy standardowe okienko wybierania koloru, którym zmieniamy kolor tła wykresu. Pole wyboru OSIE WYKRESU NIEWIDOCZNE służy do usuwania (pokazywania) osi na wykresie.

X₀ i Y₀. Dwa pola, za pomocą których możemy przysunąć początek układu współrzędnych na wykresie, do wybranego punktu w układzie współrzędnych kartezjańskich. Mimo tego, że większość symulacji toczy się w środku wykresu, to na przykład symulację rzutów na płaszczyźnie wygodniej jest przesunąć w dół.

OBSZAR ROBOCZY. Suwak służy do ustawiania wielkości pola wykresu na ekranie monitora. Możemy ustawić ręcznie wielkość okna wykresu w granicach od 100 do 2400 pikseli. Standardowo wielkość okna jest automatycznie dopasowywana, zaraz po uruchomieniu programu. Przycisk DOPASUJ służy do automatycznego dopasowania wielkości wykresu (obszaru symulacji) do rozmiarów okna arkusza kalkulacyjnego.

Pole SKOK CZASU. Wpisujemy początkowy skok kroku czasowego w sekundach. Dozwolone wartości mieszczą się w przedziale od -86400 do 86400 sekund, z dokładnością do 0,01. Na rysunku skok wynosi 3600 sekund, więc po uruchomieniu symulacji zostanie ustawiony automatycznie skok wynoszący dokładnie 1 godzinę.

Pole wyboru CZAS RZECZYWISTY. Jeżeli pole jest zaznaczone i krok czasowy wynosi 1 sekundę, to symulacja odbywa się w czasie rzeczywistym - dokładnie co jedną sekundę wyliczane są kolejne wartości i następuje kolejny krok

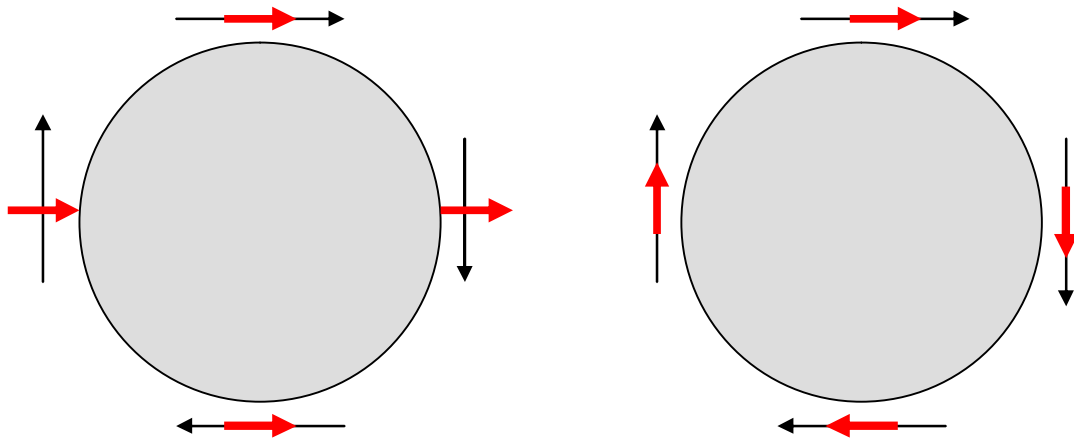
symulacji. Jeżeli pole nie jest zaznaczone symulacja przebiega tak szybko, jak szybko procesor komputera wyliczy wszystkie zależności i je przerysuje na ekranie.

Pole PRZECIĄŻENIE. Jeżeli siła ciągu rakiety jest zbyt duża, następuje gwałtowny wzrost przyspieszenia powodujący przeciążenie. Przeciążenia wyrażamy jako krotność przyspieszenia ziemskiego. I tak stan nieważkości to przeciążenie wynoszące $0g$, a na powierzchni Ziemi panuje przeciążenie $1g$.

Każda zmiana przyspieszenia powoduje napływ lub odpływ krwi w różnych organach człowieka, co przy dużych wartościach g może doprowadzić do ich uszkodzenia. Przeciążenia rzędu kilku g są zupełnie niegroźne dla organizmu człowieka (np. podczas jazdy samochodem). Przeciążenia dochodzące do kilkunastu g można doświadczyć na przykład podczas akrobacji samolotowych i jeśli są krótkotrwałe nie powodują trwałych uszkodzeń.

Pole PRZECIĄŻENIE służy do ograniczenia możliwości niekontrolowanego przyspieszania rakiety. Jeżeli wpisano (jak na rysunku) przeciążenia rzędu $5g$, to znaczy, że po przekroczeniu tej wartości, ciąg silnika zostanie automatycznie zmniejszony, do wartości przy której przyspieszenie będzie mniejsze lub równe.

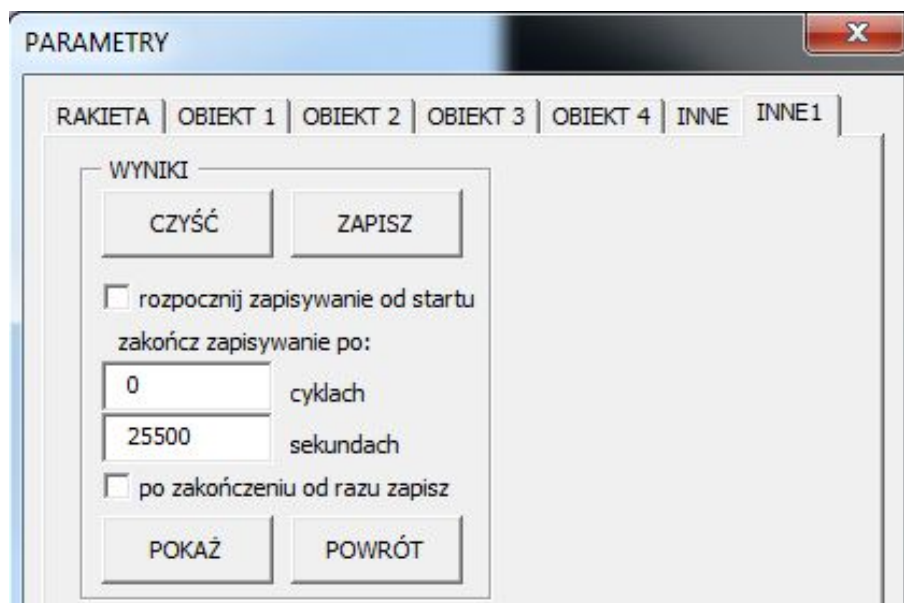
Pole KOMPENSACJA. Podczas lotu orbitalnego prom kosmiczny może zachowywać się w dwojaki sposób pokazany na poniższych rysunkach. Jeżeli oś promu nie jest automatycznie wyrównywana z osią lotu, to mamy do czynienia z sytuacją po lewej stronie. Jeżeli natomiast pojazdowi kosmicznemu zostanie nadany pewien początkowy obrót, to oś pojazdu wyrównuje się z osią lotu i mamy do czynienia z sytuacją przedstawioną na rysunku po prawej stronie.



Rysunek 20 Zachowanie się pojazdu kosmicznego na orbicie

Pole KOMPENSACJA pozwala określić opisane wyżej zachowanie pojazdu kosmicznego. Pole włączone powoduje, że kierunek lotu rakiety będzie zawsze dopasowywany do kierunku lotu bez udziału użytkownika, tzn. użytkownik nie musi wciskać przycisków OBRÓT. Opisana sytuacja dotyczy lotu bez włączonych silników.

Zakładka INNE1. Zakładka związana jest z arkuszem WYNIKI (opisanym w dalszej części), na którym użytkownik programu może zapisywać wartości chwilowe obliczane w trakcie symulacji. Dzięki temu możemy prowadzić dalsze obliczenia, rysować trajektorie, a program staje się narzędziem badawczym.



Rysunek 21 Obsługa zapisywania wyników chwilowych - panel PARAMETRY

Możemy ustawić kiedy może rozpocząć się zapisywanie wyników, jak długo ma trwać i kiedy ma się zakończyć. Jeżeli pola CYKLACH i SEKUNDACH są puste lub zawierają wartość zero, to zatrzymanie zapisywania nastąpi, gdy użytkownik ponownie naciśnie na panelu MOSTEK przycisk WYNIKI. Jeżeli w polach znajdują się wartości, to zapisywanie (i symulacja) zostanie zatrzymana po ich przekroczeniu. Jeżeli oba pola są wypełnione liczbami, to zapisywanie zostanie zatrzymane po osiągnięciu wartości krytycznej przez pierwszy z przekroczonych warunków.

Przycisk CZYŚĆ. Usuwa wszystkie wartości z komórek. Pierwszy wiersz z opisami kolumn i przyciski pozostają oczywiście bez zmian

Przycisk ZAPISZ. Pojawia się typowe okienko do zapisu, w którym możemy wybrać miejsce i określić nazwę pliku. Arkusz WYNIKI zapisywany jest w typowym formacie Excela.

Pole opcji ROZPOCZNIJ ZAPISYWANIE OD STARTU. Jeżeli pole jest zaznaczone, to użytkownik nie będzie musiał wciskać przycisku WYNIKI na panelu MOSTEK, aby rozpocząć zapisywanie wyników.

Pole CYKLACH. Zapisywanie zostanie zakończone dokładnie po wykonaniu wpisanej ilości pętli głównej programu.

Pole SEKUNDACH. Zapisywanie zostanie zakończone po przekroczeniu wpisanej ilości sekund symulacji.

Pole opcji PO ZAKOŃCZENIU OD RAZU ZAPISZ. Jeżeli pole jest zaznaczone, to po zakończeniu zapisywania pojawi się automatycznie możliwość zapisania wyników w zewnętrznym pliku (i wyczyszczenia arkusza z wynikami).

Przycisk POKAŻ. Możemy podglądać arkusz z wynikami. Ponieważ jest to typowy arkusz kalkulacyjny, można na nim prowadzić wszystkie operacje dostępne na arkuszu, min. prowadzić obliczenia i rysować wykresy. Jest to jednak nie wskazane. Bezpieczniej jest zapisać arkusz w osobnym pliku.

Przycisk POWRÓT. Wracamy do arkusza z symulacją.

ARKUSZ WYNIKI

Po włączeniu zapisywania wyników, na tym arkuszu zapisywane są wartości chwilowe wszystkich obiektów. Można je wykorzystać do dalszych obliczeń, tworzenia wykresów itp. Każda wartość w osobnej kolumnie dla wszystkich pięciu obiektów symulacji: położenie, prędkość, przyspieszenie, czas oraz energia kinetyczna i potencjalna całego układu oraz wartości startowe układu.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
	CZYŚĆ									
	ZAPISZ									
1	WRÓĆ	czas	X _r	Y _r	X ₁	Y ₁	X ₂	Y ₂	X ₃	Y ₃
2		RAKIETA	SŁOŃCE	ZIEMIA	MARS	KSIĘŻYC				
3	X	0	0	0	0	0				
4	Y	1,5E+08	0	1,5E+08	2,28E+08	1,5E+08				
5	V _x	37,8	0	29,9	24,1	30,822				
6	V _y	0	0	0	0	0				
7	M	10000	1,99E+30	6E+24	6,4E+23	7,35E+22				
8	R	0,05	696000	6378	3393	3476				
9										
10										
11	1	60	2268	1,5E+08	0	3,39E-08	1794	1,5E+08	1446	2,28E+
12	2	120	4533,902	1,5E+08	7,94E-13	1,36E-07	3588	1,5E+08	2892	2,28E+
13	3	180	6795,624	1,5E+08	3,18E-12	3,05E-07	5382	1,5E+08	4338	2,28E+
14	4	240	9051,114	1,5E+08	7,94E-12	5,42E-07	7176	1,5E+08	5784	2,28E+
15	5	300	11298,37	1,5E+08	1,59E-11	8,47E-07	8970	1,5E+08	7230	2,28E+

Rysunek 22 Arkusz WYNIKI - zapisane przez użytkownika wartości chwilowe

W lewym górnym rogu znajduje się trzy przyciski do obsługi arkusza WYNIKI: CZYŚĆ, ZAPISZ i WRÓĆ, które mają podobne znaczenie, jak opisywane wcześniej przyciski znajdujące się w zakładce INNE1 na panelu PARAMETRY.

Przycisk CZYŚĆ. Usuwa wszystkie wartości z komórek. Pierwszy wiersz z opisami kolumn i przyciski pozostają oczywiście bez zmian.

Przycisk ZAPISZ. Pojawia się typowe okienko do zapisu, w którym możemy wybrać miejsce i określić nazwę pliku. Arkusz WYNIKI zapisywany jest w typowym formacie Excela.

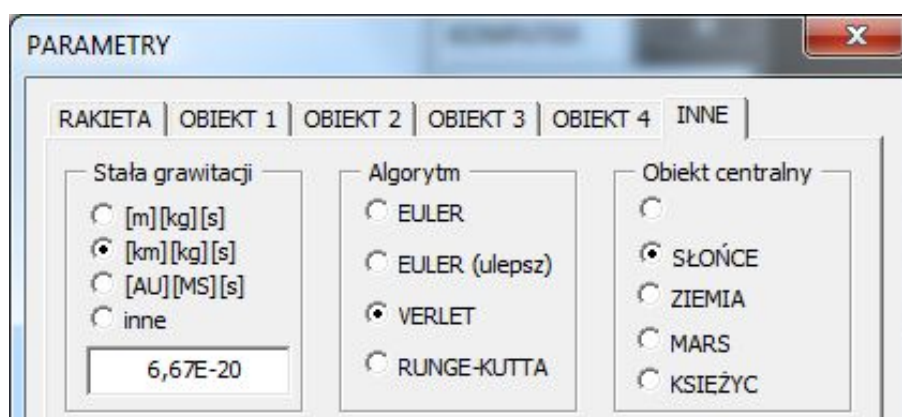
Przycisk WRÓĆ. Pozwala powrócić do symulacji.

GOTOWE SYMULACJE

Suchy opis możliwości programu nie ułatwi posługiwania się nim w praktyczny sposób. Dlatego też opisane zostaną w tej części konkretne przykłady począwszy od ustawienia parametrów początkowych układu, aż po operowanie przyciskami na MOSTKU kapitańskim. Wszystkie parametry wpisane są w jednostkach zależnych od wielkości stałej grawitacji. Jeżeli nie podano tego w sposób konkretny, to stała grawitacji wynosi $6,67 \cdot 10^{-20} \text{ [km}^3\text{s}^{-2}\text{kg}^{-1}]$ i posługujemy się kilometrami, sekundami i kilogramami. Dane gwiazd i planet są zgodne z rzeczywistymi. Opisywana rakietą, to używana w amerykańskich programach SATURN V (wysokość 110 metrów, masa całkowita ok. 3000000 kilogramów, masa paliwa ok. 2700000 kilogramów, szybkość spalania paliwa w pierwszym członie ok. 250 kilogramów na sekundę, ciąg pierwszego członu ok. 34000 kiloniutonów). W symulacjach wykorzystujemy także wahadłowiec amerykański ATLANTIS (masa - ok. 100 ton, bez rakiety startowej, łącznie z paliwem, masa paliwa - 22 tony, wysokość około 46 metrów, siła ciągu silniczków manewrowych - 27 kiloniutonów).

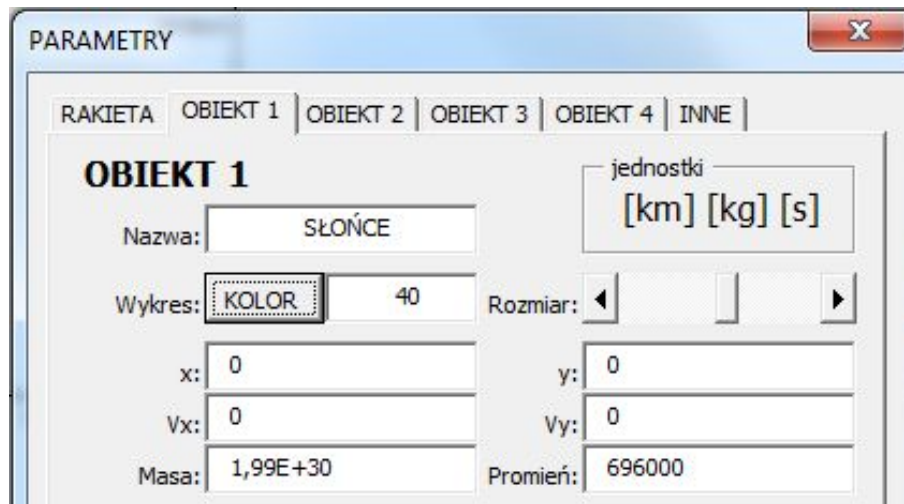
SŁOŃCE - ZIEMIA - KSIEŻYC - MARS

Parametry startowe. W programie mamy możliwość zdefiniowania do czterech obiektów, więc układ Słońce - Ziemia - Księżyc - Mars będzie najbardziej odpowiedni. Gotowe ustawienia znajdują się w pliku „SŁOŃCE.GRA”. Do układu nie wprowadzamy rakiety, więc będziemy mogli jedynie obserwować ruchy planet. Wszystkie wielkości wprowadzamy zgodnie z ustawioną w panelu PAREMATRY, zakładka INNE stałą grawitacji, czyli w kilogramach, kilometrach i sekundach.



Rysunek 23 Parametry startowe. Stała grawitacji

Słońce znajduje się w centrum naszego układu współrzędnych i jest jednocześnie punktem odniesienia dla pozostałych obiektów. Parametry dla Słońca przedstawia poniższy rysunek.



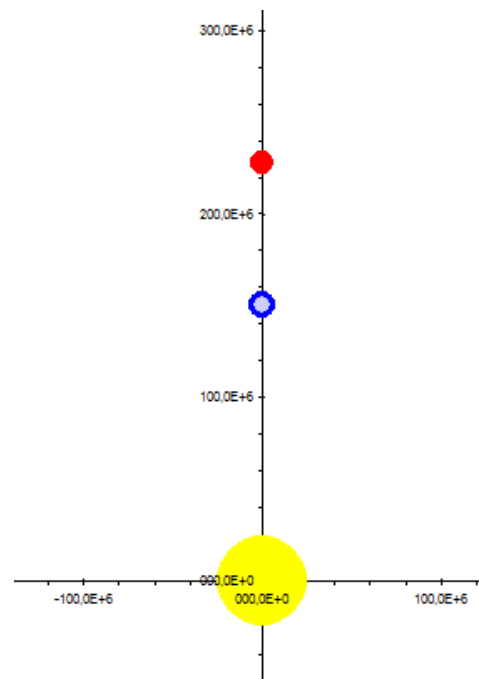
Rysunek 24 Parametry startowe Słońca

Ponieważ Słońce znajduje się w centrum i nie porusza się, dlatego współrzędne X i Y oraz V_x i V_y są wyzerowane. Masa słońca w kilogramach - około $1,99E+30$, a jego promień w kilometrach, to 696000. Dodatkowo wpisujemy nazwę obiektu (pierwsze trzy znaki pojawią się na przycisku panelu MOSTEK) oraz rozmiar gwiazdy na wykresie (suwakiem) i kolor (za pomocą przycisku KOLOR). Na wykresie pojawi się żółte koło o rozmiarze 40 punktów.

W podobny sposób określamy parametry pozostałych obiektów, biorąc jako punkt odniesienia obiekt centralny, podczas obliczania położenia i prędkości. Parametry dla Ziemi, Marsa i Księżyca przedstawiają poniższe rysunki.

W jaki sposób najwygodniej rozmieścić pozostałe planety? Ponieważ program nie jest „astronomicznym obserwatorium” i nie musimy przejmować się odzwierciedleniem aktualnego stanu „nieba”, a tylko wzajemnymi odległościami i prędkościami, dlatego nie musimy przejmować się początkowymi położeniami. Autor wyszedł z założenia, że najprościej będzie umieścić je na jednej osi w odpowiednich odległościach. Nic jednak nie stoi na przeszkodzie, aby ambitny badacz ustawił planety zgodnie z aktualnym stanem.

Ziemia znajduje się w odległości około $1,5E+8$ kilometrów od Słońca. Porusza się w stosunku do Słońca ze średnią szybkością liniową wynoszącą około 29,9 kilometrów na sekundę. Na wykresie będzie widoczne koło o średnicy 12 punktów w kolorze niebieskim.



Rysunek 25 Początkowe ustawienie obiektów na wykresie

The screenshot shows a software window titled 'PARAMETRY' with a tabbed interface. The 'OBIEKT 2' tab is selected. The parameters for 'OBIEKT 2' are as follows:

Parameter	Value
Nazwa	ZIEMIA
Wykres	KOLOR 12
x	0
Vx	29,9
Masa	6E+24
y	150000000
Vy	0
Promień	6378

Additional settings include 'jednostki' set to '[km] [kg] [s]' and 'Rozmiar' with a slider.

Rysunek 26 Parametry startowe Ziemi

Mars: masa $6,4E+23$, promień - 3393, odległość od Słońca - $2,28E+8$, szybkość liniowa - 24,1. Na wykresie koło o średnicy 10 punktów w kolorze czerwonym.

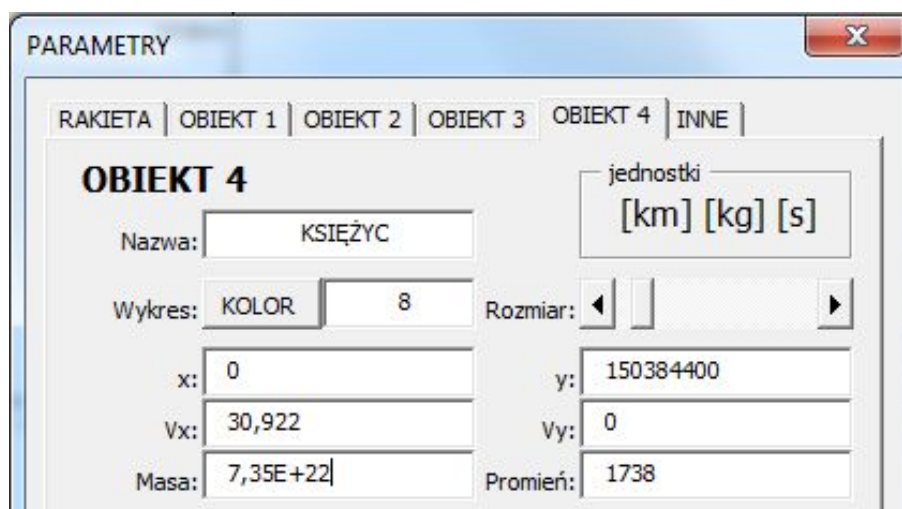
The screenshot shows a software window titled 'PARAMETRY' with a tabbed interface. The 'OBIEKT 3' tab is selected. The parameters for 'OBIEKT 3' are as follows:

Parameter	Value
Nazwa	MARS
Wykres	KOLOR 10
x	0
Vx	24,1
Masa	6,4E+23
y	228000000
Vy	0
Promień	3393

Additional settings include 'jednostki' set to '[km] [kg] [s]' and 'Rozmiar' with a slider.

Rysunek 27 Parametry startowe Marsa

Księżyc: masa - $7,35E+22$, promień - 1738, położenie - 150384400 (suma odległości Ziemi od Słońca i Księżycy od Ziemi), szybkość - 30,922 (suma szybkości Ziemi wokół Słońca - 29,9 i szybkości Księżycy wokół Ziemi - 1,022). Na wykresie koło o średnicy 8 punktów w kolorze szarym.



Rysunek 28 Parametry startowe Księżyca

Na zakładce INNE można ustawić dodatkowo początkową wielkość wykresu, wybrać obiekt centralny wykresu oraz skok czasu. Inne ustawienia nie wpływają na przebieg symulacji. Parametry zostaną zapamiętane, gdy naciśniemy przycisk OK, w dolnej części okienka PARAMETRY.

Po zatwierdzeniu parametrów wykres zostanie przerysowany i na panelu MOSTEK zostaną ustawione odpowiednie przyciski i suwaki.

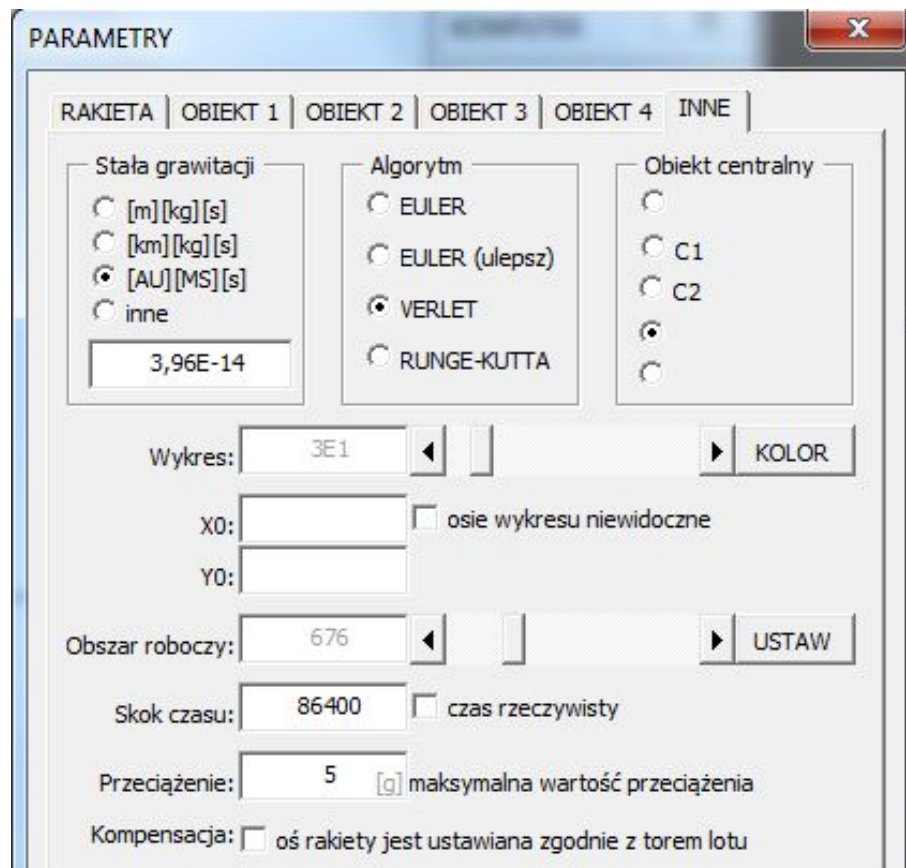
Uruchomienie i sterowanie. Symulację uruchamiamy niebieskim przyciskiem START. W każdej chwili możemy ją zatrzymać - tym samym przyciskiem, który teraz ma kolor czerwony i napis STOP, a po chwili znów uruchomić i kontynuować pokaz. Uruchomienie od początku z parametrami startowymi nastąpi po wciśnięciu przycisku OD NOWA. Użytkownik może dodatkowo sterować szybkością symulacji - szybkością upływającego czasu, za pomocą przycisków i suwaka umieszczonego w górnej części MOSTKA, znaczonej jako CZAS. Część MOSTKA oznaczona jako WYKRES służy do skalowania oraz wybierania obiektu centralnego na wykresie.

Uwagi dodatkowe. Początkowo obiektem centralnym jest Słońce. Gdy chcemy obejrzeć ruch planet z punktu widzenia Ziemanina, należy wcisnąć przycisk ZIE w części oznaczonej WYKRES na MOSTKU. Przycisk wciskamy dwa razy, gdyż cały układ jest przeliczany na bieżąco i nie zawsze jednokrotne naciśnięcie przynosi pożądany efekt. Gdy symulacja jest zatrzymana przycisk ZIE wciskamy jeden raz. Po wybraniu Ziemi, jako obiektu centralnego zmniejszamy rozmiar wykresu do np. $1E+6$ (przyciski i suwak w części WYKRES) i możemy zaobserwować ruch Księżyca wokół Ziemi. Jeżeli zmienimy skoku czasu np. do jednego dnia (wciskamy przycisk DZI), skutkuje to przyspieszeniem symulacji. Gdy obiektem centralnym stanie się Słońce (przycisk SŁO) możemy zaobserwować, że w tej skali Słońce wypełnia prawie cały obszar wykresu - to są rzeczywiste (w tej skali) wymiary tej gwiazdy. Ponieważ nie ma możliwości ustawienia punktów wykresu o dowolnej wielkości, dlatego też w ten częściowy sposób autor rozwiązał problem rzeczywistych rozmiarów obiektów. Trzeba tu jednak od razu stwierdzić, że taką własność posiada jedynie obiekt centralny. Próby rysowania rzeczywistych wymiarów wszystkich obiektów kończą się niepowodzeniem z powodu drastycznego spadku szybkości symulacji.

UKŁAD PODWÓJNY ALFA CENTAURI

Gwiazdy podwójne to takie, które położone są blisko siebie, oddziałują na siebie grawitacyjnie i krążą wokół wspólnego środka masy. Przykładem takiego układu jest układ gwiazd Alfa Centauri, który możemy zaobserwować na naszym niebie za pomocą teleskopu. Gotowe ustawienia znajdują się w pliku „ALFACENTAURI.GRA”.

Parametry startowe obu gwiazd przedstawiają poniższe rysunki. Masa większej gwiazdy to około 1,09 masy Słońca ($2,17e+30$ kilogramów), a masa mniejszej - około 0,92 masy Słońca ($1,83e+30$ kilogramów). Promienie obu gwiazd wynoszą odpowiednio: 1,1 oraz 1,0 promienia słońca. Wyrazimy parametry początkowe w bardziej odpowiednich astronomicznych wielkościach; posłużymy się odległością Ziemi od Słońca (AU) i masą Słońca (MS). Stała grawitacji tak opisana wynosi $3,96E-14$ [$AU^3 MS^{-1} s^{-2}$]. W zakładce INNE ustawiono również skok czasu wynoszący 86400 sekund, czyli jeden dzień. Jako obiekt centralny wybieramy pusty obiekt. Nie mamy go co prawda opisanego, ale tym sposobem gwiazdy będą krążyły wokół środka wykresu. Tło wykresu jest czarne, osie są niewidoczne.



Rysunek 29 Parametry startowe w układzie Alfa Centauri - zakładka INNE

Obie gwiazdy zostały opisane wcześniej. Wyjaśnienia wymaga jedynie wartość szybkości początkowej, która wyliczona została (w przybliżony sposób) z okresu obiegu wynoszącego około 80 lat.

x:	0	y:	11,85
Vx:	0,00000002	Vy:	0
Masa:	1,09	Promień:	1,1

Rysunek 30 Parametry startowe większej gwiazdy w układzie Alfa Centauri

x:	0	y:	-11,85
Vx:	-0,000000024	Vy:	0
Masa:	0,92	Promień:	1

Rysunek 31 Parametry startowe mniejszej gwiazdy w układzie Alfa Centauri

Uwagi dodatkowe. W programie nie ma możliwości ustawienia tak punktu centralnego, aby był on jednocześnie środkiem masy układu. To zadanie również wiąże się z dużymi zmianami w grafice wykresu i spadkiem szybkości działania.

NIEWAŻKOŚĆ

Symulacja, której gotowe ustawienia parametrów znajdują się w pliku „NIEWAŻKOŚĆ.GRA” pozwala zapoznać się z działaniem rakiety kosmicznej. Nie ma ustawionych żadnych obiektów kosmicznych, więc nie ma też przyciągania z ich strony - rakieta znajduje się w stanie nieważkości. Każde włączenie silnika rakiety będzie powodowało ruch rakiety, którego kierunek wyznacza oś rakiety (czerwona strzałka na RADARZE), a przyspieszenia i prędkości będą zgodne z ustawioną siłą ciągu. Oczywiście użytkownik ma możliwość sterowania zarówno kierunkiem lotu, jak i siłą ciągu.

Parametry startowe. Rakieta znajduje się początkowo w środku układu i nie porusza się. Przypisujemy jej dowolną masę (tutaj 100 kg), odpowiednią ilość paliwa (99 kg), a także określamy siłę ciągu za pomocą szybkości spalania (1 kg/s) i szybkości wypływu spalin z dysz rakiety (1 m/s). Wyliczona przez program siła ciągu (przycisk WYLICZ) wynosi 9,8 (niutony). Jeżeli po włączeniu silnika rakieta ma poruszać się na przykład pionowo do góry, ustawiamy kąt rakiety na 270 stopni.

The screenshot shows a window titled "RAKIETA" with the following settings:

- Nazwa:** RAKIETA
- jednostki:** [m] [kg] [s]
- Wykres:** KOLOR, 10
- Rozmiar:** (slider)
- x:** 0, **y:** 0
- Vx:** 0, **Vy:** 0
- Masa:** 100, **Promień:** 0
- Paliwo:** 99
- Spalanie:** 1
- Spaliny:** 1, **wylicz** (button)
- Kąt lotu:** 270
- Kąt rakiety:** 270
- Siła ciągu:** 9,8, **wylicz** (button)
- Skok obrotu:** 1
- Spalaj paliwo
- Włącz silnik od startu
- Uwzględniaj rakiety w obliczeniach

Rysunek 32 Ustawienia rakiety w stanie nieważkości

Proponuję, aby podczas pierwszych prób rakieta nie spalała paliwa, co pozwoli bez ograniczeń testować jej zachowanie z włączonym silnikiem. W innym wypadku, gdy opcja SPALAJ PALIWO jest włączona, po spaleniu całego zapasu paliwa (z szybkością 1 kg/s) nie będzie można włączyć silnika. Kolejna opcja WŁĄCZ SILNIK O STARTU pozwoli uruchomić silnik automatycznie po wciśnięciu przycisku START na mostku kapitańskim. Jak już wcześniej wspomniano, jest przydatna, gdy startujemy rakiety np. z powierzchni Ziemi. Ostatnia opcja UWZGLĘDNIJ RAKIETĘ W OBLICZENIACH musi być włączona. W innym wypadku nie będzie można sterować rakiety.

Manewrowanie. Ponieważ nie ma oddziaływania z innymi obiektami, dlatego w tej symulacji można zapoznać się z charakterystycznym działaniem rakiety. Wytworzona przez silnik siła ciągu powoduje jej ruch w kierunku pokazywanym przez czerwoną strzałkę na RADARZE. Gdy kierunek lotu pokrywa się z kierunkiem rakiety, przy włączonym silniku rakieta przyspiesza, co możemy zaobserwować na panelu KOMPUTER. Przyspieszenie jest stałe i wynosi $0,0981 \text{ (m/s}^2\text{)}$ zgodnie z wybranymi jednostkami). Zwiększa się odległość od środka układu i prędkość rakiety. Jeżeli rakieta ucieka nam z pola widzenia można zwiększyć skalę wykresu.

Po wciśnięciu przycisku $\leftarrow \rightarrow$ zwrotu kierunku lotu i rakiety stają się przeciwne i rozpoczyna się hamowanie (przy pracującym silniku). Interesujący może być moment zmiany zwrotu kierunku lotu. Prędkość rakiety maleje do zera, po czym zmienia się kierunek jej lotu na przeciwny (strzałka czarna na radarze) i rakieta kontynuuje swój lot w przeciwną stronę - zgodną z kierunkiem ustawienia rakiety (czerwona strzałka).

To była sytuacja wyjątkowa. Natomiast całą gamę zachowań rakiety w trakcie lotu możemy zaobserwować, gdy przyciskami OBRÓT spowodujemy automatyczne obracanie się rakiety z włączonym silnikiem. Gdy kąt lotu i kąt rakiety niewiele się

różnią (w przedziale 0 do 90°), rakieta obraca się i jednocześnie przyspiesza. Gdy różnica w kątach jest znacznie większa (90 do 180°) rakieta zwalnia i obraca się, co przy małych prędkościach może doprowadzić do charakterystycznego zachowania - rakieta obraca się w koło. O skali trudności podczas wykonywania manewrów prawdziwym statkiem kosmicznym niech świadczy proste ćwiczenie: wyleć komputerową raketą w dowolne miejsce, a potem wróć i zatrzymaj się dokładnie w punkcie początkowym. Weź pod uwagę to, że nasza komputerowa rakieta potrafi poruszać się tylko na płaszczyźnie, a prawdziwa w przestrzeni trójwymiarowej.

Uwagi dodatkowe. Poprzednie wersje programu nie miały wbudowanych odpowiednich mechanizmów i można było doprowadzić do charakterystycznych „korkociągów”. W momencie zwrotu rakiety, przy minimalnej prędkości następował niekontrolowany i gwałtowny obrót, z którego można było wyjść sterując w odpowiedni sposób obrotem rakiety przy włączonym silniku. Obecna wersja programu wyprowadza automatycznie statek kosmiczny z korkociągów.

WAHADŁOWIEC W LOCIE ORBITALNYM

Nasza rakieta wystartowała już z Ziemi i krąży po orbicie. Naszym zadaniem będzie zmiana orbity na wyższą. Wydawać by się mogło (przez analogię do np. lotów samolotem), że jest to zadanie proste. Jak przekonamy się za chwilę, taki manewr, jeden z prostszych kosmicznych manewrów, wymaga jednak wielkiej precyzji i synchronizacji w czasie. Gotowe ustawienia parametrów znajdują się w pliku „WAHADŁOWIEC.GRA”.

Parametry startowe. Ziemia jest centralnym obiektem animacji. Jej parametry możemy ustawić na dowolnej spośród czterech zakładek oznaczonych, jako OBIEKT na panelu PARAMETRY. Ziemia w środku układu - współrzędne X i Y wynoszą 0. Nie porusza się - prędkości V_x i V_y wynoszą również 0. Masa Ziemi, to około $6E+24$ (kilogramy), a jej promień 6378 (kilometry).

Stałą grawitacji ustawiamy na zakładce INNE wybierając jako jednostkę [km] [kg] [s] - wynosi ona $6,67E-20$.

OBIEKT 1		jednostki	
Nazwa:	ZIEMIA	[km] [kg] [s]	
Wykres:	KOLOR 20	Rozmiar: ◀ ▶	
x:	0	y:	0
Vx:	0	Vy:	0
Masa:	6E+24	Promień:	6378

Rysunek 33 Ustawienia parametrów początkowych dla Ziemi

Początkowo wahadłowiec ustawiony jest w odległości 200 kilometrów od powierzchni Ziemi, czyli 6578 od środka, a jego prędkość początkowa wynosi 7,91 (kilometrów na sekundę) i jest to pierwsza prędkość kosmiczna. Takie ustawienia sprawiają, że po uruchomieniu symulacji będzie krążyć wokół Ziemi po orbicie prawie kołowej.

The screenshot shows a configuration window titled "RAKIETA". It includes the following fields and options:

- Nazwa:** WAH
- Wykres:** KOLOR, 8
- Rozmiar:** (slider)
- x:** 0, **y:** 6578
- Vx:** 7,91, **Vy:** 0
- Masa:** 100000, **Promień:** 0,025
- Paliwo:** 22000
- Spalanie:** 5
- Spaliny:** 0,5505, **wylicz** (button)
- Siła ciągu:** 27,0, **wylicz** (button)
- Kąt lotu:** 0
- Kąt rakiety:** 0
- Skok obrotu:** 1
- Spalaj paliwo
- Włącz silnik od startu
- Uwzględniaj raketę w obliczeniach
- jednostki:** [km] [kg] [s] (button)

Rysunek 34 Ustawienia rakiety w locie orbitalnym

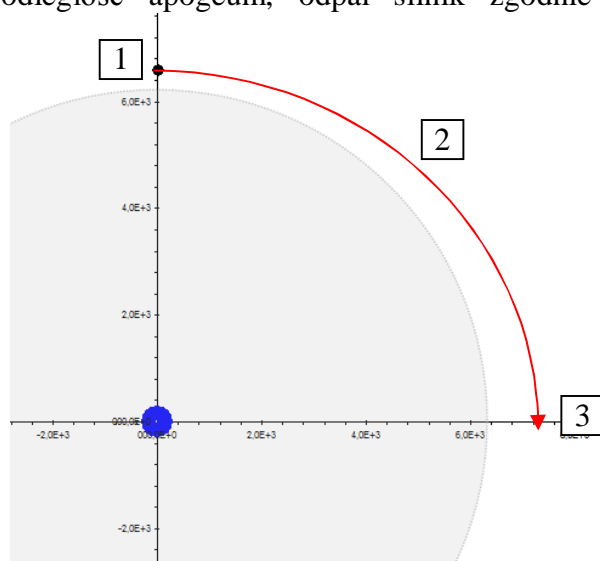
Masa wahadłowców amerykańskich wynosiła około 100000 kilogramów, razem z ładunkiem i paliwem. Masa paliwa wynosiła około 22000 kilogramów. Kąt lotu i kąt rakiety nie mają znaczenia. Jeżeli ustawiona jest prędkość początkowa, to kąty obliczane są z wypadkowych prędkości. Siła ciągu silników manewrowych wahadłowca wynosiła około 27 kN. Dla potrzeb naszej symulacji zaniedbamy ilości spalane paliwa - będziemy w ten sposób mogli wykonywać wiele manewrów - pole SPALAJ PALIWO nie jest zaznaczone.

Uwagi dodatkowe. Ponieważ obiekt RAKIETA opisujemy zazwyczaj w dużo mniejszych jednostkach niż pozostałe obiekty kosmiczne, dlatego też tylko na tej zakładce mamy możliwość wprowadzenia parametrów w metrach i kilogramach, które w sposób automatyczny możemy przeliczyć na jednostki obowiązujące, ustawione przez wybór stałej grawitacji. Pole JEDNOSTKI, w prawym górnym rogu, to przycisk, który służy do przeliczania jednostek. Po wywołaniu okienka z parametrami pokazywane są automatycznie wartości w jednostkach obowiązujących. Wciśnięcie przycisku spowoduje przeliczenie na metry i kilogramy, i teraz już wygodnie i dokładnie możemy je określić. Powtórne wciśnięcie przycisku spowoduje ponowne przeliczenie.

RAKIETA		jednostki: [m] [kg] [s]		
Nazwa:	WAH			
Wykres:	KOLOR 8	Rozmiar:		
x:	0	y:	6578000	
Vx:	7910	Vy:	0	
Masa:	100000	Promień:	25	
Paliwo:	22000			
Spalanie:	5	Kąt lotu:	0	
Spaliny:	550,5	wylicz	Kąt rakiety:	0
Siła ciągu:	27000	wylicz	Skok obrotu:	1

Rysunek 35 Ustawienia rakiety w locie orbitalnym - zmiana jednostek

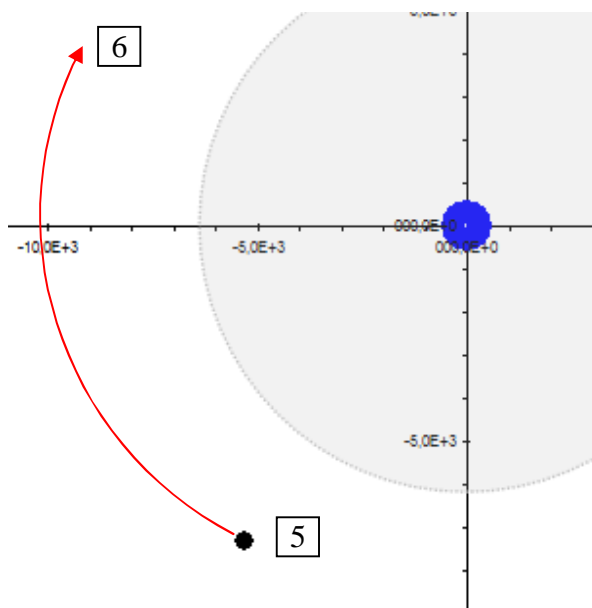
Manewrowanie. Spróbujemy wykonać naszym wahadłowcem manewr przejścia na wyższą orbitę. Reguła zaprezentowana w rozdziale o technice lotów kosmicznych mówi: „aby zwiększyć odległość apogeum, odpal silnik zgodnie z wektorem prędkości w perygeum oraz aby zwiększyć odległość perygeum, odpal silnik zgodnie z wektorem prędkości w apogeum”. W rzeczywistości zwiększenie lub zmniejszenie orbity wahadłowca odbywa się w granicach kilkuset kilometrów. W naszej symulacji dokonamy bardziej spektakularnej zmiany, o kilka tysięcy kilometrów. Odpalimy silnik w perygeum na ćwierć obrotu wokół Ziemi, wykonamy w ten sposób dwa okrążenia, a następnie w apogeum włączymy silnik na kolejne ćwierć okrążenia. Oto lista czynności, które należy wykonać wraz z przykładowymi rysunkami:



Rysunek 36 Przejście na wyższą orbitę - perygeum

1. **Włączamy silnik**, gdy rakieta znajduje się w perygeum (w górnej części, na przecięciu osi Y) - w naszym przypadku jest to około 200 kilometrów.
2. Zwiększa się prędkość i odległość od powierzchni Ziemi.
3. **Wylączamy silnik**, gdy rakieta wykona ćwierć okrążenia (znajduje się w najbardziej na prawo wysuniętym punkcie, na przecięciu z osią X).

4. Wykonujemy rakieta kilka okrążeń. W międzyczasie możemy spróbować zmniejszyć wielkość wykresu, np. do wartości 2E+4 lub zwiększyć lub zmniejszyć szybkość symulacji poprzez zmianę kroku czasowego.
5. **Włączamy silnik** w apogeum, które znajduje się (podczas mojej symulacji) na przedstawionym obok rysunku - znów na mniej więcej ćwierć okrążenia. Odległość od Powierzchni Ziemi można sprawdzić w okienku KOMPUTERA pokładowego - wartość parametru „s”.
6. **Wyłączamy silnik** - rakietka znajduje się na innej orbicie. W rzeczywistości może to być zaledwie kilkadziesiąt kilometrów, w naszej symulacji - kilka tysięcy kilometrów od powierzchni Ziemi.



Rysunek 37 Przejście na wyższą orbitę - apogeum

W podobny sposób możemy zmniejszyć orbitę. Wyhamujemy w tym celu naszą symulacyjną rakieta. Wiązało się to będzie z obróceniem rakiety o 180 stopni i włączeniem na określony czas silników manewrowych.

1. **Obracamy rakieta wokół osi** za pomocą jednego z przycisków OBRÓT. W rzeczywistości wykonują to specjalne silniczki manewrowe. W czasie obrotu, czerwona strzałka zmienia swoje położenie widoczne na panelu RADAR oraz dokonywane są stosowne przeliczenia kątów na panelu KOMPUTER.
2. **Włączamy silnik** na kilka sekund, gdy rakietka znajduje się w perygeum. Należy wcześniej wykonać kilka okrążeń i sprawdzić na pokładowym komputerze, w którym miejscu znajduje się nasze perygeum.
3. Rakietka hamuje. Jeżeli oś rakiety była ustawiona w osi lotu nie ma dodatkowych efektów związanych ze zmianą kierunku lotu. Jeżeli osie się nie pokrywają, kierunek lotu liczony jest z wypadkowej.
4. **Wyłączamy silnik** po krótkim okresie czasu, kontrolując cały czas prędkość rakiety tak, aby nie spadła poniżej pierwszej prędkości kosmicznej, gdyż grozi to nieuchronnie katastrofą
5. Powtarzamy kilkakrotnie czynność chwilowego włączania silników, aż orbita zostanie zmniejszona do wymaganych rozmiarów.
6. **Obracamy rakieta** w kierunku lotu za pomocą przycisków OBRÓT.

Uwagi dodatkowe. Opanowanie sztuki zwiększania i zmniejszania orbity do perfekcji jest niezbędne podczas prawdziwych podróży kosmicznych. Co prawda czynności te wspomagają obecnie wyspecjalizowane układy, lecz w sytuacjach

awaryjnych, jak np. podczas słynnego lotu APOLLO 13, zawsze można przejść na „ręczne sterowanie”. Podczas testowania programu, autorowi udało się na przykład doprowadzić do krążenia po orbicie na wysokości kilkuset metrów nad powierzchnią Ziemi!

ARMATA NEWTONA

W swoim słynnym dziele „Principia Mathematica”, Newton opisał eksperyment, z którego wywodzi się idea lotów kosmicznych. Ustawiamy działo na wzniesieniu, równoległe do powierzchni Ziemi i wystrzelujemy pociski z dowolnymi prędkościami (zaniedbujemy opór powietrza). Przy małych prędkościach można uznać, że mamy do czynienia z rzutem poziomym. Jednak właściwy kształt toru możemy uzyskać, gdy odwołamy się do zagadnienia dwóch ciał. Przy małych prędkościach pocisk zawsze zderzy się z Ziemią. Zwiększanie prędkości pocisku będzie zwiększać odległość, na którą może dolecieć. Graniczny przypadek zajdzie, gdy nadamy pociskowi prędkość umożliwiającą okrążenie Ziemi po orbicie kołowej. Jest to, jak wiadomo, pierwsza prędkość kosmiczna. Większe prędkości umożliwią okrążanie Ziemi po orbitach eliptycznych, a kolejną graniczną prędkość uzyskamy, gdy pocisk pokona Ziemią grawitację i polecą w kosmos. Gotowe ustawienia parametrów znajdują się w pliku „ARMATA.GRA”.

Parametry startowe. Armata stoi na wzniesieniu o wysokości 1 kilometra, czyli 6379 kilometrów od środka Ziemi i strzela pociskami o masie 10 kilogramów i promieniu 10 centymetrów (0,0001 kilometra), równoległe do jej powierzchni. Parametry armaty przedstawia poniższy rysunek. Pociski nie mają własnego napędu, więc ustawienia związane z paliwem i ciągiem silnika możemy pominąć. Ustawienia Ziemi są identyczne, jak w poprzednim układzie o wahadłowcu.

RAKIETA		jednostki	
Nazwa:	ARMATA	[km] [kg] [s]	
Wykres:	KOLOR 8	Rozmiar:	<input type="text"/>
x:	0	y:	6379
Vx:	0,1	Vy:	0
Masa:	10	Promień:	0,0001

Rysunek 38 Ustawienia początkowe „armaty Newtona”

Na zakładce INNE ustawiamy stałą grawitacji ($6,67E-20$), wielkość wykresu ($9E+3$), skok czasu (1 sekunda) i wybieramy obiekt centralny (1-Ziemia).

Strzelanie. Rozpoczynamy strzelanie od prędkości 100 metrów na sekundę. Wywołujemy panel PARAMETRY i do pola VX rakiety wpisujemy wartość 0,1 (kilometry na sekundę) lub posługując się przyciskiem JEDNOSTKI wpisujemy wartość 100 (metry na sekundę). Zmieniamy pole VX gdyż strzelamy równoległe do powierzchni Ziemi. Przy tak małych odległościach nie mamy szans na zaobserwowanie

ruchu na wykresie, możemy jedynie badać zachowanie pocisku na pokładowym komputerze, który zderzy się z powierzchnią po 15 sekundach, w odległości prawie 1,5 kilometra od armaty (X na panelu KOMPUTER), przy prędkości końcowej wynoszącej nieco ponad 178 metrów na sekundę (V na panelu KOMPUTER). Wyliczona wartość przyspieszenia ziemskiego wynosi około $9,84 \text{ (m/s}^2\text{)}$.

Z teoretycznych zależności dla rzutu poziomego możemy również wyliczyć te wartości, i są one następujące: czas - 14,28 sekundy, prędkość końcowa - 172 metry na sekundę i zasięg - 1,4 kilometra przy założeniu, że przyspieszenie ziemskie wynosi $9,81 \text{ m/s}^2$. Niedokładność obliczeń bierze się z zaokrąglonych parametrów startowych Ziemi oraz stałej grawitacji.

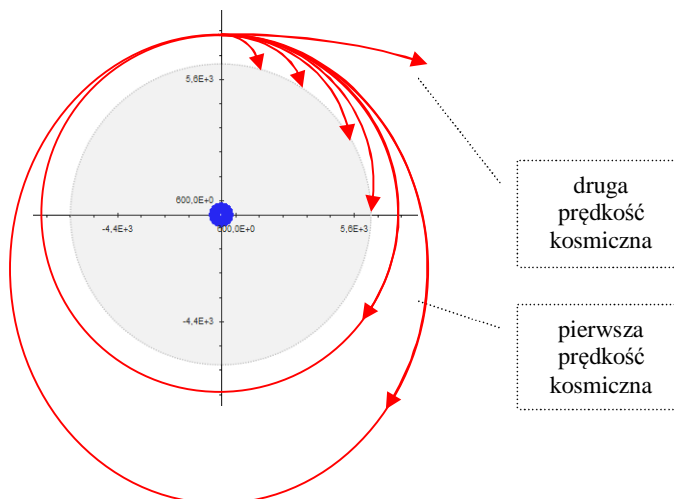
Zwiększamy stopniowo prędkość pocisku i obserwujemy coraz dalszy lot, znów tylko na komputerze pokładowym. Dopiero przy prędkości 7 kilometrów na sekundę pocisk przelatuje ponad 200 kilometrów. Pierwsza możliwość dłuższej obserwacji pojawia się przy prędkościach około 7,7 kilometra na sekundę. W ten sposób wyznaczamy doświadczalnie pierwszą prędkość kosmiczną, przy której pocisk może okrążyć Ziemię. Dla naszej symulacji będzie to 7,920674 kilometra na sekundę.

KOMPUTER	
x	1,4999
y	6377,8935
s	-0,1063
V	0,1782
a	9,8384
kąt lotu	55,88
pochylenie	55,88 0
masa rak	10
paliwo	0
spalono	0
siła ciągu	0
sek	15

Rysunek 39 Komputer pokładowy po zderzeniu pocisku z Ziemią

Po wpisaniu dokładniejszych danych: masa Ziemi - $5,978\text{E}+24$ i stała grawitacji - $6,67259\text{E}-20$, wyznaczona w ten sposób pierwsza prędkość kosmiczna osiągnie wartość 7,90829161. Po wczytaniu pliku „KOSMICZNA1.GRA” będzie można zaobserwować przelot pocisku dokładnie na wysokości 5 metrów nad powierzchnią Ziemi.

Zwiększanie prędkości początkowej ponad tę wartość spowoduje krążenie wokół Ziemi po coraz większej elipsie, aż przy prędkości ponad 11,2 (kilometry na sekundę) pocisk opuści Ziemię na zawsze. Aby ten efekt dostrzec należy znacznie zwiększyć skok czasu symulacji (do kilku minut) i skalę na wykresie.



Rysunek 40 Tory lotów pocisków podczas strzelania z „armaty Newtona”

Wraz ze zwiększaniem skoku upływu czasu pojawiają się błędy w obliczeniach i poprawne wyznaczenie drugiej prędkości kosmicznej może być trochę skomplikowane.

Wyznaczona doświadczalnie pierwsza prędkość kosmiczna obarczona jest błędem związanym z niedokładnym podaniem masy Ziemi i stałej grawitacji. Wpisanie do parametrów masy Ziemi wynoszącej

START Z POWIERZCHNI ZIEMI I LOT NA KSIĘŻYC

Kolejna symulacja dotyczyła będzie lotu na Księżyc. Start z powierzchni Ziemi jest zadaniem skomplikowanym w warunkach rzeczywistych. Również symulacja komputerowa wymaga dodatkowych ustawień. Układ parametrów początkowych zapisany jest w pliku, pod nazwą „NA KSIĘŻYC.GRA”.

Parametry startowe. Obiektem centralnym, podobnie jak w poprzedniej symulacji również jest Ziemia, i ustawiona jest w zakładce OBIEKT 1 w identyczny sposób, jak w poprzedniej symulacji. Parametry Księżyca pokazane są na poniższym rysunku.

OBIEKT 2		jednostki [km] [kg] [s]	
Nazwa:	KSIĘŻYC		
Wykres:	KOLOR 12	Rozmiar:	
x:	0	y:	384400
Vx:	1,022	Vy:	0
Masa:	7,348E+22	Promień:	1737

Rysunek 41 Ustawienia parametrów początkowych dla Księżyca

Księżyc krąży wokół Ziemi średnio w odległości około 384400 kilometrów od jej środka, z szybkością liniową około 1,022 kilometrów na sekundę. Ustawiamy początkowe położenie na jednej z osi układu (tutaj na osi Y). Masa Księżyca wynosi około $7,384E+22$ (kilogramy), a jej promień 1737 (kilometry).

Loty na Księżyc wykonywane były m.in. w amerykańskim programie APOLLO, w którym raketami nośnymi były rakiety serii SATURN V. Rakiety miały masę około $3E+6$ kilogramów, z czego paliwo zajmowało około 90% - 2700000 kilogramów. Wysokość wynosiła 110 metrów. Rakieta składała się z trzech członów napędowych, które odrzucane były w trakcie lotu. Szybkość spalania w pierwszym, głównym stopniu rakiety wynosiła około 250 kilogramów na sekundę, szybkość wypływu spalin kilkanaście kilometrów na sekundę, co dawało rakiecie startową siłę ciągu wynoszącą około 34000 kN przez około 3 minuty i wynosiło ją na około 70 kilometrów w górę. Pierwszy stopień odpadał i drugi stopień nadawał ciąg około 5000 kN przez kolejne 6 minut. W tym czasie rakieta odchylana była od swojego pionowego położenia coraz bardziej i docierała na wysokość około 160 kilometrów. Ostatni stopień o sile ciągu 102 kN służył do wyrównania lotu na orbicie. Rakieta mogła w tym czasie wykonać maksymalnie 3 okrążenia po czym przyspieszana była do drugiej prędkości kosmicznej.

RAKIETA

jednostki: [km] [kg] [s]

Nazwa: RAKIETA

Wykres: KOLOR 8 Rozmiar: []

x: 0 y: 6378,05

Vx: 0 Vy: 0

Masa: 3000000 Promień: 0,05

Paliwo: 2700000

Spalanie: 250 Kąt lotu: 270

Spaliny: 13,8634 wylicz Kąt rakiety: 270

Siła ciągu: 34000,0 wylicz Skok obrotu: 1

Spalaj paliwo

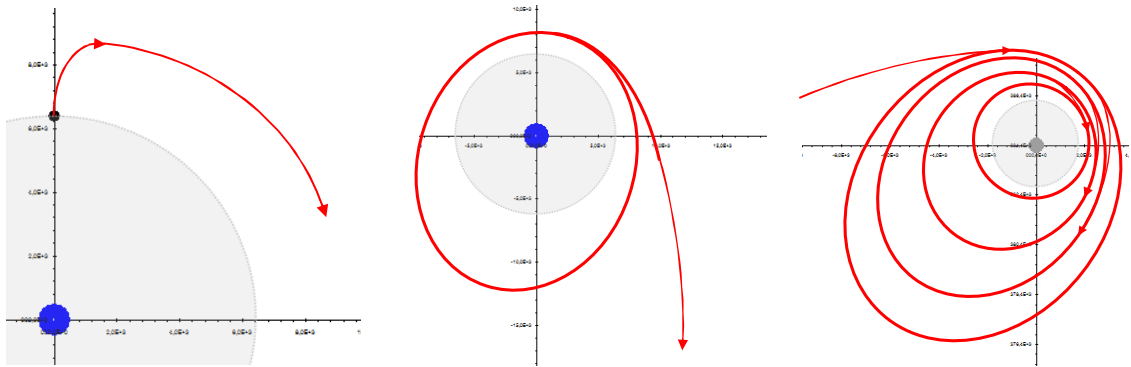
Włącz silnik od startu

Uwzględniaj rakiety w obliczeniach

Rysunek 42 Ustawienia parametrów początkowych dla Rakiety

W naszej symulacji rakieta znajduje się początkowo na powierzchni Ziemi, a skoro jej promień wynosi w przybliżeniu 50 metrów (0,05 kilometra), dlatego współrzędna Y jest sumą promienia Ziemi i rakiety i wynosi 6378,05 (kilometry). Ponieważ rakieta startuje z powierzchni Ziemi dlatego też zaznaczone muszą być pola wyboru: WŁACZ SILNIK... oraz UWZGLĘDNIAJ RAKIETĘ... Włączamy również pierwsze pole SPALAJ PALIWO, aby symulacja nabrała cech realistycznych i uwzględniała zmianę przyspieszenia rakiety wraz ze zmniejszającą się masą rakiety.

Manewrowanie. Oczywiście nasza symulacja będzie w znacznym stopniu uproszczona, choć możemy próbować zadbać o realistyczne odwzorowanie. Lista czynności, które należy wykonać, aby wystartować z Ziemi i przelecieć na orbitę na wysokości około 200 kilometrów jest mniej więcej podobna do tych, opisanych nieco wcześniej. Należy kontrolować kierunek lotu (przyciski OBRÓT) i odpowiednio zmniejszać siłę ciągu rakiety (odrzuć stopni), aby na wysokości 200-300 kilometrów uzyskać pierwszą prędkość kosmiczną. Wszelkie odchylenia od optymalnej trajektorii kończą się z reguły uderzeniem w Ziemię. W trakcie symulacji mogą pojawiać się drobne błędy obliczeniowe powodujące samoistne odchylenie się rakiety od pionowego kierunku lotu. Należy ten błąd płynnie korygować. Gdy rakieta uzyska odpowiednią prędkość i nie zderzy się wcześniej z Ziemią, rozpoczyna lot orbitalny, mniej lub bardziej eliptyczny.



Rysunek 43 Kolejne etapy lotu na Księżycu: start, wyjście z orbity ziemskiej, wlot na orbitę Księżyca

Kolejny etap naszego lotu, to zwiększenie prędkości, do co najmniej 11,2 kilometrów na sekundę przez odpalenie silnika. W prawdziwej rakiecie SATURN V odpalano ponownie trzeci człon o sile ciągu 102 kN. W naszej symulacji można ustawić siłę ciągu na większą wartość - szybciej osiągniemy pożądaną prędkość. Oczywiście najlepiej będzie włączyć silnik, gdy rakieta znajduje się w apogeum, posiada wtedy największą prędkość. W prawdziwym locie należy zadbać o to, aby opuścić orbitę ziemską w odpowiednim czasie i miejscu, w tzw. „oknie startowym”. W naszej symulacji nie mamy takich problemów, zawsze możemy przyspieszyć czas, wyłączyć spalanie paliwa i „poczekać” na Księżyc. Umiejętne i wprawne operowanie zmianą skoku czasu, wielkością wykresu oraz parametrami samej rakiety: ciągiem silnika i kierunkiem pochylenia pozwoli dotrzeć w dowolne miejsce naszego układu.

Po zbliżeniu się do Księżyca na odległość kilku tysięcy kilometrów można przełączyć widok na Księżyc (2 razy przycisk KSI na panelu MOSTEK) i odpowiednio dopasować wielkość wykresu. Po zmniejszeniu szybkości upływu czasu należy wyhamować raketę do kilku kilometrów na sekundę, aż ustabilizujemy lot na orbicie księżycy. Kilukrotne stopniowe wyhamowanie rakiety do prędkości około 1,7 kilometra na sekundę (I prędkość kosmiczna dla Księżyca) pozwoli nam na zbliżenie się do powierzchni na odległość kilkudziesięciu kilometrów, skąd można już rozpocząć lądowanie.

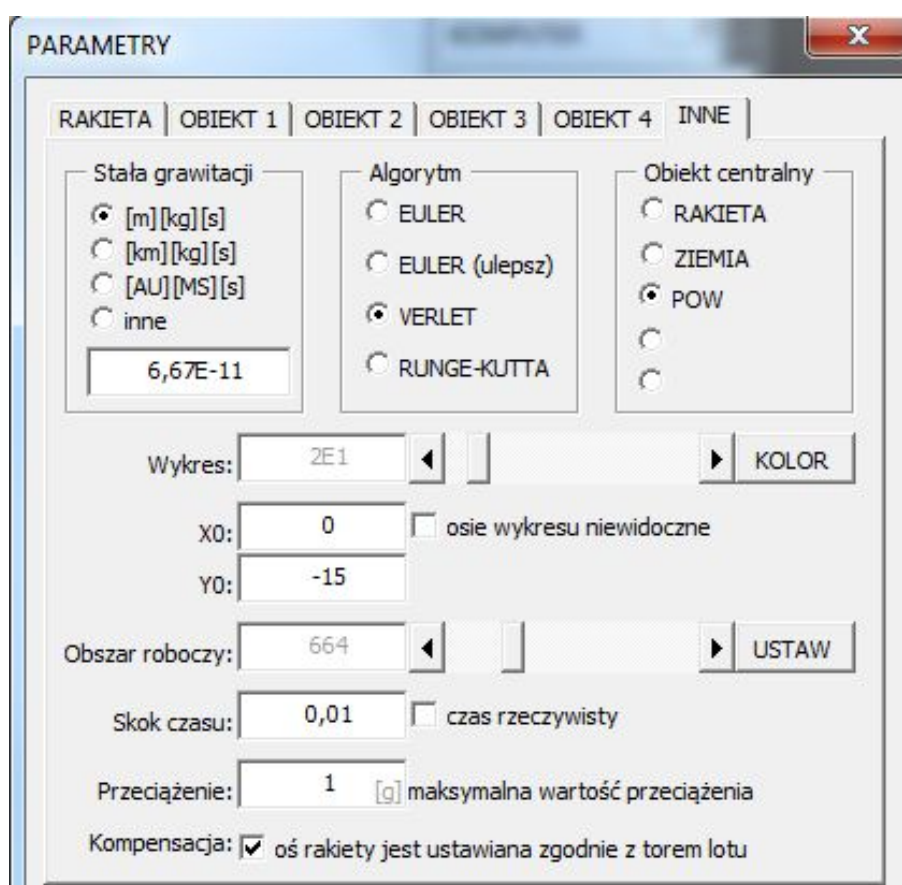
Lądowanie wiązało się będzie ze zderzeniem z powierzchnią, co zostanie zasygnalizowane odpowiednim komunikatem. Przy odrobinie wprawy można jednak spróbować zbliżyć się do powierzchni na odległość kilkuset metrów, skąd w prawdziwych warunkach można by rozpocząć właściwe lądowanie.

Uwagi dodatkowe. Ta wersja programu nie zawiera jeszcze odpowiednich ustawień dotyczących lądowania, dlatego też zbliżenie się na odległość mniejszą niż suma promieni zawsze wiązało się będzie z komunikatem o zderzeniu.

KINEMATYKA

Wyjątkową własnością programu jest możliwość pokazania zagadnień kinematycznych: rzut pionowy, poziomy i ukośny. W kinematyce mamy do czynienia z ruchem ciała na płaszczyźnie, która w rzeczywistości jest powierzchnią Ziemi w bardzo dużym powiększeniu. Wyniki uzyskane za pomocą teoretycznych wzorów można sprawdzić w przeprowadzonych doświadczeniach. Nic też nie stoi na przeszkodzie, aby badać w ten sposób zachowanie się ciał na powierzchniach innych planet. Układ parametrów początkowych zapisany jest w pliku, pod nazwą „KINEMATYKA.GRA”.

Parametry startowe. Stałą grawitacji dostosujemy do większości zadań, które wykonywane są w szkołach, czyli w jednostkach układu SI (metr, kilogram, sekunda). Skok czasu symulacji ustawiamy na 0,01 sekundy. Obiektem centralnym jest obiekt o nazwie POW - powierzchnia Ziemi. Oś X przesuwamy w dół do wartości -15.



Rysunek 44 Kinematyka. Ustawienia zakładki INNE

Aby można było obserwować symulację na powierzchni, należy środek Ziemi ustawić, w odległości równej promieniowi. Rakiety ustawiamy na powierzchni, a dodatkowy obiekt posłuży nam, jako punkt odniesienia. Parametry obiektów przedstawiają poniższe rysunki.

RAKIETA

Nazwa: RAKIETA

Wykres: KOLOR 8

Rozmiar: []

x: 0 y: 5

Vx: 10 Vy: 5

Masa: 10 Promień: 0,0001

Paliwo: 0

Spalanie: 0

Spaliny: 0

Siła ciągu: 0,0

Kąt lotu: 0

Kąt rakiety: 0

Skok obrotu: 0

Spalaj paliwo

Włącz silnik od startu

Uwzględniaj raketę w obliczeniach

Rysunek 45 Kinematyka. Parametry startowe rakiety - punktu materialnego

OBIEKT 1

Nazwa: ZIEMIA

Wykres: KOLOR 20

Rozmiar: []

x: 0 y: -6378000

Vx: 0 Vy: 0

Masa: 6E+24 Promień: 6378000

Rysunek 46 Kinematyka. Parametry startowe Ziemi

OBIEKT 2

Nazwa: POW

Wykres: KOLOR 2

Rozmiar: []

x: 0 y: 0

Vx: 0 Vy: 0

Masa: 0 Promień: 0

Rysunek 47 Kinematyka. Parametry startowe powierzchni Ziemi - punktu odniesienia

Rzut pionowy. Rakieta zostaje wystrzelona z prędkością 15 metrów na sekundę pionowo w górę. Ustawienia rakiety pokazane są na poniższym rysunku.

x:	0	y:	0
Vx:	0	Vy:	15
Masa:	10	Promień:	0,0001

Rysunek 48 Kinematyka. Parametry startowe rakiety w rzucie pionowym

Rzut poziomy. Rakieta znajduje się na wysokości 5 metrów i zostaje poziomo wystrzelona z prędkością 10 metrów na sekundę.

x:	0	y:	5
Vx:	10	Vy:	0
Masa:	10	Promień:	0,0001

Rysunek 49 Kinematyka. Parametry startowe rakiety w rzucie poziomym

Rzut ukośny. Rakieta znajduje się na wysokości 5 metrów i zostanie wystrzelona z prędkością wypadkową 11,18 metra na sekundę (5^2+10^2).

x:	0	y:	5
Vx:	5	Vy:	10
Masa:	10	Promień:	0,0001

Rysunek 50 Kinematyka. Parametry startowe rakiety w rzucie ukośnym

W trakcie testowania programu powstało dodatkowo kilkanaście gotowych układów symulacji, jednak tych kilka przedstawionych w pracy powinno w wystarczający sposób wyjaśniać obsługę programu i sposoby manewrowania rakieta. Użytkownik może w każdej chwili zapisać przygotowany przez siebie układ i w dowolnym momencie go odczytać z dysku i odtworzyć.

ZAWARTOŚĆ PŁYTKI CD

Dołączona do pracy płytką CD zawiera opisywaną wersję programu wraz z plikami dodatkowymi. Testowanie i prace poszerzające możliwości programu, a także tworzenie nowej wersji w innym środowisku programistycznym są nadal kontynuowane. Wszelkich informacji można poszukać na stronie internetowej zso.bobowa.eu w dziale nauczyciele/fizyka.

Płytką CD zawiera następujące pliki:

GRAWITACJA.XLS	główny program opisywany w pracy
HARMONICZNY.XLS	aplikacja pomocnicza opisująca ruch harmoniczny i algorytm Eulera

Pliki z parametrami początkowymi, które można wczytać do programu głównego

ALFA_CENTAURI.GRA	układ gwiazd podwójnych - jednostki SI
ALFACENTAURI.GRA	układ gwiazd podwójnych - jednostki astronomiczne
ARMATA.GRA	eksperyment Newtona - strzelanie z armaty
KINEMATYKA.GRA	badanie zagadnień kinematycznych - rzuty
KOSMICZNA1.GRA	wyznaczanie I prędkości kosmicznej
MARS.GRA	lot rakiety na Marsa
NA KSIĘŻYC.GRA	start rakiety z powierzchni Ziemi i lot na Księżyc
NIEWAŻKOŚĆ.GRA	testowanie lotu rakiety w stanie nieważkości
PLUTON-CHARON.GRA	symulacja ruchu Plutona i jego księżycy Charona
PODWÓJNY.GRA	lot rakiety w układzie podwójnym
SŁOŃCE.GRA	Słońce, Ziemia, Księżyc, Mars
WAHADŁOWIEC.GRA	orbitalny lot wahadłowca

SAMOUCZEK.DOC	instrukcja obsługi zawierająca trzy krótkie lekcje
---------------	--

W folderze WYNIKI znajdują się pliki z wartościami chwilowymi wszystkich parametrów lotu obiektów, wykorzystane w pracy do rysowania trajektorii lotu a analizy zmian energii całkowitej. Każdy plik dotyczy innego algorytmu.

Lot rakiety wokół Ziemi: prędkość początkowa - 10 km/s, masa rakiety - 100000 kg.

ENERGIA.GRA	parametry startowe symulacji
E 10000.XLS	algorytm Eulera
Eu 10000.XLS	algorytm Eulera ulepszony
V 10000.XLS	algorytm Verleta
RK 10000.XLS	algorytm Runge-Kutta

Lot obiektu kosmicznego o masie 100 kg wokół gwiazdy planety o masie 1E13 kg.

CYKL MAŁY.GRA	parametry startowe symulacji
E 10000mały.XLS	algorytm Eulera
Eu 10000mały.XLS	algorytm Eulera ulepszony
V 10000mały.XLS	algorytm Verleta
RK 10000mały.XLS	algorytm Runge-Kutta

Planeta wielkości Ziemi krąży wokół gwiazdy: prędkość początkowa - 35 km/s, masa planety - $6E24$ kg, masa gwiazdy - $2E30$ kg.

CYKL DUŻY.GRA	parametry startowe symulacji
E 10000duży.XLS	algorytm Eulera
Eu 10000duży.XLS	algorytm Eulera ulepszony
V 10000duży.XLS	algorytm Verleta
RK 10000duży.XLS	algorytm Runge-Kutta

Podczas wyliczania energii układu pomocne okazały się wszystkie poprzednio opisane, a dodatkowo, celem zbadania zależności wielkości błędu energii od wielkości kroku czasowego przygotowano odpowiednie dane. Każdy plik wyprodukowany został dla danych startowych zapisanych w pliku ENERGIA.GRA i zawiera zapis jednego pełnego okresu obiegu rakiety wokół Ziemi, w różnych krokach czasowych.

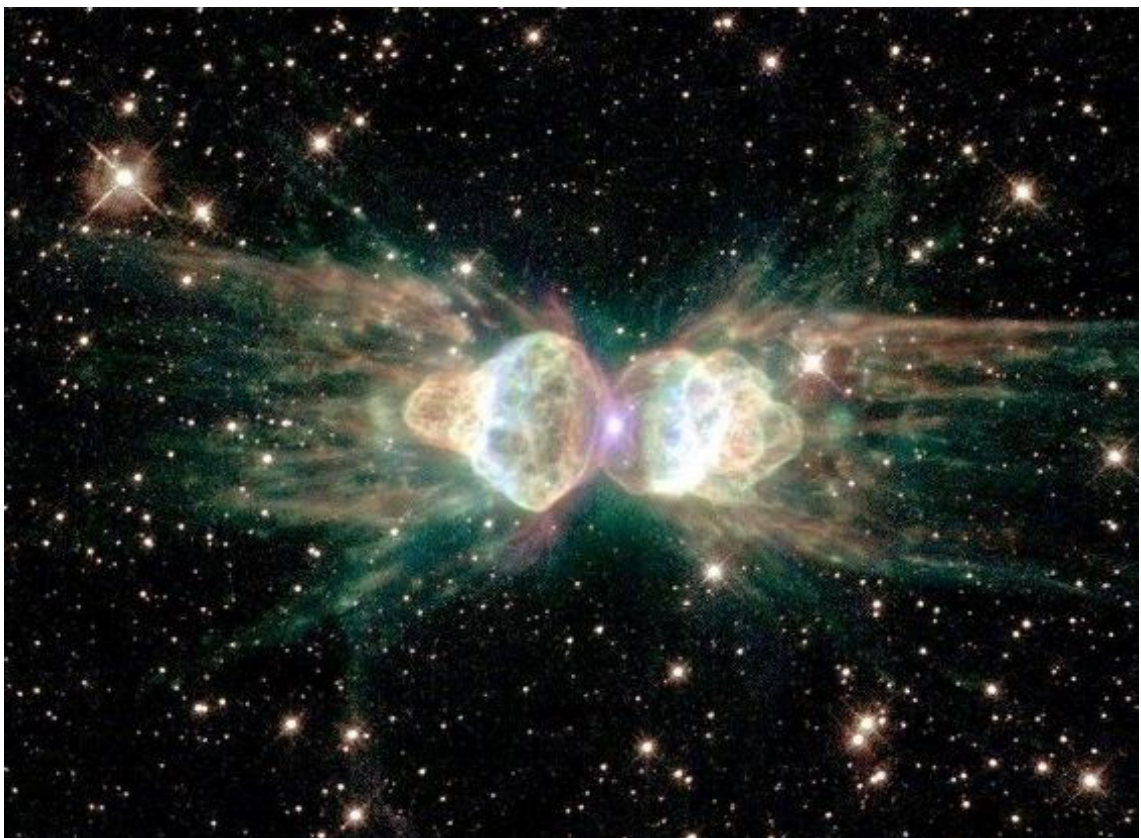
E30.XLS ... E1.XLS	algorytm Eulera
Eu30.XLS ... Eu1.XLS	algorytm Eulera ulepszony
V30.XLS ... V1.XLS	algorytm Verleta
RK30.XLS ... RK1.XLS	algorytm Runge-Kutta

Bibliografia do rozdziału

- Besta P., *Tworzenie gier 2D i 3D w języku TurboPascal*. Helion 2002
- Burg M.D., *Fizyka dla programistów gier*, Helion 2003
- Lewandowski M., *Tworzenie makr w VBA dla Excela*. Helion 2003
- McCarter D., *Visual Basic. Wskazówki i techniki*. MIKOM, Warszawa 2001
- Podlin S., *Poznaj programowanie w Excelu 2000*. Infoland, Warszawa 2001
- Snysarska A., *Ćwiczenia z makropoleczeń w Excelu*. MIKOM2003
- Zawacki M., *Fizyka. Rozwiązywanie zadań w Excelu*. Helion 2002
- <http://www.vb4all.pl/teoria/iso2/index.htm>
- <http://www.mielk.pl/pl/kursy/kursy.php>
- <http://poszukaj.elektroda.pl/>
- <http://vbadam.republika.pl/index.htm>
- <http://www.excel-vba.com/>
- <http://www.functionx.com/vbaexcel/>
- <http://www.programywexcelu.boo.pl/>
- <http://pl.wikipedia.org/wiki/Przeci%C4%85%C5%BCenie>
- <http://www.excelszkolenie.pl/index.htm>
- http://pl.wikipedia.org/wiki/Apollo_11
- http://pl.wikipedia.org/wiki/Saturn_V
- <http://astro4u.net/yabbse/index.php?topic=11481.0>
- <http://www.forum.spotter.pl/saturn-v-t2511/index.html?s=60c11c6fb4ccec1039f7c9532e8f484a&>
- <http://www.kosmosnews.pl/artukul/45-38-1-779/silniki-rakiety-saturn-v-znalezione-na-dnie-atlantyku..html>
- <http://pl.wikipedia.org/wiki/S-II>
- http://pl.wikipedia.org/wiki/Program_Mercury
- <http://nasa.oeiizk.waw.pl/apollo.html>
- http://pl.wikipedia.org/wiki/Profil_misji_Apollo
- <http://ekos.za.pl/index.php?site=lot/lmer>
- http://pl.wikipedia.org/wiki/System_manewrowania_orbitalnego
- <http://words.astronet.pl/word.cgi?219>
- http://pl.wikipedia.org/wiki/Gwiazda_podw%C3%B3jna
- http://pl.wikipedia.org/wiki/Alfa_Centauri

ZAKOŃCZENIE

OGRANICZENIA PROGRAMU
PRZYSZŁOŚĆ PROGRAMU



Pozostałość po gwiazdzie w Mglawicy Mrówka. Teleskop Hubble'a (NASA)

ZAKOŃCZENIE

OGRANICZENIA PROGRAMU

Program został napisany w oparciu o możliwości, jakie stwarza arkusz kalkulacyjny. Autor zdaje sobie sprawę, że nie jest to najlepsze środowisko (zwłaszcza jeśli chodzi o możliwości graficzne) do animacji i symulowania zjawisk, które w dużej mierze opierają się na stronie wizualnej. Zostało to poczynione z pełną świadomością - algorytmy i obliczenia nie ucierpiały z tego powodu, trochę mniejsze możliwości obrazowania zjawiska, ale wydaje mi się, że edukacyjne walory rekompensują te mankamenty.

Założenia początkowe przewidywały, że symulować będziemy jedynie cztery obiekty kosmiczne i dodatkowo raketę. W trakcie tworzenia okazało się, że dzisiejsze komputery mogłyby sobie poradzić z większą ich ilością. Algorytmy, którymi posługuje się program przy obliczaniu trajektorii ruchu nie są może zbyt dokładne, ale autorowi chodziło raczej o prostotę opisu. Również uproszczenia zastosowane do opisu działania rakiety są duże. Umożliwiają obrót rakiety (bez spalania paliwa) w obie strony oraz włączanie i wyłączanie silnika. Zarówno obrót, jak i spalanie odbywa się niezależnie od przyjętego kroku czasowego. Jeżeli skok czasu wynosi jedną sekundę i spala się w niej 250 kilogramów paliwa, to po zmianie skoku czasu na 60 sekund, spali się identyczna jego ilość. Okazało się bowiem w trakcie prac nad programem, że tak jest „bezpieczniej” - można by w jednej chwili pochłonąć cały zapas. Również obrót rakiety wokół osi jest niezależny od przyjętego kroku czasowego. Brakuje również możliwości przeniesienia środka układu współrzędnych do wyliczanego na bieżąco środka masy.

Podczas testowania okazało się, że zbyt duży skok czasu powoduje dość duże niedokładności w obliczaniu położenia, zwłaszcza gdy mamy do czynienia z obiektami o dużej rozpiętości mas, np. Ziemia, Księżyc i rakieta. Skok czasu rzędu do kilkunastu minut nie spowoduje jeszcze jego ucieczki w kosmos, ale przy większych krokach czasowych pojawiają się zbyt duże niedokładności. Jeśli masy obiektów są zdecydowanie większe, można zwiększać krok i badać obiekty nawet w skali wielu lat.

Czy poruszanie się w dwuwymiarowym świecie jest ograniczeniem? Oczywiście, że tak, ale symulacja w 3D byłaby już praktycznie grą komputerową, a to wymagałoby zupełnie innego podejścia do programu i ogromnie skomplikowałoby ustawianie parametrów początkowych (być może należałoby wprowadzić współrzędne biegunowe), jak i samo manewrowanie. Podobnie jest z graficznymi efektami, zwłaszcza biorąc pod uwagę możliwości arkusza kalkulacyjnego. Mimo tego, że powstały wersje programu z rysowaniem trajektorii i proporcjonalnych wielkości samych obiektów, to spowolnienia są zbyt duże, aby można było je zastosować w praktyce.

PRZYSZŁOŚĆ PROGRAMU

Praca nad tego typu programami praktycznie się nie kończy i podczas testowania powstają coraz nowsze wersje, pozbawione z jednej strony błędów, a z drugiej - wyposażone w coraz to nowe możliwości. Główne założenia programu pozostają od samego początku niezmiennie: nieskomplikowana obsługa, maksymalnie wierne odtworzenie oddziaływań grawitacyjnych i niesprawiające kłopotów sterowanie pojazdem kosmicznym.

W różnych wersjach programu testowane były m.in.: rysowanie większej liczby obiektów, rysowanie trajektorii ruchu, rysowanie rzeczywistych wymiarów obiektów. Z badań, które przeprowadził autor wynika, że arkusze kalkulacyjne radzą sobie doskonale z obliczeniami. Problemy pojawiają się, gdy trzeba te obliczenia zobrazować. Nasuwa się więc ogólny wniosek: gdy program zostanie gruntownie przetestowany, zostanie przeniesiony do bardziej optymalnego graficznie środowiska. Kosztem możliwości, jakie stwarza arkusz kalkulacyjny, poszerzone zostaną możliwości graficzne.

Jakie zmiany mogą czekać użytkowników w kolejnych wersjach? Pierwsza, niewielka z punktu widzenia programistycznego: poszerzenie możliwości programu do kilkudziesięciu obiektów. Kolejna modyfikacja będzie związana z możliwością zapisania sekwencji czynności, które ma wykonać pilot rakiety, czyli stworzenie tzw. autopilota. Umożliwi to zapisanie kolejnych operacji i oczywiście ich wielokrotne odtwarzanie. Z autopilotem powiązać można „inteligentny” komputer pokładowy, który będzie mógł sam obliczać i sterować silnikiem rakiety tak, aby wykonywała odpowiednie manewry. W ramach polepszenia graficznych parametrów, możliwe stanie się między innymi wykreślanie w czasie rzeczywistym trajektorii lotu, rysowanie rzeczywistych wymiarów obiektów, wykreślanie wektorów prędkości, przyspieszeń, sił oraz symulacja w przestrzeni 3D.

Prace nad udoskonaleniem programu są cały czas kontynuowane. Wszelkich informacji można szukać na stronie ZSO.BOBOWA.EU w dziale NAUCZYCIELE / FIZYKA. Z autorem programu można kontaktować się za pomocą poczty e-mail: LWACEK@WP.PL