

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria Aerospaziale

***Simulazione preliminare per fly by di uno spacecraft  
verso l'asteroide potenzialmente pericoloso (99942)  
Apophis***

Tutor universitari: Prof.ssa Monica Lazzarin

Dott.ssa Elisa Frattin

Laureando: *Edoardo Galtarossa*

*Matricola 2000222*

Padova, 12/09/2024

La **difesa spaziale** è uno dei campi più complessi e articolati dell'ingegneria aerospaziale e dell'astrofisica. In questa presentazione si vogliono introdurre i concetti fisici e ingegneristici legati al fly by dell'asteroide **99942 Apophis** previsto per il 13 aprile del 2029 e le missioni che lo studieranno.



HERA, Milani e Juventas

In questa tesi verrà presentata una simulazione in **MatLab** di un'orbita di trasferimento **Hohmann** tra i satelliti **Phobos e Deimos** di Marte come modello di scenario per una missione di avvicinamento ad Apophis.

Presentazione della difesa spaziale

Descrizione dell'asteroide Apophis

Simulazione di una manovra di trasferimento in MatLab



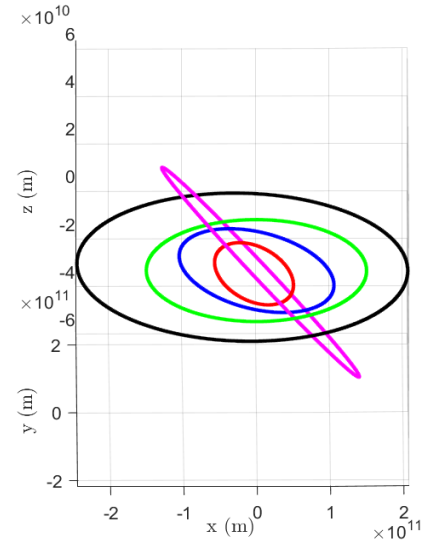
Impatto di DART immortalato pochi minuti dopo da LICIAcube

La difesa spaziale si compone di tre fasi:

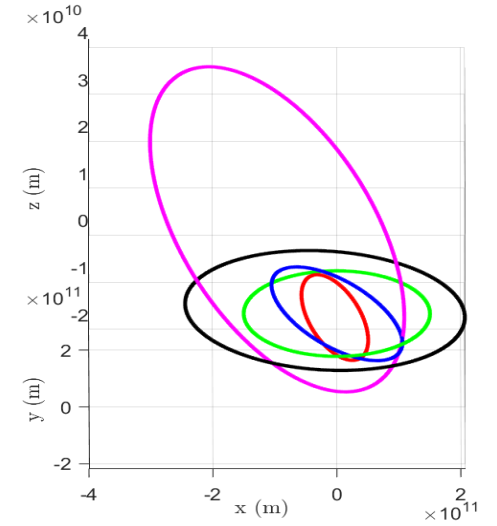
- Osservazione
- Rielaborazione dei dati
- Raggruppamento delle misurazioni



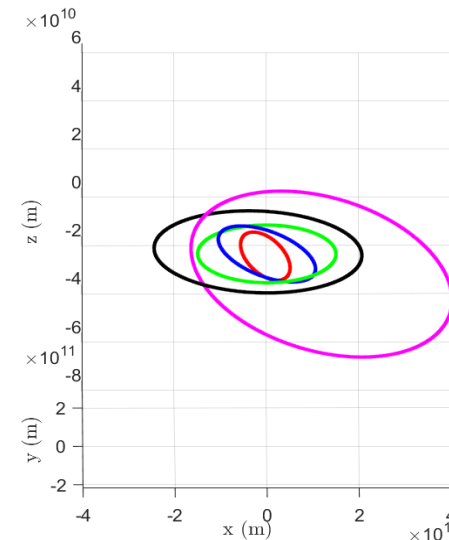
Optical Ground Station Tenerife



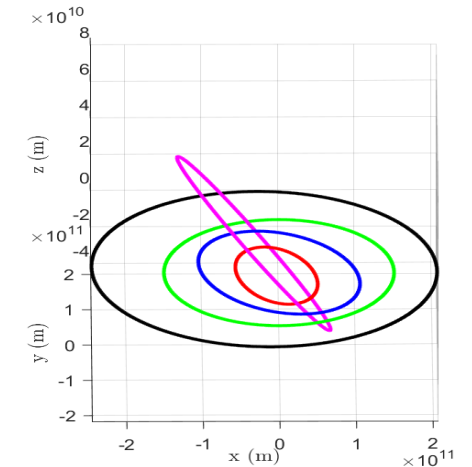
• Classe Aten



• Classe Apollo



• Classe Amor



• Classe Atiras

- Mercurio
- Venere
- Terra
- Marte



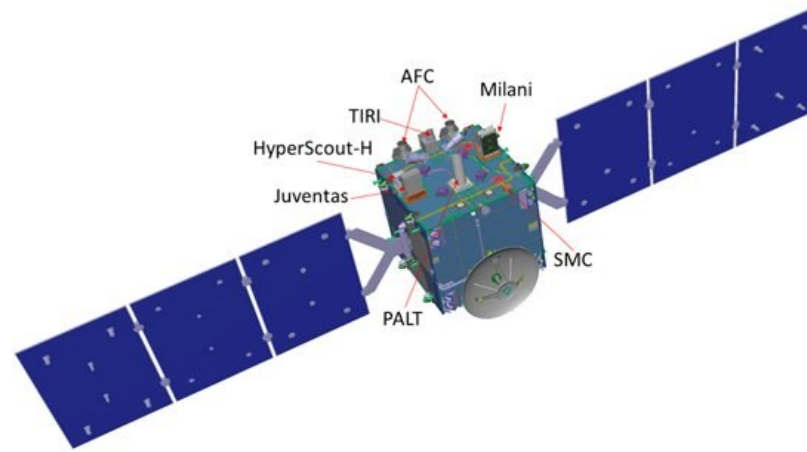
## RAMSES

Data di lancio prevista per l'aprile del 2028

Raggiungerà Apophis nel febbraio del 2029

Lo seguirà durante tutto il fly by e oltre

Sfrutterà tecnologia sviluppate con la missione HERA



## HERA

Seconda missione del programma AIDA

Lancio previsto verso il sistema Dimorphos e Didymos nell'ottobre del 2024

Base tecnologica per la missione RAMSES



## OSIRIS-APEX

Navetta della missione OSIRIS-Rex reindirizzata verso Apophis  
Raggiungerà l'asteroide dopo il fly by

## Caratteristiche geofisiche

Appartenente alla classe Aten

Oggetto di classe Sq

Composto da condriti LL ordinari

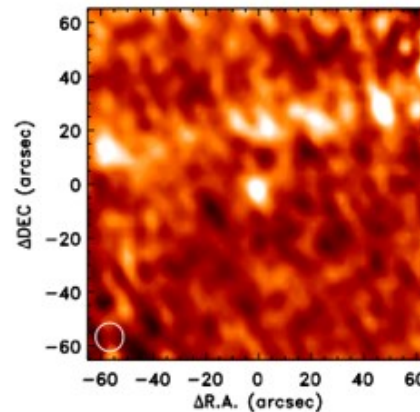
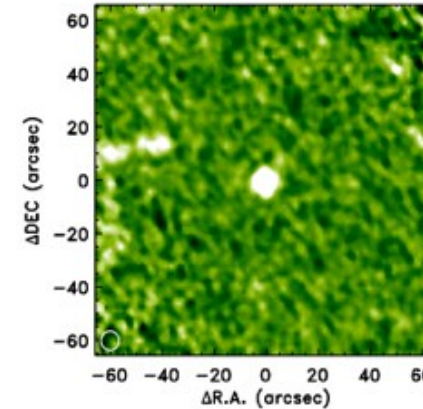
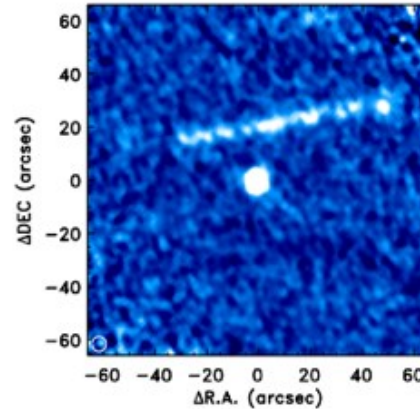
Struttura ipotizzata di tipo rubble-pile

Diametro medio di circa 375 m

Massa stimata tra  $4.4$  e  $6.2 \times 10^{10}$  kg

Inerzia termica pari a  $600 \text{ Jm}^{-2}\text{s}^{-0.5}\text{K}^{-1}$

Numerose somiglianze con l'asteroide Itokawa



Osservazioni all'infrarosso di Apophis



25143 Itokawa

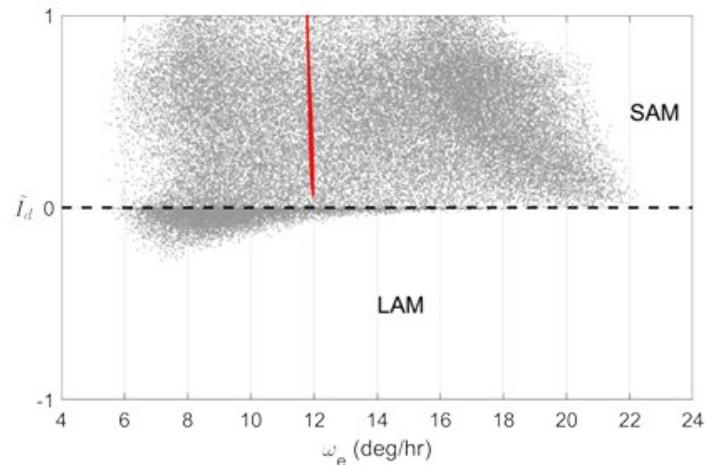
## Stato di spin

Rotazione retrograda con periodo di 30.4 h

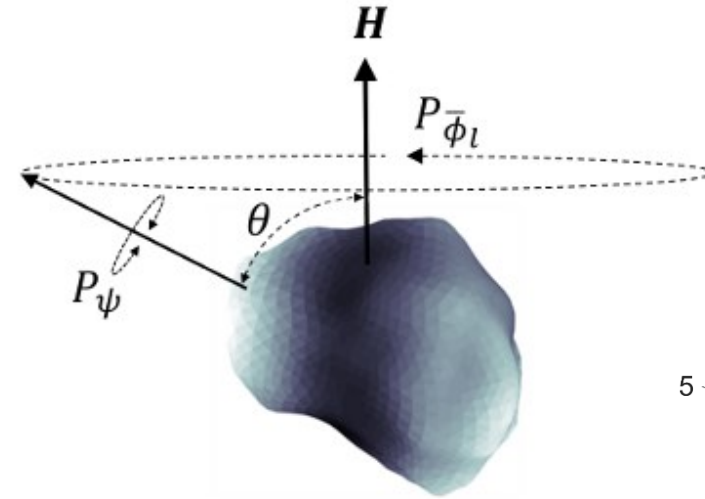
Moto di rotolamento

Influente e poco prevedibile l'effetto Yarkovsky

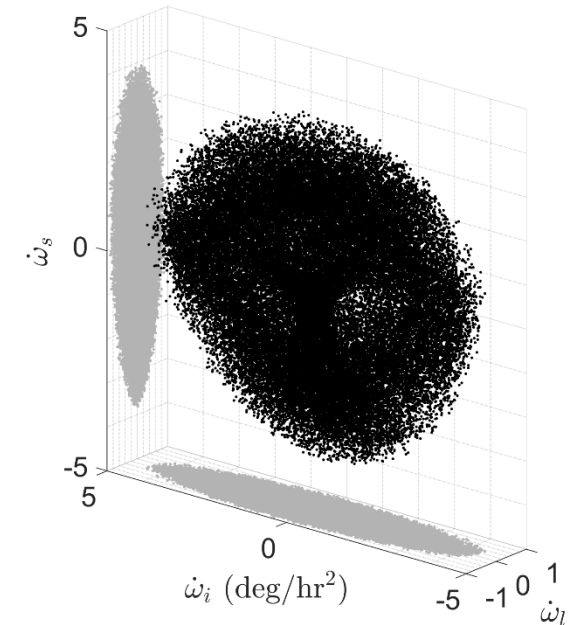
Tendenza a mantenersi in SAM anche dopo il fly by



Distribuzione della condizione di rotazione di Apophis dopo il fly by



Assi principali di inerzia

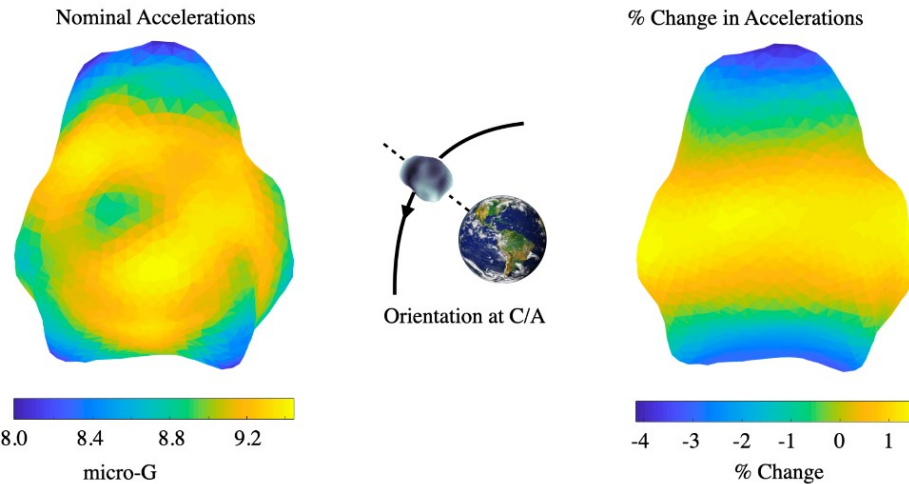


Distribuzione della accelerazione angolare

## Distribuzione di massa omogenea

Accelerazione angolare massima è pari a  $8\mu\text{G}$

Accelerazione dovuta all'interazione Terra-Apophis è pari a  $1.2\mu\text{G}$

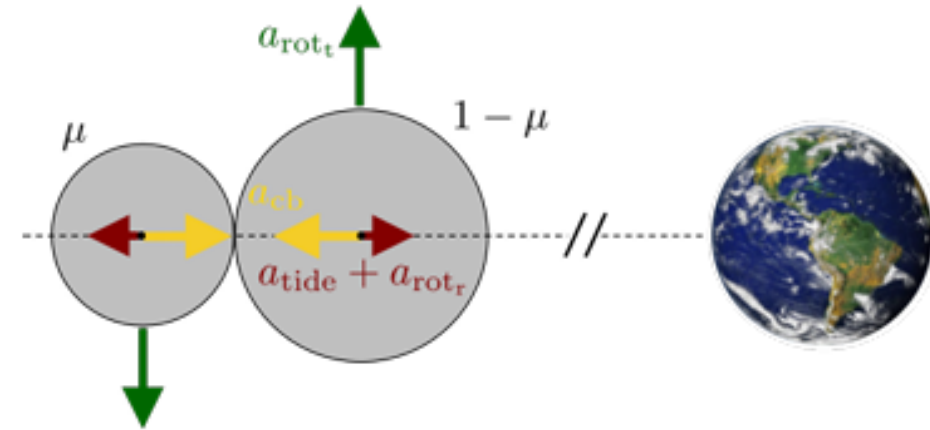


Distribuzione delle forze e variazione percentuale di accelerazione

## Distribuzione di massa non omogenea

Rapporto tra accelerazione Terra-Apophis e accelerazione reciproca pari a 0.1

Rapporto tra accelerazione angolare accelerazione reciproca pari a 0.04



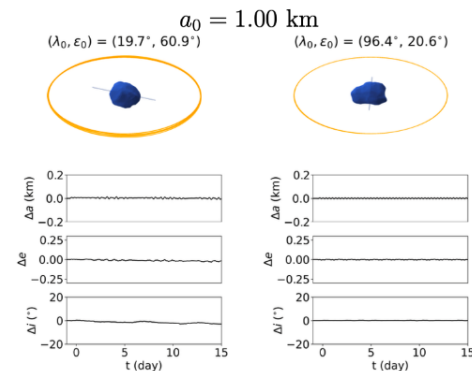
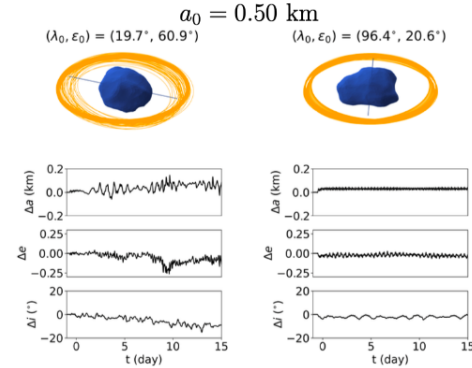
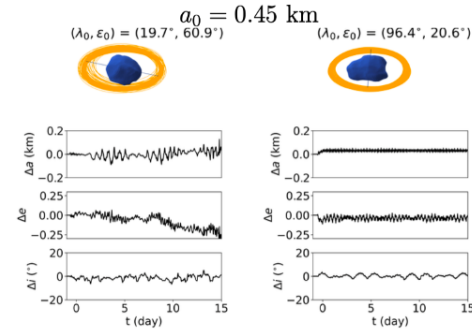
Modello a due masse di Apophis con accelerazioni più rilevanti



## Variation of the spin axis

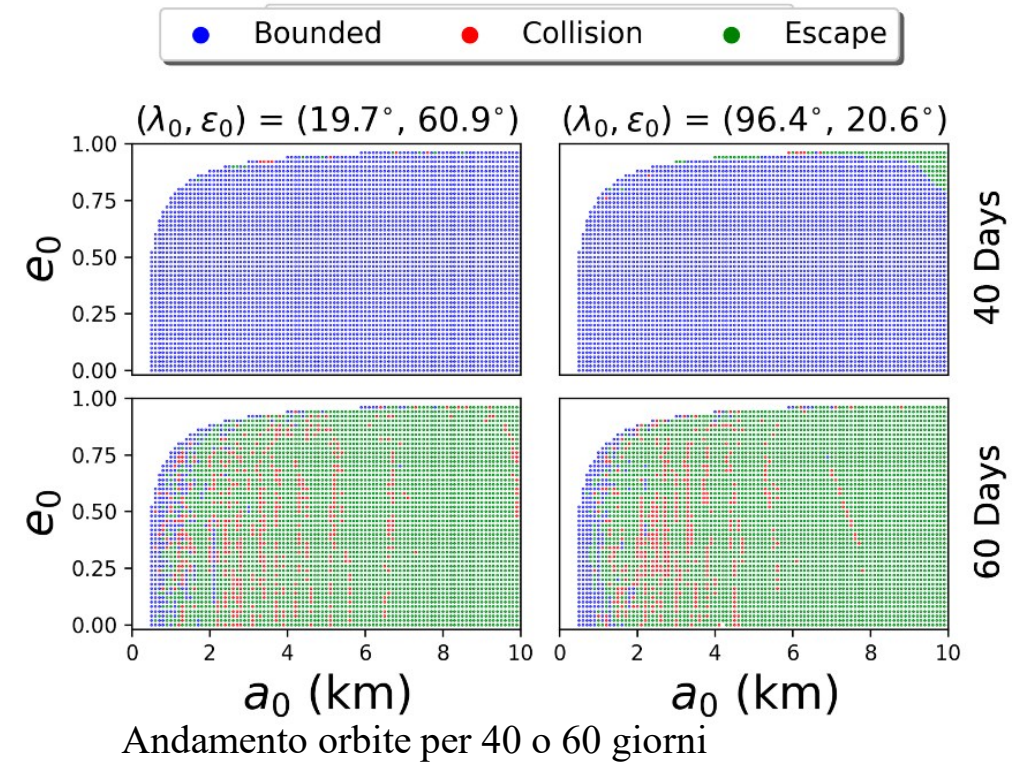
Variation of spin minor axis due to minor effects

Variation of spin major axis due to minor effects



## Study of orbital stability

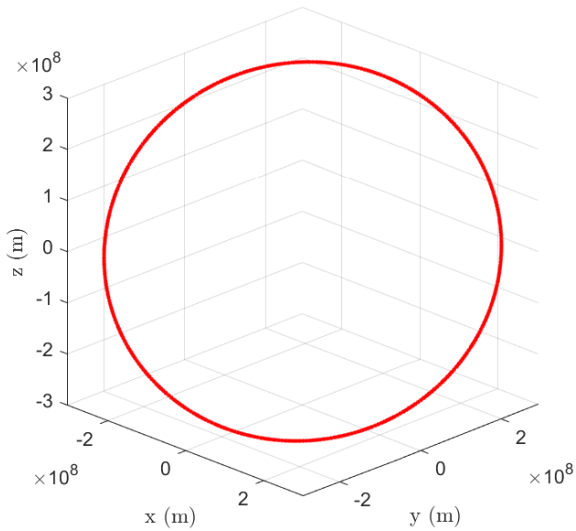
95% of orbits collide or escape after the fly by



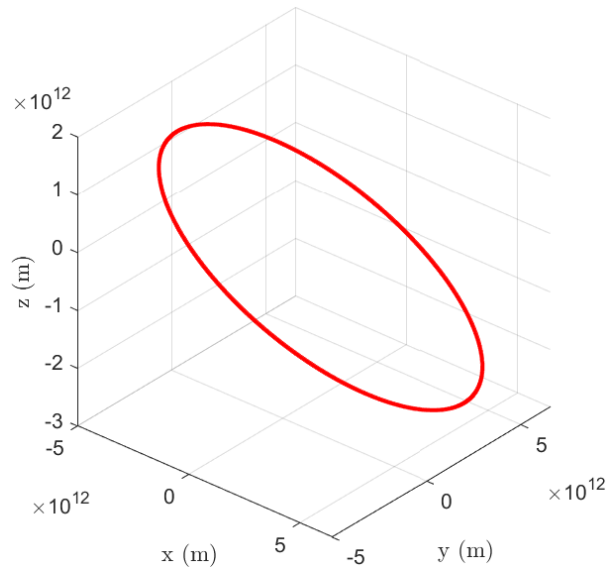
Effects of  $a$ ,  $e$  and  $i$  changes on the spin axis at different  $a$

## Equazione orbitale

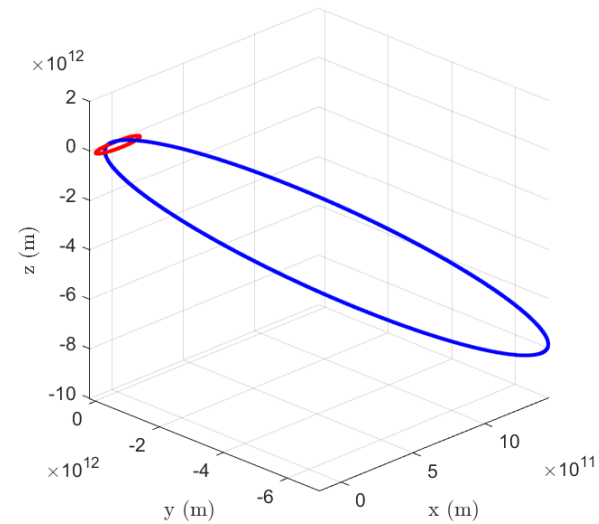
$$r = \frac{h^2}{\mu} \frac{1}{1 + e \cos \theta}$$



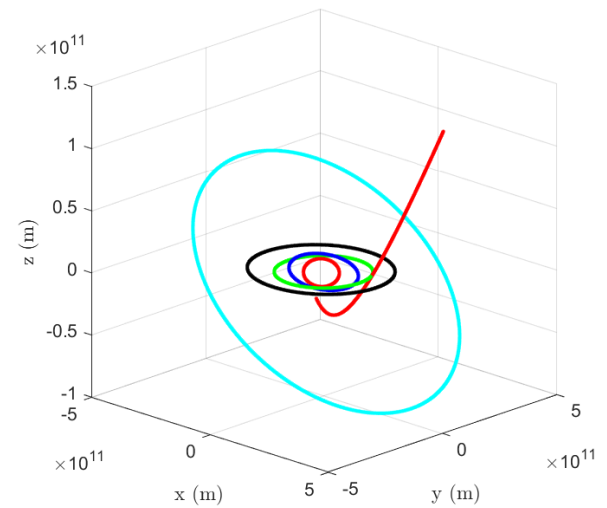
• Tritone ( $e = 0.00002$ )



• Plutone ( $e = 0.2488$ )

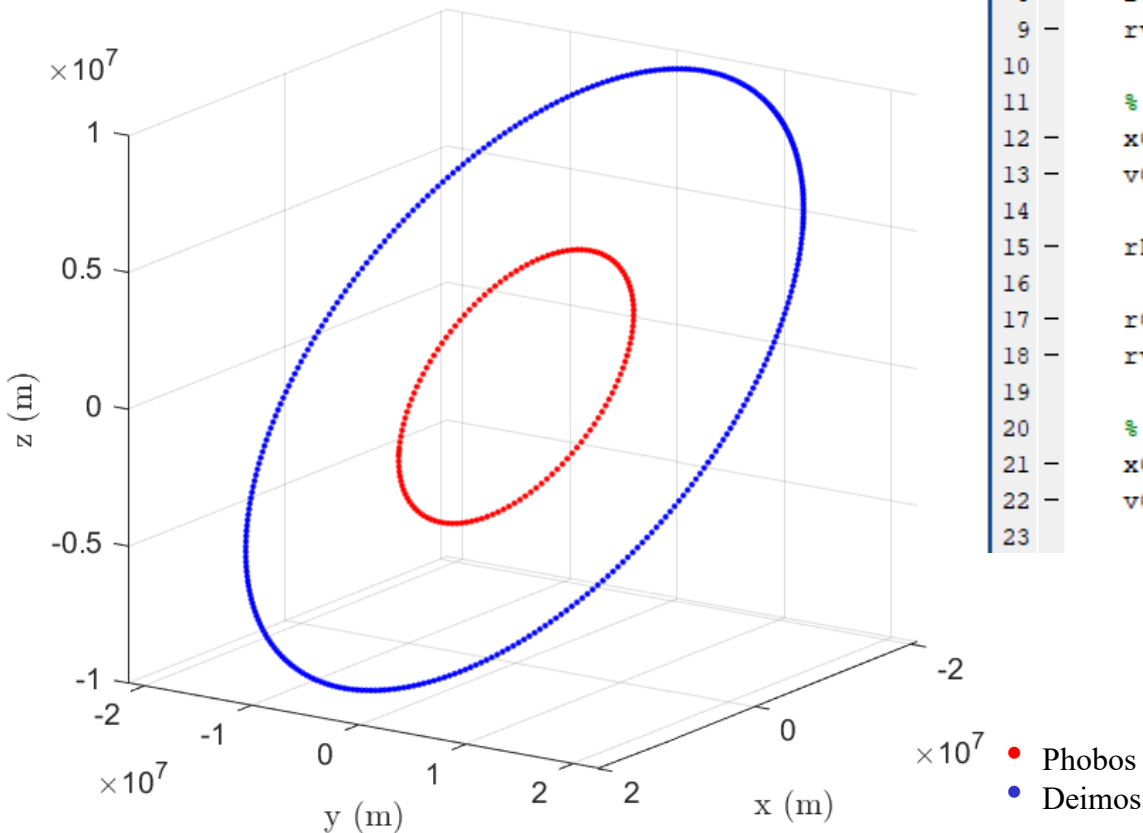


• Hale-Bopp ( $e = 0.9952$ )  
• Terra ( $e = 0.0228$ )



• Oumuamua ( $e = 1.194$ )  
• Cerere ( $e = 0.08$ )  
• Sistema solare interno

# Phobos e Deimos



```

Editor - C:\Users\Edoardo Galtarossa\Desktop\Tesi\main_trajectory_SP_Phodei.m
main_trajectory_SP_Phodei.m
1  % Ricavo velocità di trasferimento per Hohmann
2
3  au = 149597870700; % astronomical unit in metri
4  mu = 4.2828*10^13; % Parametro gravitazionale Marte
5
6  rPhobos = [0.000025*au -0.000054*au -0.000016*au 1.73*10^3 1.06*10^3 -7.57*10^2 ];
7
8  r0 =sqrt(((0.000025)^2)+((-0.000054)^2)+((-0.000016)^2));
9  rv0 = sqrt(((1.73*10^3)^2)+((1.06*10^3)^2)+((-7.57*10^2)^2));
10
11 % Posizione e velocità del corpo di partenza(Phobos)
12 x00 = r0*au; %in metri
13 v00= rv0; %in metri al secondo
14
15 rDeimos = [-0.000068*au 0.00013*au 0.000041*au -1.08*10^3 -6.78*10^2 4.34*10^2 ];
16
17 r01 = sqrt(((0.000068)^2)+((0.00013)^2)+((0.000041)^2));
18 rv01 =sqrt(((1.08*10^3)^2)+((-6.78*10^2)^2)+((4.34*10^2)^2));
19
20 % Posizione e velocità del corpo di arrivo (Deimos)
21 x01 = r01*au; % in metri
22 v01 = rv01; % in metri al secondo
23
    
```

www.dii.unipd.it

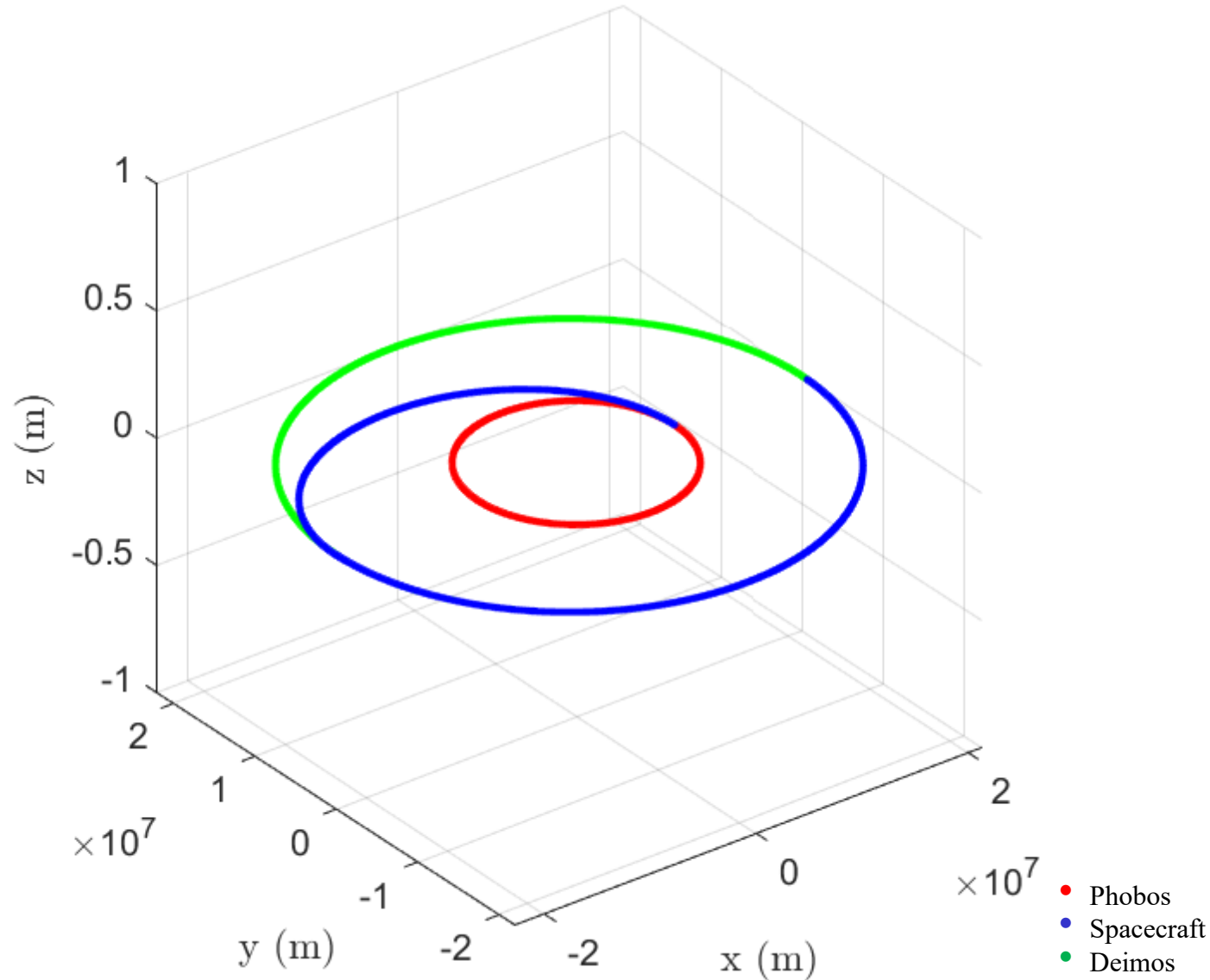
## Orbita di trasferimento

$$h = \sqrt{2\mu} \sqrt{\frac{r_a r_p}{r_a + r_p}}$$

```

23
24 % Lobiiettivo è quello di calcolare la velocità necessaria ad una spacecraft
25 % per passare da Phobos a Deimos con un Hohmann
26
27 % Si calcola quindi il momento angolare
28 - h = sqrt((2*mu)*((x00*x01)/(x00+x01)));
29 - v = h/x00;
30
31 % Introduciamo i vettori posizione e velocità per i soggetti in campo
32 % Phobos
33 - r0 = [x00 0 0 0 v00 0];
34 % Deimos
35 - r01 = [-x01 0 0 0 v01 0];
36 % Spacecraft
37 - r02 = [x00 0 0 0 v 0];
38 %Spacecraft2
39 - r03 = [-x01 0 0 0 -v01 0];
40

```



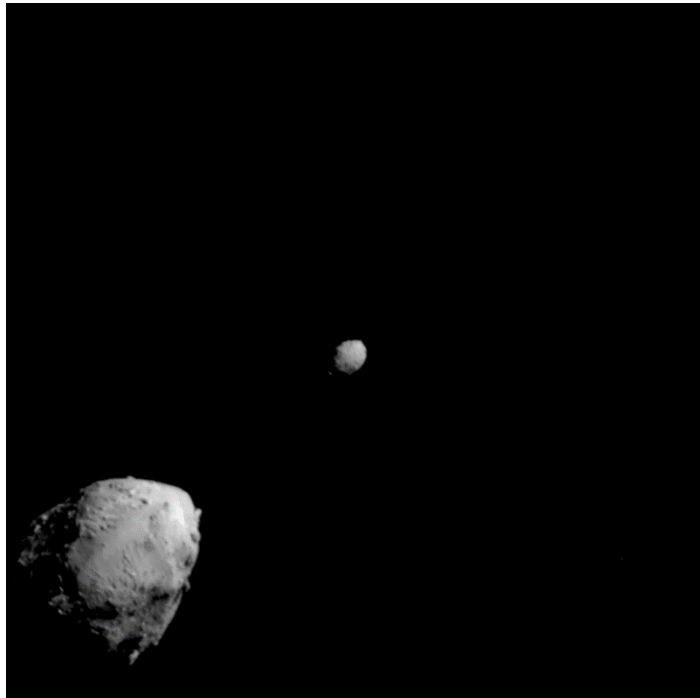
```

40
41 - d = 86400;
42
43 - inter1 = 10;
44 - tend1 = 0.319*d;
45 - inter2 = 10;
46 - tend2 = 1.263*d;
47 - inter3 = 10;
48 - tend3 = 0.3727*d;
49 - inter4 = 10;
50 - tend4 = 0.57*d;
51
52
53 - [t,x0] = integratore_Mars_Phobos(r0,inter1,tend1);
54 - [t,x1] = integratore_Mars_Deimos(r01,inter2,tend2);
55 - [t,x2] = integratore_Mars_Deimos(r02,inter3,tend3);
56 - [t,x3] = integratore_Mars_Deimos(r03,inter4,tend4);
57
58 - plot3(x0(:,1),x0(:,2),x0(:,3),'r')
59 - hold on
60 - plot3(x1(:,1),x1(:,2),x1(:,3),'g')
61 - hold on
62 - plot3(x2(:,1),x2(:,2),x2(:,3),'b')
63 - hold on
64 - plot3(x3(:,1),x3(:,2),x3(:,3),'b')
65 - hold off
66
67 - xlabel('x (m)','interpreter','latex');
68 - ylabel('y (m)','interpreter','latex');
69 - zlabel('z (m)','interpreter','latex');
70 - grid on
71 - axis square
72
73
74

```

Lo studio di oggetti come **Apophis** e il sistema **Didymos** e **Dimorphos** garantirà un aumento considerevole delle nostre conoscenze riguardo **l'origine del sistema solare** e la **difesa spaziale**.

Queste missioni sono un ulteriore esempio di collaborazione internazionale per uno scopo comune.



Didymos (in basso a sinistra) e Dimorphos (al centro)



Terra da Voyager 1, 14 febbraio 1990

La **simulazione** permette di visualizzare l'effetto dei calcoli svolti a lezione e studiare la vera **dimensione dello spazio** nel sistema solare.

Garantendo una migliore comprensione della teoria studiata e analizzata in questo elaborato

## Sitografia

### Immagini

<https://www.heramission.space/planetarydefence>  
<https://science.nasa.gov/solar-system/asteroids/didymos/>  
[https://www.esa.int/ESA\\_Multimedia/Images/2012/09/Laser\\_from\\_Optical\\_Ground\\_Station\\_on\\_Tenerife](https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2012/09/Laser_from_Optical_Ground_Station_on_Tenerife)  
[https://www.esa.int/Space\\_in\\_Member\\_States/Italy/Ecco\\_a\\_voi\\_Ramses\\_la\\_missione\\_ESA\\_sull\\_asteroide\\_Apophis](https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Italy/Ecco_a_voi_Ramses_la_missione_ESA_sull_asteroide_Apophis)  
<https://www.heramission.space/>  
<https://www.nasa.gov/image-article/osiris-rex-artists-concept/>  
<https://science.nasa.gov/solar-system/asteroids/25143-itokawa/>  
<https://science.nasa.gov/resource/voyager-1s-pale-blue-dot/>  
[https://www.esa.int/ESA\\_Multimedia/Images/2023/02/Didymos\\_and\\_Dimorphos\\_seen\\_by\\_DART](https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2023/02/Didymos_and_Dimorphos_seen_by_DART)

### Testi

<https://catalina.lpl.arizona.edu/faq/what-are-neo-groups>  
<https://www.spacereference.org/asteroid/153-hilda-a875-vc>  
<https://neo.ssa.esa.int/search-for-asteroids>  
<https://neo.ssa.esa.int/risk-list>  
<https://neo.ssa.esa.int/search-for-comets>  
[https://www.esa.int/ESA\\_Multimedia/Images/2017/02/Flyeye\\_Observatory](https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2017/02/Flyeye_Observatory)  
[https://www.esa.int/Space\\_Safety/About\\_asteroids\\_and\\_Planetary\\_Defence](https://www.esa.int/Space_Safety/About_asteroids_and_Planetary_Defence)  
<https://sorvegliatispaziali.inaf.it/scala-torino/>  
<https://catalina.lpl.arizona.edu/faq/what-are-neo-groups>  
[https://www.esa.int/Space\\_Safety/Planetary\\_Defence/Apophis](https://www.esa.int/Space_Safety/Planetary_Defence/Apophis)  
[https://www.esa.int/Space\\_Safety/Planetary\\_Defence/Introducing\\_Ramses\\_ESA\\_s\\_mission\\_to\\_asteroid\\_Apophis](https://www.esa.int/Space_Safety/Planetary_Defence/Introducing_Ramses_ESA_s_mission_to_asteroid_Apophis)  
[https://www.esa.int/ESA\\_Multimedia/Images/2014/04/Hyperspectral\\_image\\_data\\_cube](https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2014/04/Hyperspectral_image_data_cube)  
<https://www.heramission.space/mission>  
<https://science.nasa.gov/mission/osiris-rex/in-depth/>

## Bibliografia

S. Aljbaae, J. Souchay , V. Carruba , D. M. Sanchez , A. F. B. A. Prado Influence of Apophis' spin axis variations on a spacecraft during the 2029 close approach with Earth

Andrea C. Morelli, Alessandra Mannocchi, Carmine Giordano, Fabio Ferrari, Francesco Topputo Initial Trajectory Assessment of the RAMSES Mission to (99942) Apophis

Conor J. Benson, Daniel J. Scheeres, Marina Brozović, Steven Chesley, Petr Pravec, Petr Scheirich Spin State Evolution of (99942) Apophis during its 2029 Earth Encounter

Edward J. Steele, C.Y.O'Connor ERADE Village Foundation, Piara Water, Perth WA, Australia Centre for Astrobiology, University of Ruhuna, Matara, Sri Lanka Melville Analytics Pty Ltd, Melbourne, VIC, Australia Introduction—Panspermia, 2020

T. G. Muller, C. Kiss, P. Scheirich, P. Pravec, L. O'Rourke, E. Vilnius, and B. Altieri Thermal Infrared Observations of Asteroid (99942) Apophis with Herschel