



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

Dipartimento di Ingegneria industriale

Corso di Laurea in
INGEGNERIA AEROSPAZIALE

Analisi e simulazione delle opportunità di imaging della missione Hera durante la fase di prossimità al sistema Didymos tramite Cosmographia

Tesi di Laurea in
ING-IND/05: Fondamenti di Meccanica Orbitale

Relatore

Prof. Marco Zannoni

Presentata da

Davide Braglia

Correlatore

Edoardo Gramigna

Sessione Ottobre 2025

Anno Accademico 2024/2025

Sommario

In questo lavoro di tesi è stato impiegato Cosmographia, software di visualizzazione 3D sviluppato dal Navigation and Ancillary Information Facility della NASA, come strumento per la simulazione delle osservazioni della Asteroid Framing Camera a bordo della missione Hera. Le simulazioni sono necessarie per generare un’anteprima della geometria di osservazione e, quindi, per pianificare con maggiore dettaglio l’esperimento di radio scienza, che tramite l’utilizzo di osservabili radiometriche e ottiche, permetterà di stimare il campo gravitazionale, le masse, lo stato dinamico e rotazionale del sistema Didymos-Dimorphos.

Per svolgere il lavoro di tesi si è reso necessario uno studio preliminare dell’esperimento di radio scienza di Hera, volto a comprendere il contributo delle osservazioni ottiche della Asteroid Framing Camera all’interno dell’esperimento. L’attività ha riguardato l’applicazione delle funzionalità di Cosmographia, in particolare l’uso dei kernel SPICE e la produzione dei *Catalog file* in formato JavaScript Object Notation per implementare la missione Hera in Cosmographia.

Sono stati quindi sviluppati due setup dedicati in Cosmographia, utilizzando come banco di prova il flyby di Marte del 12 marzo 2025. Il confronto fra immagini simulate e immagini reali ha permesso di validare l’affidabilità della configurazione, prerequisito fondamentale per estendere le simulazioni alla fase di prossimità al sistema Didymos–Dimorphos. Questa seconda configurazione è stata sviluppata a partire dalla precedente, includendo il sistema Didymos–Dimorphos, così da generare le immagini attese durante la fase asteroidale.

La tesi è strutturata come segue: nel Capitolo 1 vengono introdotti gli obiettivi delle missioni di difesa planetaria con particolare enfasi su DART e Hera, nel Capitolo 2 sono presentati obiettivi, fasi della missione e strumenti di bordo della missione Hera; il Capitolo 3 introduce generalità su Cosmographia e l’uso dei dati SPICE; nel Capitolo 4 vengono descritte le configurazioni della missione Hera nei due diversi scenari considerati; il Capitolo 5 riporta i risultati delle osservazioni simulate; conclude la tesi il Capitolo 6 riassumendo i risultati ottenuti e possibili sviluppi futuri.

Ringraziamenti

Indice

1	Introduzione	1
1.1	DART e LICIACube	1
1.2	Il sistema binario Didymos-Dimorphos	2
2	Missione Hera	5
2.1	Obiettivi di missione	5
2.2	Fasi della missione	6
2.3	Strumenti di bordo	7
2.4	Esperimento di Radio-Scienza	8
3	Cosmographia	11
4	Implementazione della missione Hera in Cosmographia	13
4.1	Richiamo al tirocinio - Scenario del flyby di Marte	13
4.1.1	SPICE Data Catalog file	13
4.1.2	Spacecraft Catalog file per Hera	16
4.1.3	Sensor Catalog file per AFC	17
4.2	Scenario della fase asteroidale	19
4.2.1	SPICE Data Catalog file per la fase asteroidale	19
4.2.2	Spacecraft Catalog file per Didymos e Dimorphos	21
4.2.3	Spacecraft e Sensor Catalog file	22
5	Risultati	23
5.1	Flyby di Marte	23
5.2	Fase asteroidale	27
5.2.1	Early Characterization Phase (ECP)	27
5.2.2	Payload Deployment Phase (PDP)	28
5.2.3	Detailed Characterization Phase (DCP)	29
5.2.4	Close Observation Phase (COP)	30
5.2.5	Experimental Phase (EXP)	31
6	Conclusioni	33
A	Appendice – Codice JSON	35
	Bibliografia	38

Elenco delle figure

1.1	Immagine del LICIACube dell'ASI che mostra i pennacchi di materiale espulso da Dimorphos in seguito all'impatto di DART (26 settembre 2022). <i>Credit: ASI/NASA/APL.</i>	2
1.2	Immagine acquisita dalla camera Didymos Reconnaissance and Asteroid Camera for Optical navigation (DRACO) che mostra l'asteroide Dimorphos (a sinistra) e Didymos (a destra). <i>Credit: NASA/Johns Hopkins APL.</i>	3
2.1	Il grafico in figura descrive la distanza di Hera dai 2 asteroidi durante le fasi operative (fare riferimento alla legenda). <i>Credit: Gramigna et al. (2024).</i>	6
2.2	Immagine illustrativa di Hera e dei suoi strumenti. <i>Credit: Michel et al. (2022).</i>	8
2.3	Immagine schematica del funzionamento degli RSE.	9
3.1	Esempio di visualizzazione in Cosmographia, che mostra il Sistema Solare con Sole, pianeti, asteroidi principali e le loro orbite.	11
4.1	SPICE Data Catalog file del flyby di Marte.	14
4.2	Estratto dello script in Figura A.1.	16
4.3	Estratto script in Figura A.1.	17
4.4	Estratto script in Figura A.1.	17
4.5	Struttura S/C ottenuta con lo script in figura A.1.	17
4.6	Sensor Catalog file del flyby.	18
4.7	Rappresentazione del frustum in Cosmographia, ottenuto dall'implementazione dello script di Figura 4.6.	18
4.8	SPICE data Catalog file per la fase asteroidale.	19
4.9	Estratto script in Figura A.3.	21
4.10	Estratto script in Figura A.3.	21
4.11	Estratto script in Figura A.3.	21
4.12	Rappresentazione del Sistema Didymos-Dimorphos in Cosmographia, ottenuta dall'implementazione dello script in Figura A.3	22
4.13	Modifica apportata allo script in Figura 4.6.	22
5.1	L'immagine raffigura i parametri impostati per posizionare l'osservatore nel POV della AFC.	23
5.2	Immagine ottenuta con l' <i>Observation Catalog file</i> in Figura A.2. . . .	24

5.3	Confronto tra immagine reale (sinistra) e simulata (destra) alle 10:38:29 UTC del 12/03/2025.	24
5.4	Confronto tra immagine reale (sinistra) e simulata (destra) durante l'incontro con Deimos (12:08:31 UTC).	25
5.5	Confronto tra immagine reale (sinistra) e simulata (destra) alle 12:27:01 UTC.	25
5.6	Confronto tra immagine reale (sinistra) e simulata (destra) alle 12:43:01 UTC.	26
5.7	Andamento della risoluzione della AFC e della distanza di Didymos (in blu) e Dimorphos (in giallo) da Hera nel corso delle PO. <i>Credit: Michel et al. (2022)</i>	27
5.8	Immagine simulata acquisita il 14/02/27 12:12:00 UTC (fase ECP) da una distanza di ~ 20 km.	28
5.9	Immagine simulata acquisita il 21/02/27 09:41:00 UTC (fase ECP) da una distanza di ~ 21 km.	28
5.10	Immagine simulata acquisita il 17/03/27 13:42:00 UTC (fase ECP) da una distanza di ~ 28 km.	28
5.11	Immagine simulata acquisita l'11/04/27 08:20:00 UTC (fase DCP) che mostra Dimorphos da una distanza di ~ 10 km.	29
5.12	Immagine simulata acquisita il 25/04/27 16:07:00 UTC (fase DCP) che mostra Didymos da una distanza di ~ 9.3 km.	29
5.13	Sequenza di immagini simulate acquisite l'11/04/27 dalle 16:30:00 alle 18:30:00 UTC (fase DCP) a intervalli regolari. Mostra Didymos da una distanza di ~ 9.4 km.	30
5.14	Immagine simulata acquisita il 27/05/27 09:30:00 UTC (fase COP) che mostra Dimorphos da una distanza di ~ 5.8 km.	31
5.15	Immagine simulata acquisita il 27/05/27 04:43:00 UTC (fase COP) che mostra la superficie di Didymos da una distanza di ~ 4.6 km.	31
5.16	Sequenza di immagini simulate acquisite nell'arco del secondo flyby della fase COP che mette in risalto l'evoluzione del puntamento della AFC.	31
5.17	Immagine simulata acquisita il 17/07/27 17:42:00 UTC (fase EXP) che mostra la superficie di Didymos da distanza ~ 2.5 km.	32
5.18	Immagine simulata acquisita il 03/07/27 17:42:00 UTC (fase EXP) che mostra Dimorphos da distanza ~ 1 km.	32
A.1	Spacecraft Catalog file di Hera.	36
A.2	Observation Catalog file del flyby. Questo script è stato utilizzato per generare l'immagine in Figura 5.2.	38
A.3	Spacecraft Catalog file di Didymos e Dimorphos.	39

Elenco delle tabelle

3.1	Tipi di kernel SPICE	12
-----	--------------------------------	----

Acronimi

AFC	Asteroid Framing Camera
AIDA	Asteroid Impact and Deflection Assessment
ASI	Agenzia Spaziale Italiana
DART	Double Asteroid Redirection Test
ESA	European Space Agency
JSON	JavaScript Object Notation
NEA	Near-Earth Asteroid
NAIF	Navigation and Ancillary Information Facility
NASA	National Aeronautics and Space Administration
PO	Proximity Operation
RSE	Radio Science Experiment
SPICE	Spacecraft, Planet, Instrument, C-matrix, Events
S/C	Spacecraft
UNIBO	University of Bologna

Capitolo 1

Introduzione

La difesa planetaria rappresenta oggi uno degli obiettivi strategici più rilevanti dell'esplorazione spaziale: proteggere la Terra da possibili impatti di corpi minori costituisce una sfida scientifica e tecnologica di portata globale. Tra gli oggetti potenzialmente pericolosi figurano i *Potentially Hazardous Asteroids* (PHAs), asteroidi con diametro superiore a 140 m e distanza minima di intersezione orbitale con la Terra inferiore a 0,05 UA. Sebbene la probabilità di un impatto catastrofico sia bassa, la preparazione a tali eventi è ritenuta fondamentale per garantire la sicurezza del pianeta. Negli ultimi decenni numerose missioni dedicate allo studio dei corpi minori (come NEAR-Shoemaker, Stardust, Hayabusa, Rosetta, Deep Impact, Dawn, OSIRIS-REx, Hayabusa2 e Lucy) hanno fornito dati preziosi su composizione, struttura e dinamica di asteroidi e comete, gettando le basi per future strategie di mitigazione. In questo contesto si inserisce la collaborazione internazionale AIDA (Asteroid Impact and Deflection Assessment), che unisce gli sforzi di NASA (con DART) ed ESA (con Hera) per valutare l'efficacia della tecnica dell'impattatore cinetico, ossia la deviazione orbitale di un asteroide tramite urto controllato di una sonda (Cheng et al., 2018).

1.1 DART e LICIACube

La prima dimostrazione di deviazione orbitale è stata la missione DART (Double Asteroid Redirection Test) della NASA, lanciata nel novembre 2021 e progettata per colpire il satellite Dimorphos, in orbita attorno all'asteroide Didymos. L'impatto, avvenuto il 26 settembre 2022, ha ridotto il periodo orbitale di Dimorphos di circa 33 minuti, segnando il primo tentativo riuscito di modificare intenzionalmente l'orbita di un corpo celeste. Pochi minuti dopo l'evento, il LICIACube (Light Italian CubeSat for Imaging of Asteroids) dell'Agenzia Spaziale Italiana (ASI), rilasciato 15 giorni prima da DART, ha acquisito immagini del pennacchio di materiale espulso, documentando l'evoluzione della nube di detriti e fornendo osservazioni essenziali per la caratterizzazione dell'impatto (vedi Figura 1.1). Le osservazioni combinate di LICIACube, telescopi terrestri e orbitali hanno permesso di stimare un *momentum enhancement factor* $\beta = 3.61^{+0.19}_{-0.25}$, valore che indica un trasferimento di quantità di moto oltre tre volte superiore a quello dovuto al solo impatto diretto a causa del contributo aggiuntivo dovuto al materiale espulso. (Cheng et al., 2023).

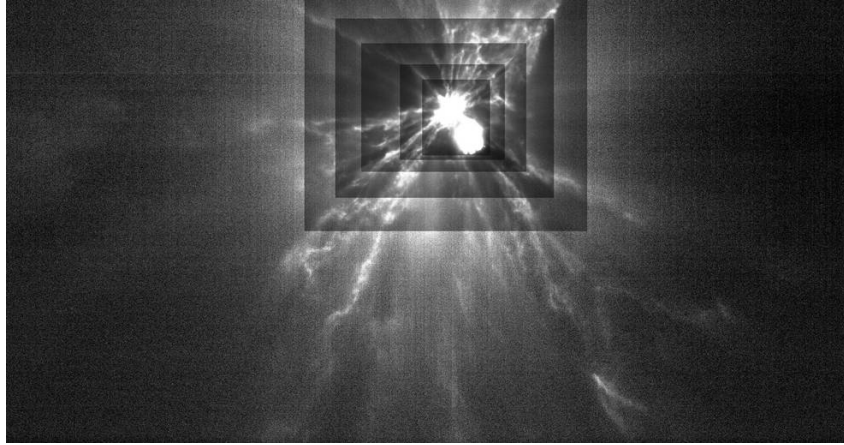


Figura 1.1: Immagine del LICIACube dell’ASI che mostra i pennacchi di materiale espulso da Dimorphos in seguito all’impatto di DART (26 settembre 2022). *Credit: ASI/NASA/APL.*

1.2 Il sistema binario Didymos-Dimorphos

Il sistema binario Didymos-Dimorphos (vedi Figura 1.2) è il principale oggetto di studio delle missioni DART e Hera (Michel et al., 2022). Didymos è un *Near-Earth Asteroid* (NEA) di tipo S, con un diametro medio di ~ 780 m, attorno al quale orbita il satellite Dimorphos, con diametro di ~ 160 m. Lo stato dinamico attuale è oggetto di studio di Hera. Tuttavia è noto che prima dell’impatto Dimorphos compiva un’orbita quasi circolare con periodo di 11,9 ore a una distanza di $\sim 1,2$ km dal corpo principale mentre il periodo post-impatto si è ridotto di ~ 33 minuti (Cheng et al., 2023). Didymos mostra una tipica forma “a trottola” e una rapida rotazione, caratteristiche che suggeriscono una struttura *rubble-pile*, ovvero un aggregato di frammenti tenuti insieme principalmente dalla gravità. Anche Dimorphos, per origine comune, si ritiene presenti una composizione simile. Il sistema Didymos, grazie alla sua accessibilità orbitale, alle dimensioni ridotte e alla sua natura binaria, costituisce un caso di studio ideale per testare sul campo la tecnica dell’impattatore cinetico.



Figura 1.2: Immagine acquisita dalla camera Didymos Reconnaissance and Asteroid Camera for Optical navigation (DRACO) che mostra l'asteroide Dimorphos (a sinistra) e Didymos (a destra). *Credit: NASA/Johns Hopkins APL.*

Capitolo 2

Missione Hera

Nonostante i risultati di DART e LICIACube abbiano fornito una conferma diretta della possibilità di deviare un corpo tramite impattatore cinetico, le osservazioni da remoto non sono sufficienti per comprendere a fondo i processi fisici coinvolti. Per questo motivo l'ESA ha sviluppato Hera, la prima missione europea di difesa planetaria, con il compito di raggiungere il sistema binario Didymos–Dimorphos nel 2027 e studiare in situ le conseguenze dell'impatto.

Hera fornirà misure dirette di massa, campo gravitazionale, struttura interna e proprietà termiche e meccaniche dei due corpi, completando così l'esperimento AIDA e fornendo dati cruciali per la calibrazione dei modelli di deflessione. In questo modo, la missione contribuirà in maniera determinante alla validazione delle strategie di mitigazione delle minacce asteroidali e alla pianificazione di future missioni di protezione planetaria.

2.1 Obiettivi di missione

L'obiettivo principale di Hera è condurre un'indagine completa del sistema Didymos–Dimorphos dopo l'impatto di DART, al fine di valutare quantitativamente l'efficacia della tecnica dell'impattatore cinetico e caratterizzare le proprietà fisiche, dinamiche e compositive del sistema (Michel et al., 2022).

In particolare, la missione permetterà di:

- Misurare la massa di Dimorphos con lo scopo di determinare l'efficienza del trasferimento di quantità di moto relativo dall'impatto di DART.
- Analizzare il cratere prodotto da DART per migliorare la comprensione dei meccanismi attraverso i quali la formazione del cratere influenza l'efficienza del trasferimento di quantità di moto
- Rilevare effetti dinamici difficili da osservare da remoto.
- Caratterizzare la superficie e l'interno di Dimorphos, per comprendere l'influenza di queste proprietà sulla risposta all'impatto.

Le analisi preliminari indicano che Hera sarà in grado di determinare la massa con un'incertezza inferiore allo 0.1%, la forma e le caratteristiche superficiali di

Dimorphos con risoluzione metrica, e la sua orbita relativa con precisione sub-metrica (Gramigna et al., 2024).

2.2 Fasi della missione

Hera è stato lanciato con successo lo scorso 7 ottobre 2024 a bordo del lanciatore Falcon 9 di SpaceX. Il 12 Marzo 2025 ha effettuato con successo il flyby di Marte raggiungendo un'altitudine minima di circa 5.700 km. Il flyby ha permesso di effettuare osservazioni ravvicinate delle lune Deimos e Phobos. L'arrivo nominale al sistema Didymos–Dimorphos è previsto per dicembre 2026 e segna l'inizio delle diverse fasi operative della missione (vedi Figura 2.1), ciascuna con obiettivi scientifici e tecnici specifici (Gramigna et al., 2024):

- **Early Characterization Phase (ECP):** acquisizione dei primi dati globali del sistema binario, inclusi orbite, forma e proprietà superficiali.
- **Payload Deployment Phase (PDP):** rilascio e messa in operatività dei CubeSat Milani e Juventas a supporto delle osservazioni ravvicinate.
- **Detailed Characterization Phase (DCP):** osservazioni ad alta risoluzione per affinare la conoscenza della morfologia, della densità e della struttura interna degli asteroidi.
- **Close Observation Phase (COP):** passaggi ravvicinati con acquisizione di immagini e misure dettagliate in aree di particolare interesse scientifico, come il cratere generato da DART.
- **Experimental Phase (EXP):** fasi dedicate a manovre e osservazioni sperimentali per testare capacità operative e raccogliere dati aggiuntivi.

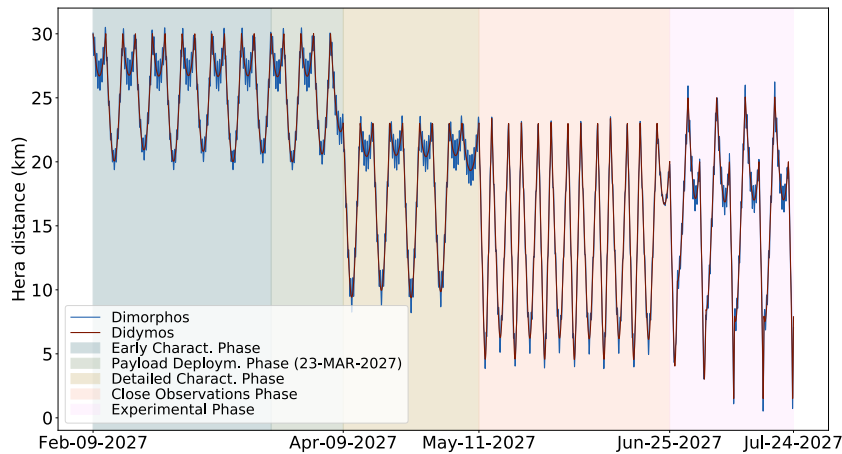


Figura 2.1: Il grafico in figura descrive la distanza di Hera dai 2 asteroidi durante le fasi operative (fare riferimento alla legenda). *Credit: Gramigna et al. (2024).*

2.3 Strumenti di bordo

L'apparato scientifico di Hera comprende numerosi strumenti (vedi Figura 2.2):

- **PALT (Planetary Altimeter)**: Altimetro laser per misurazioni di distanza e topografia.
- **TIRI (Thermal Infrared Imager)**: Camera nell'infrarosso termico per misurare la temperatura della superficie e osservare variazioni termiche.
- **HSI (Hyperscout-H)**: Camera iperspettrale che acquisisce dati in diverse bande dello spettro per determinare la composizione mineralogica e le proprietà superficiali degli asteroidi.
- **RSE (Radio Science Experiment)**: Consente di stimare la massa, la densità e i campi gravitazionali del sistema attraverso misure range-Doppler in banda X effettuate dalle stazioni a Terra, misure di ranging tramite inter-satellite link con i CubeSat e l'analisi delle immagini ottiche acquisite dalle camere di bordo.
- **AFC (Asteroid Framing Camera)**: Sistema di due camere ottiche identiche (AFC-1 e AFC-2 di backup), sviluppate da DLR, per acquisire immagini ad alta risoluzione (Michel et al., 2022). Si tratta di 2 camere panchromatiche (spettro: 370–1100 nm) con un rivelatore CMOS da 1020×1020 pixel e un campo visivo di $5,5 \times 5,5^\circ$. la risoluzione varia dai 3 ai 0,5 m/pixel in base alla fase della missione. Le AFC hanno molteplici funzioni: contribuiscono alla navigazione autonoma, alla misura della massa di Dimorphos tramite osservazioni dinamiche, alla ricerca di satelliti o detriti, e alla mappatura della superficie dei due corpi. Inoltre, le AFC forniranno dati sulla morfologia a varie scale, dall'analisi globale di crateri e regioni fino alla caratterizzazione locale di massi e regolite.

Hera, inoltre, trasporta due CubeSat scientifici, Milani e Juventas, che ampliano le capacità della missione grazie a misure dedicate. Juventas si occuperà di studiare l'interno di Dimorphos mentre Milani si concentrerà sull'analisi della composizione superficiale e delle polveri.

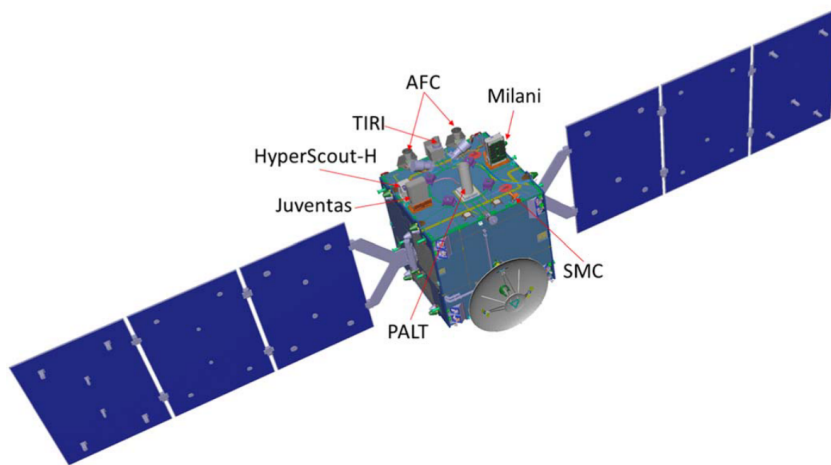


Figura 2.2: Immagine illustrativa di Hera e dei suoi strumenti. Credit: Michel et al. (2022).

2.4 Esperimento di Radio-Scienza

L'esperimento di radio scienza (RSE) di Hera combina misure ottenute da diversi strumenti, in particolare: Range-Doppler tra Hera e Terra tramite un *link two-way* in banda X, misure ranging tra Hera-CubeSats utilizzando un sistema radio *inter-satellite* in banda S, e l'analisi delle immagini ottiche acquisite dalla AFC (vedi Figura 2.3). In aggiunta, possono essere considerate anche immagini ottiche ottenute dai CubeSats, e misure altimetriche del LIDAR.

Il principio alla base degli RSE si fonda sulla determinazione orbitale precisa, ossia un processo iterativo volto a stimare i parametri fisici e dinamici del sistema a partire, come già accennato, da diverse tipologie di osservabili (Gramigna et al., 2024). Dal punto di vista pratico, si costruisce un modello dinamico del sistema che descrive il moto di Hera e degli asteroidi sotto l'azione delle principali forze gravitazionali e non gravitazionali e si assegnano valori iniziali ai parametri di interesse, ovvero le masse, gli stati orbitali e i coefficienti del campo gravitazionale. A partire da questo modello, vengono calcolate le osservabili "computed", cioè i valori teorici che ci si aspetta di ottenere dalle misure. Le osservabili "computed" vengono poi confrontate con le osservazioni reali ("observed") acquisite durante la missione. La differenza tra i due insiemi di dati viene definita "residuo" e indicata con $R = O - C$ e rappresenta lo scarto tra ciò che il modello prevede e ciò che è effettivamente misurato. A questo punto, un algoritmo di stima, come ad esempio un filtro ai minimi quadrati, cerca di ridurre i residui modificando in modo iterativo i parametri del modello finché non si raggiunge il valore minimo. Il risultato finale è una stima ottimizzata dei parametri del sistema: massa, distribuzione di massa e campo gravitazionale di Didymos e Dimorphos.

Questo approccio consente di integrare in modo coerente dati di natura diversa (radio, ottici e altimetrici) sfruttando le informazioni di ciascun sensore. Le misurazioni rendono l'RSE di Hera cruciale per soddisfare a pieno gli obiettivi dell'esperimento AIDA, permettendo di verificare l'efficienza del trasferimento di quantità di moto

prodotto da DART. Allo stesso tempo, contribuiranno ad ampliare la conoscenza degli asteroidi binari, fornendo dati significativi per la comunità scientifica.

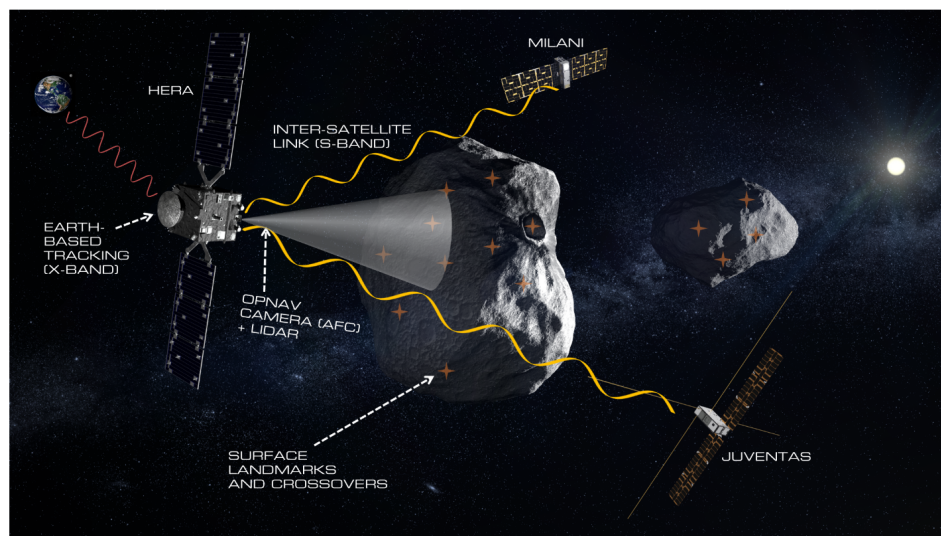


Figura 2.3: Immagine schematica del funzionamento degli RSE.

Capitolo 3

Cosmographia

Cosmographia è un programma di visualizzazione che riproduce il sistema solare e i suoi corpi in 3D per creare una mappa navigabile del sistema solare grazie alla possibilità di manipolare tempo e posizione dell'osservatore, vedi Figura 3.1.

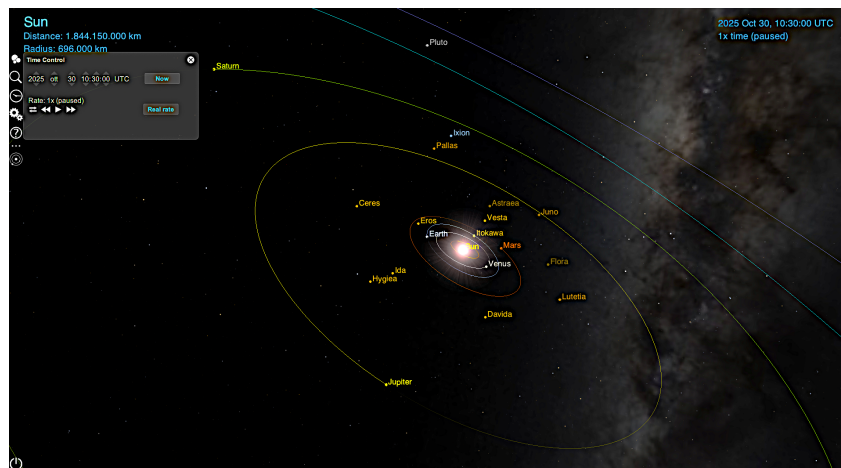


Figura 3.1: Esempio di visualizzazione in Cosmographia, che mostra il Sistema Solare con Sole, pianeti, asteroidi principali e le loro orbite.

Il Navigation and Ancillary Information Facility (NAIF) della NASA ha potenziato Cosmographia consentendo di utilizzare i dati SPICE di missioni e modellare accuratamente la geometria di osservazione delle missioni planetarie per le quali sono disponibili set di dati SPICE (Spacecraft, Planet, Instrument, C-matrix, Events) (NAIF, 2025). In questo modo è possibile non solo pianificare la missione ma anche di simulare le immagini che lo Spacecraft (S/C) catturerà, al fine di ottimizzare gli esperimenti e massimizzare il ritorno scientifico. I dati SPICE delle missioni sono organizzati in file denominati kernel. Ciascun kernel contiene una tipologia specifica di informazioni, riportate nella Tabella 3.1:

Tabella 3.1: Principali tipologie di kernel SPICE e relativa funzione.

Tipo	Nome esteso	Funzione
SPK	<i>Spacecraft and Planet Kernel</i>	Orbite di pianeti, lune, asteroidi e traiettorie di S/C.
CK	<i>C-Kernel</i>	Descrive l'orientamento nel tempo (assetto) dello S/C. È fondamentale per sapere dove puntano gli strumenti.
FK	<i>Frame Kernel</i>	Definizione dei sistemi di riferimento e relazione tra i frame esistenti.
IK	<i>Instrument Kernel</i>	Definisce parametri geometrici e ottici degli strumenti a bordo.
DSK	<i>Digital Shape Kernel</i>	Contiene modelli tridimensionali delle superfici di corpi celesti (es. asteroidi, lune).
SCLK	<i>Spacecraft Clock Kernel</i>	Permette la conversione tra tempo di bordo (SCLK) e tempo SPICE (ET).
LSK	<i>Leapseconds Kernel</i>	Contiene dati e costanti che permettono la conversione tra tempo universale (UTC) e tempo SPICE (ET).
PCK	<i>Planetary Constants Kernel</i>	Costanti fisiche e rotazionali di corpi celesti.
MK	<i>Meta-Kernel</i>	Lista di kernel da caricare in un singolo script. Facilita l'organizzazione.

Capitolo 4

Implementazione della missione Hera in Cosmographia

L'implementazione della missione Hera in Cosmographia richiede la creazione di un setup dedicato, che consenta al software di interpretare correttamente dati orbitali, assetti e caratteristiche degli strumenti. In particolare, per simulare una missione o un'osservazione è necessario predisporre una serie di *Catalog file* in formato JavaScript Object Notation (JSON) (Michelle Park, 2015), ciascuno con una funzione specifica:

1. **SPICE Data Catalog file**, che gestisce il caricamento dei kernel SPICE selezionati per la simulazione.
2. **Spacecraft Catalog file**, che definisce geometria, traiettoria e assetto di ogni elemento dello S/C e di corpi celesti.
3. **Sensor Catalog file**, che specifica la posizione, il campo visivo e altri parametri degli strumenti a bordo.

4.1 Richiamo al tirocinio - Scenario del flyby di Marte

Al fine di valutare la corretta implementazione del setup, durante il lavoro di tirocinio è stato analizzato lo scenario del flyby di Marte, riportato in questa sezione per completezza. Durante il flyby, avvenuto il 12 marzo 2025, è stata effettuata un'osservazione preliminare per accertarsi del funzionamento nominale degli strumenti. L'osservazione ha raccolto immagini che, ai fini del tirocinio, sono state utilizzate come riscontro con i risultati simulati (vedi Capitolo 5). Successivamente, nella Sezione 4.2, il procedimento è stato esteso alla fase asteroidale a partire dal setup descritto di seguito per concludere il lavoro di tesi.

4.1.1 SPICE Data Catalog file

Questa tipologia di file è necessaria per caricare su Cosmographia i kernel di missione desiderati. Occorre utilizzare la funzione "spiceKernels" : [array_di_kernel]. È possibile:

- caricare singolarmente i kernel, come nello script in Figura 4.1 ;

- caricare un unico Meta-Kernel, la cui funzione è contenere e gestire un set di kernel completo per focalizzarsi su uno scenario specifico.

Scelta dei kernel per il flyby di Marte

Figura 4.1: SPICE Data Catalog file del flyby di Marte.

```

1 {
2   "version": "1.0",
3   "name": "Mars flyby",
4   "spiceKernels": [
5     "../ck/hera_sc_meas_250301_250331_s250401_v03.bc",
6     "../spk/de432s.bsp",
7     "../spk/mar097_20160314_20300101.bsp",
8     "../spk/hera_sci_v01.bsp",
9     "../spk/hera_struct_v02.bsp",
10    "../spk/hera_fcp_000047_241007_261118_v01.bsp",
11    "../fk/hera_v14.tf",
12    "../fk/hera_ops_v05.tf",
13    "../ik/hera_afc_v05.ti",
14    "../dsk/deimos_k005_tho_v02.bds",
15    "../dsk/phobos_m003_gas_v01.bds",
16    "../sclk/hera_step_250401_v02.tsc",
17    "../lsk/naif0012.tls",
18    "../pck/pck00011.tpc",
19    "../pck/de-403-masses.tpc"
20  ]
21 }
```

I kernel di missione della missione Hera sono resi disponibili dall'ESA e vengono aggiornati periodicamente. I kernel scelti per la simulazione del flyby di Marte sono i seguenti:

1. **CK** Essendo il flyby avvenuto il 12 marzo 2025, ovvero prima dell'assegnazione della tesi, sono stati utilizzati kernel di assetto **meas**, ovvero misurati (non **predicted**). In questo modo è possibile conoscere il puntamento reale della AFC durante il flyby.

- **hera_sc_meas_250301_250331_s250401_v03.bc**
Assetto reale S/C dal 1 al 31 marzo 2025.

2. SPK

- **hera_fcp_000047_241007_261118_v01.bsp**
Traiettoria della sonda. Nonostante non riporti **meas** nel nome, contiene dati reali fino ad aprile 2025 e **predicted** successivamente.
- **de432s.bsp**
Efemeridi ad alta precisione di pianeti e lune principali.

- `mar097_20160314_20300101.bsp`
Efemeridi dettagliate di Marte e delle sue lune.
 - `hera_struct_v02.bsp`
Posizioni relative delle parti della sonda (strumenti, antenne, strutture).
3. **FK** Definiscono i sistemi di riferimento di Hera (bus, strumenti, pannelli, antenne) e le relazioni geometriche. Serve a associare assetto (CK) e traiettoria (SPK).
- `hera_v14.tf`
 - `hera_ops_v05.tf`
Introduce sistemi di riferimento operativi, cioè specifici per la pianificazione e l'analisi della missione.
4. **IK** Essendo il tirocinio focalizzato unicamente sulla AFC non è necessario caricare i kernel relativi a tutti gli altri strumenti.
- `hera_afc_v05.ti`
Descrive la geometria e i parametri della camera AFC: campo di vista, dimensione CCD, definizione dei pixel e centro ottico.
5. **DSK** Nonostante Deimos e Phobos siano già presenti di default avviando Cosmographia, è preferibile caricare anche gli shape model delle 2 lune in quanto non sono collegate al sistema SPICE.
- `deimos_k005_tho_v02.bds`
 - `phobos_m003_gas_v01.bds`
6. **SCLK** Converte il tempo del computer di bordo (SCLK) in tempo ephemeris (ET).
- `hera_step_250401_v02.tsc`
al fine di mantenere coerenza con i kernel `meas` è fondamentale utilizzare SCLK di tipo `step` e non `fict` (ovvero fittizi) in quanto quest'ultimi non tengono in considerazione i drift e salti di sincronizzazione che subisce l'orologio di bordo.
7. **LSK**
- `naif0012.tls`
È indispensabile per sincronizzare eventi e misure durante il flyby: senza, non sarebbe possibile convertire date reali in tempi SPICE (ET).
8. **PCK** Contengono le costanti fisiche e dinamiche di pianeti e corpi (raggi, orientazione assiale, masse).
- `pck00011.tpc`
 - `de-403-masses.tpc`

Questi kernel, riassunti nella Figura 4.1 costituiscono il set minimo sufficiente per visualizzare il flyby. Per poter completare l'implementazione è necessario predisporre altri *Catalog file*, come quelli in Figura A.1 e Figura 4.6, che verranno definiti nelle prossime due sezioni.

4.1.2 Spacecraft Catalog file per Hera

Questa tipologia di file non si limita a definire lo S/C, ma qualunque corpo dotato di modello 3D, traiettoria e sistema di riferimento che non sia già presente di default in Cosmographia. Ad esempio, qualora si volesse implementare il sistema Didymos-Dimorphos sarebbe necessario predisporre un ulteriore *Spacecraft Catalog file*, perchè l'asteroide non è presente di default su Cosmographia. Nel caso del flyby di Marte, invece, è sufficiente un unico *Spacecraft Catalog file*. Il file è essenziale perchè associa i kernel precedentemente caricati a un oggetto, rendendone possibile la visualizzazione su Cosmographia.

Il modello 3D di Hera è frammentato in diversi singoli elementi (bus, pannelli solari, sensori e antenne), che devono essere definiti nello stesso *Catalog file* ma come spacecraft distinti, come mostrato in Figura A.1. Tuttavia, ai fini della tesi, sarebbero sufficienti due soli elementi: HERA (bus principale) e HERA_AFC-1. Gli altri componenti danno solo un contributo estetico allo S/C e non influiscono in alcun modo sull'output del lavoro di tesi. Tuttavia sono stati inclusi per completezza, dando come risultato lo S/C in Figura 4.5. Nonostante nessuno degli oggetti (eccetto HERA) disponga di un kernel SPK dedicato, ciascuno include comunque una sezione "trajectory", vedi script in Figura 4.2:

Figura 4.2: Estratto dello script in Figura A.1.

```

35     "center": "HERA",
36     "trajectory": {
37         "type": "Spice",
38         "target": "HERA_AFC-1",
39         "center": "HERA_SPACECRAFT" },

```

Per Cosmographia, infatti, ogni oggetto deve disporre di una traiettoria. Questa può essere ricavata automaticamente per composizione a partire da tre contributi distinti:

- la traiettoria di Hera, fornita dal kernel SPK
hera_fcp_000047_241007_261118_v01.bsp;
- l'orientamento di Hera, descritto nel kernel CK
hera_sc_meas_250301_250331_s250401_v03.bc;
- la posizione relativa dei singoli strumenti rispetto al bus, definita nel kernel SPK hera_struct_v02.bsp.

Nel codice sono inoltre definiti altri aspetti, come ad esempio il sistema di riferimento, vedi Figura 4.3: Il nome del sistema di riferimento non è arbitrario, ma va scelto consultando il kernel hera_v14.tf.

Altre specifiche riportate nel codice sono invece puramente opzionali ed estetiche, come i parametri di visualizzazione della traiettoria, vedi Figura 4.4 (Michelle Park, 2015):

Figura 4.3: Estratto script in Figura A.1.

```

40   "bodyFrame": {
41       "type": "Spice",
42       "name": "HERA_AFC-1" },

```

Figura 4.4: Estratto script in Figura A.1.

```

20   "label": {
21       "color": [1, 1, 1] },
22   "trajectoryPlot": {
23       "color": [1, 0, 0],
24       "lineWidth": 1,
25       "duration": "7 d",
26       "lead": 0.0,
27       "fade": 0.25,
28       "sampleCount": 1000 }

```

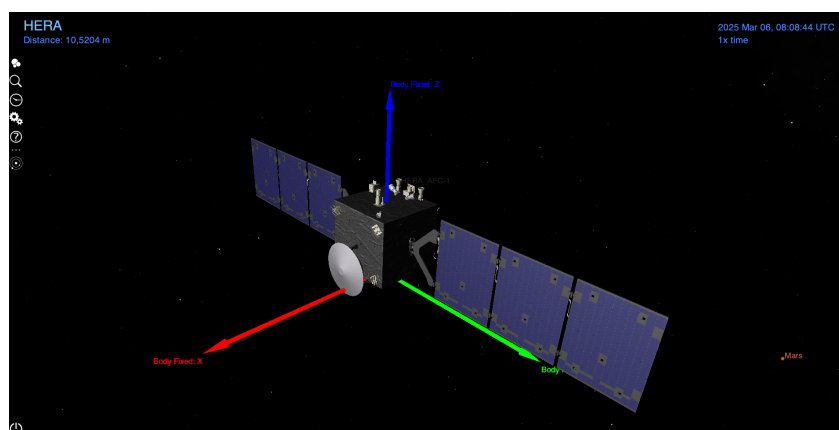


Figura 4.5: Struttura S/C ottenuta con lo script in figura A.1.

4.1.3 Sensor Catalog file per AFC

Il *Sensor Catalog file* definisce posizione, orientamento e geometria del campo visivo attraverso i parametri specificati nell'IK caricato nel *SPICE Data Catalog file*. Come già accennato, la tesi è focalizzata unicamente sulla AFC, motivo per cui è stato sufficiente predisporre un solo *Sensor Catalog file* (vedi Figura 4.6). E' importante precisare che non è possibile definire un sensore prima di averlo definito come oggetto fisico (cioè uno spacecraft), per questo l'AFC è stata inclusa anche nello *Spacecraft Catalog file*. Una volta caricato il file su Cosmographia, ciò che si osserva è la rappresentazione geometrica del frustum, vedi figura 4.7. Oltre a fornire una rappresentazione visiva, il frustum è uno strumento utile per verificare in ogni istante quali corpi o regioni del sistema entrano nel campo visivo della camera. Nel Capitolo 5.1 verranno presentati i risultati delle simulazioni, mostrando come le immagini generate in Cosmographia siano state prodotte tenendo conto del campo visivo della

Figura 4.6: Sensor Catalog file del flyby.

```

1 {
2   "version": "1.0",
3   "name": "Mars flyby",
4   "items": [
5     {
6       "class": "sensor",
7       "name": "HERA_AFC-1-SENSOR",
8       "parent": "HERA",
9       "center": "HERA_AFC-1",
10      "trajectoryFrame": {
11        "type": "BodyFixed",
12        "body": "HERA" },
13      "geometry": {
14        "type": "Spice",
15        "instrName": "HERA_AFC-1",
16        "rangeTracking": true,
17        "target": "Mars",
18        "range": 500,
19        "frustumColor": [ 0.0, 1.0, 0.0 ],
20        "frustumOpacity": 0.3,
21        "gridOpacity": 0.8,
22        "footprintOpacity": 0.8,
23        "sideDivisions": 125,
24        "onlyVisibleDuringObs": false }
25    }
26  ]
27 }

```

AFC e delle sue caratteristiche geometriche, permettendo di confrontarle con le immagini vere ottenute durante il flyby.

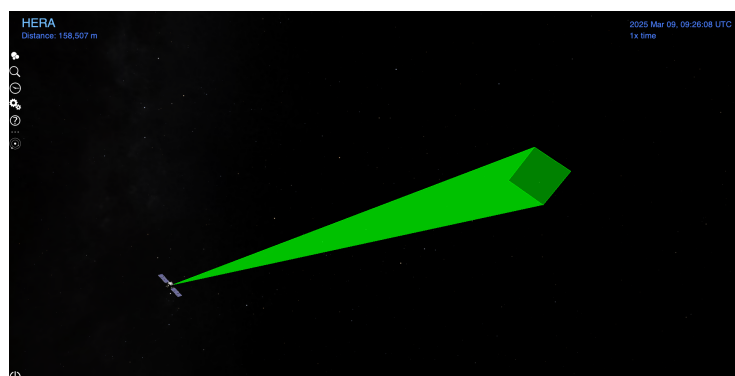


Figura 4.7: Rappresentazione del frustum in Cosmographia, ottenuto dall'implementazione dello script di Figura 4.6.

4.2 Scenario della fase asteroidale

Il setup sviluppato per la fase asteroidale condivide numerosi elementi con quello descritto nel capitolo precedente, trattandosi di una configurazione relativa alla stessa missione. Presenta però alcune differenze significative dovute a due motivi principali: l'esigenza di implementare il sistema Didymos–Dimorphos e il vincolo legato alla limitata disponibilità di kernel di *Proximity Operations* (PO).

4.2.1 SPICE Data Catalog file per la fase asteroidale

I kernel selezionati per la simulazione della fase asteroidale sono stati caricati tramite lo *SPICE Data Catalog file* riportato in Figura 4.8. I kernel di traiettoria e assetto relativi alle fasi di PO messi a disposizione dall'ESA risalgono al 2021. Conseguentemente per mantenere coerenza tra i kernel sono state utilizzati versioni meno recenti rispetto al flyby di Marte. Per il contenuto dei kernel comuni al flyby

Figura 4.8: SPICE data Catalog file per la fase asteroidale.

```

1 {
2   "version": "1.0",
3   "name": "Asteroid Phase",
4   "spiceKernels": [
5     "ck/hera_sc_PO_EMA_20270209_20270724_f20181203_v01.bc",
6     "spk/HERA_sc_PO_LP0_EMA_2024_v04.bsp",
7     "spk/de432s.bsp",
8     "spk/hera_struct_v00.bsp",
9     "spk/didymos_hor_200101_300101_v01.bsp",
10    "spk/didymos_gmv_270101_330623_v02.bsp",
11    "spk/hera_dart_impact_site_v03.bsp",
12    "fk/hera_v06.tf",
13    "ik/hera_afc_v03.ti",
14    "dsk/g_01165mm_spc_obj_didy_0000n00000_v003.bds",
15    "dsk/g_00243mm_spc_obj_dimo_0000n00000_v004.bds",
16    "sclk/hera_fict_20181203.tsc",
17    "lsk/naif0012.tls",
18    "pck/hera_didymos_v06.tpc",
19    "pck/pck00011.tpc",
20    "pck/de-403-masses.tpc"
21  ]
22 }
```

di Marte si rimanda al capitolo 4.1.1, mentre i kernel specifici di questa fase sono descritti di seguito:

1. **CK** Essendo la PO prevista per la prima metà del 2027, ovvero dopo la fine del lavoro di tesi, sono stati utilizzati kernel di assetto *predicted*. Quindi il puntamento non è quello reale.

- `hera_sc_PO_EMA_20270209_20270724_f20181203_v01.bc`
Assetto dal 9 febbraio al 24 luglio 2027.
2. **SPK** Oltre alla traiettoria `predicted` dello S/C, è stato necessario aggiungere gli SPK relativi agli asteroidi.
- `HERA_sc_PO_LPO_EMA_2024_v04.bsp`
Traiettoria di Hera completa (da lancio a PO comprese).
 - `didymos_hor_200101_300101_v01.bsp`
Orbita del baricentro del sistema Didymos-Dimorphos rispetto al Sole.
 - `didymos_gmv_270101_330623_v02.bsp`
Orbite di Didymos e di Dimorphos rispetto al baricentro del sistema.
 - `hera_dart_impact_site_v03.bsp`
Posizione relativa del cratere generato dall'impatto di DART su Dimorphos.
 - `hera_struct_v00.bsp`
Versione meno recente.
3. **FK** L'FK di Hera comprende anche i sistemi di riferimento del sistema Didymod-Dimorphos.
- `hera_v06.tf`
Versione meno recente.
4. **IK** Anche in questo scenario saranno valutate solo le ossevizioni della AFC, tralasciando tutti gli altri strumenti.
- `hera_afc_v03.ti`
Versione meno recente.
5. **DSK** Sono necessari per introdurre lo *shape model* dei 2 asteroidi. I modelli sono stati creati basandosi sulle mappature effettuate da DART.
- `g_01165mm_spc_obj_didy_0000n00000_v003.bds`
Modello 3D di Didymos.
 - `g_00243mm_spc_obj_dimo_0000n00000_v004.bds`
Modello 3D di Dimorphos.
6. **SCLK**
- `hera_fict_20181203.tsc`
Al fine di mantenere coerenza con i kernel `predicted` è fondamentale utilizzare SCLK di tipo `fict` (cioè fittizi).
7. **PCK** .Oltre alle costanti planetarie è stato necessario aggiungere le costanti relative al sistema Didymos-Dimorphos
- `hera_didymos_v06.tpc`
Serve a fornire le costanti fisiche e geometriche del sistema necessarie a calcolare orientamento e rotazione degli asteroidi.

4.2.2 Spacecraft Catalog file per Didymos e Dimorphos

Dal punto di vista pratico, Cosmographia permette di gestire i corpi celesti come degli S/C dotati di traiettoria e periodi di rotazione. In Figura A.3 è riportato lo script utilizzato per definire i due asteroidi. Questo file permette di associare i kernel di traiettoria e forma precedentemente caricati al corpo celeste.

Siccome i commenti contenuti negli SPK indicano che la traiettoria di Didymos e Dimorphos è definita rispetto al baricentro del sistema, è necessario definire prima il baricentro come oggetto fisico, vedi Figura 4.9. In particolare è stato rappresentato

Figura 4.9: Estratto script in Figura A.3.

```

6      "class": "spacecraft",
7      "name": "DIDYMOS_BARYCENTER",
8      "startTime": "2022-01-01 01:00:00.000 UTC",
9      "center": "Sun",
10     "trajectory": {
11         "type": "Spice",
12         "target": "DIDYMOS_BARYCENTER",

```

come una sfera di diametro 1 cm (riga 18). Dato il suo posizionamento all'interno del corpo principale Didymos, esso risulta completamente inglobato e quindi non visibile. Al fine di evitare che potesse comunque interferire con le osservazioni, è stato esplicitamente definito come “non visibile”.

Successivamente è stato definito Didymos attribuendogli come centro rispetto alla traiettoria DIDYMOS_BARICENTER e come geometria il rispettivo DSK, come in Figura 4.10. Per Dimorphos si è fatto in maniera del tutto analoga.

Figura 4.10: Estratto script in Figura A.3.

```

37  "geometry": {
38      "type": "DSK",
39      "kernel": "g_01165mm_spc_obj_didy_0000n00000_v003.bds",
40      "color": [ 0.5, 0.5, 0.5 ] },

```

Infine, siccome tra gli obiettivi di Hera c'è l'analisi del cratere generato da DART, si è deciso di inserire il sito di impatto in maniera analoga al baricentro. Infatti come si può vedere in Figura 4.11, il sito di impatto è stato rappresentato con una sfera di diametro 5 m e di colore rosso, al fine di renderlo più distinguibile.

Figura 4.11: Estratto script in Figura A.3.

```

79      "geometry": {
80          "type": "Globe",
81          "radii": [ 0.005, 0.005, 0.005 ],
82          "baseMap" : "red.dds" }

```

Implementando lo script appena esposto il risultato è visualizzabile su cosmographia come in Figura 4.12.

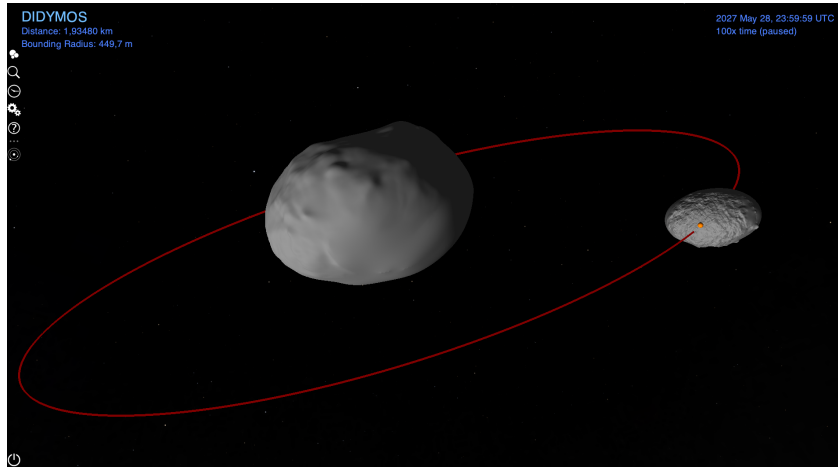


Figura 4.12: Rappresentazione del Sistema Didymos-Dimorphos in Cosmographia, ottenuta dall'implementazione dello script in Figura A.3

4.2.3 Spacecraft e Sensor Catalog file

Lo *Spacecraft* e il *Sensor Catalog file* per la fase asteroidale sono fondamentalmente rimasti invariati rispetto a quelli relativi al flyby di Marte. Per il *Sensor Catalog file* è stato sufficiente cambiare il target del sensore in corrispondenza della riga 17 dello script, come riportato a seguire nella Figura 4.13.

Figura 4.13: Modifica apportata allo script in Figura 4.6.

```

16     "rangeTracking": true,
17     "target": "DIDYMOS",

```

La modifica è stata necessaria per attivare correttamente la funzione "range-Tracking", la quale, se impostata su "true", regola continuamente nell'arco dell'osservazione la dimensione del frustum sulla base della distanza tra Hera e il target.

Lo *Spacecraft Catalog file*, invece ha subito modifiche alle righe 9 e 13 dove viene definito il centro della traiettoria di Hera. Poichè tutti gli SPK di PO (compreso quello utilizzato per questo scenario) non hanno come centro il Sole ma DIDYMOS_BARICENTER, quest'ultimo è stato inserito come centro. Inoltre, come anticipato all'inizio del capitolo, la versione poco recente dei kernel `hera_v06.tf` e `hera_struct_v00.bsp` non ha permesso di implementare la maggiorparte degli elementi che compongono lo S/C. Per questo motivo lo S/C di questo scenario è ridotto a 2 soli elementi: HERA e AFC-1, ovvero le strutture necessarie e sufficienti per conseguire le osservazioni.

Capitolo 5

Risultati

In questo capitolo vengono riportati i risultati delle osservazioni simulate per i due setup descritti nel capitolo 4. Le immagini simulate sono state ottenute sovrapponendo l'osservatore di Cosmographia alla AFC. Per farlo si è fatto ricorso alla funzione di Cosmographia *Jump to a Point of View* impostando i parametri come mostrato in Figura 5.1. Successivamente, grazie alla colorazione verde del frustum, è stato possibile ridurre il campo visivo della camera virtuale di Cosmographia a quello reale della AFC escludendo la regione verde della visuale.

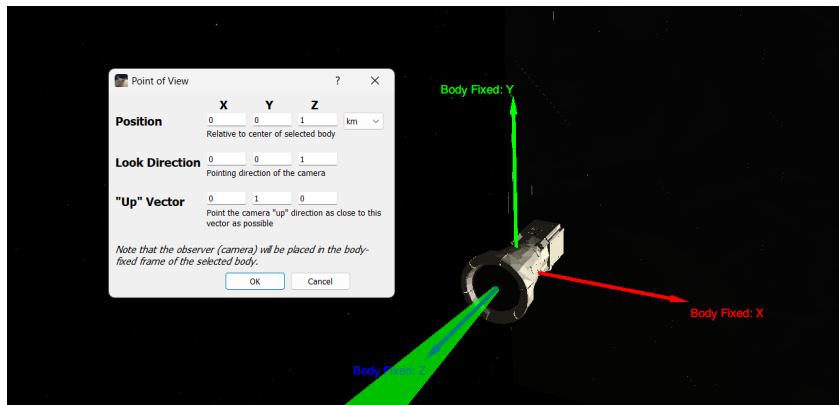


Figura 5.1: L'immagine raffigura i parametri impostati per posizionare l'osservatore nel POV della AFC.

5.1 Flyby di Marte

In questa sezione sono analizzate immagini di Marte e delle sue lune Deimos e Phobos. Nel confronto, le immagini reali sono riportate nel pannello di sinistra, in scala di grigi, mentre quelle simulate e ottenute da Cosmographia sono riportate nel pannello di destra a colori.

La Figura 5.2 mostra la traccia delle quattro immagini scelte per il paragone. Tutte le acquisizioni risalgono al 12 marzo 2025.

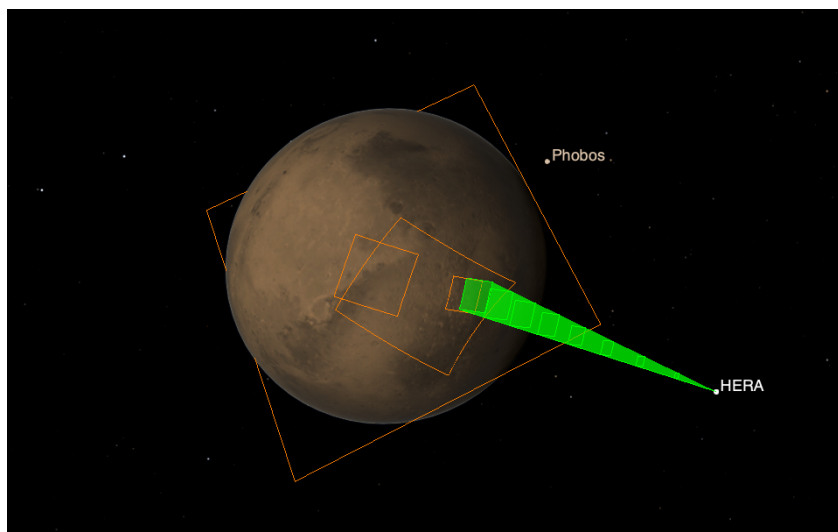


Figura 5.2: Immagine ottenuta con l'*Observation Catalog file* in Figura A.2.

La prima immagine analizzata, riportata in figura 5.3, è stata scattata alle 10:38:29 UTC. In questa fase il campo è interamente occupato da Marte ma è ancora possibile distinguere i contorni.

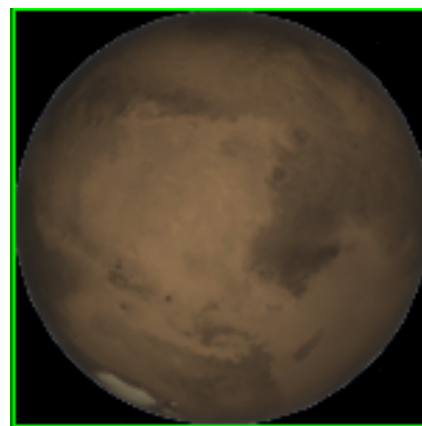
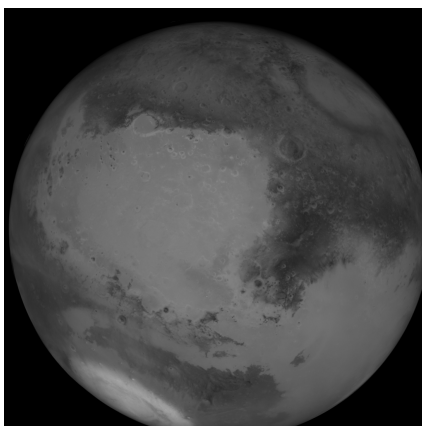


Figura 5.3: Confronto tra immagine reale (sinistra) e simulata (destra) alle 10:38:29 UTC del 12/03/2025.

La seconda immagine, mostrata in Figura 5.4, è stata acquisita alle 12:08:31 UTC e riprende un incontro ravvicinato con la luna Deimos. Questo frame risulta particolarmente utile per verificare l'accuratezza della simulazione nella riproduzione dei corpi minori.

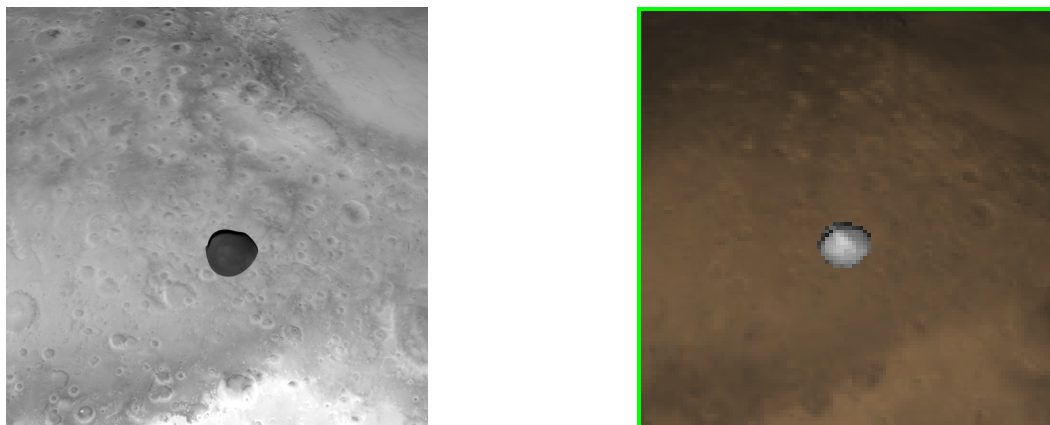


Figura 5.4: Confronto tra immagine reale (sinistra) e simulata (destra) durante l'incontro con Deimos (12:08:31 UTC).

La terza immagine (Figura 5.5) corrisponde alle 12:27:01 UTC e mostra nel dettaglio una regione della superficie di Marte da una distanza di circa 12.000 km.

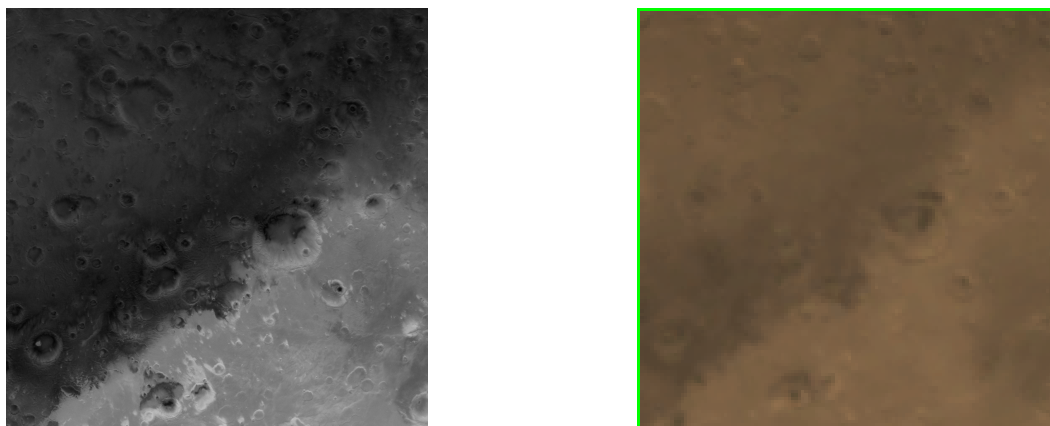


Figura 5.5: Confronto tra immagine reale (sinistra) e simulata (destra) alle 12:27:01 UTC.

Infine, la quarta immagine riportata in Figura 5.6, scattata alle 12:43:01 UTC, mostra la fase prossima al closest approach di Marte.

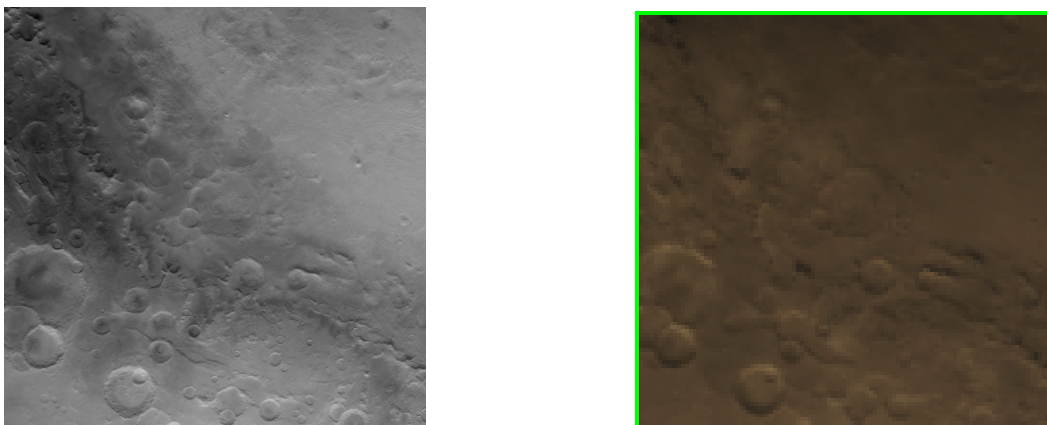


Figura 5.6: Confronto tra immagine reale (sinistra) e simulata (destra) alle 12:43:01 UTC.

Le due versioni, reale e simulata, mostrano un'ottima corrispondenza nella scala e nell'orientamento. La differenza principale si evince se si osserva la risoluzione, soprattutto se il target è particolarmente vicino. Nelle Figure 5.5 e 5.6, infatti, le immagini simulate risentono di una visibilmente scarsa risoluzione rispetto a quelle reali. Nel complesso la corrispondenza tra osservazione e simulazione è soddisfacente. I risultati ottenuti forniscono una buona validazione del setup implementato nel lavoro di tirocinio e sono, quindi, favorevoli all'estensione del lavoro di tesi sulla fase di prossimità asteroidale.

5.2 Fase asteroidale

Per questa fase non è possibile effettuare un confronto con immagini reali, poiché la fase asteroidale deve ancora svolgersi. Vengono quindi presentati soltanto i risultati simulati per fornire un'anteprima delle osservazioni attese e poter pianificare le operazioni del satellite. Come riferimento temporale può risultare utile il grafico in Figura 5.7, che mostra l'andamento della distanza tra Hera e il sistema Didymos–Dimorphos nel corso delle diverse fasi operative. Poiché il campo visivo della AFC è fisso, dalla distanza è possibile ricavare anche la risoluzione della camera, riportata nello stesso grafico.

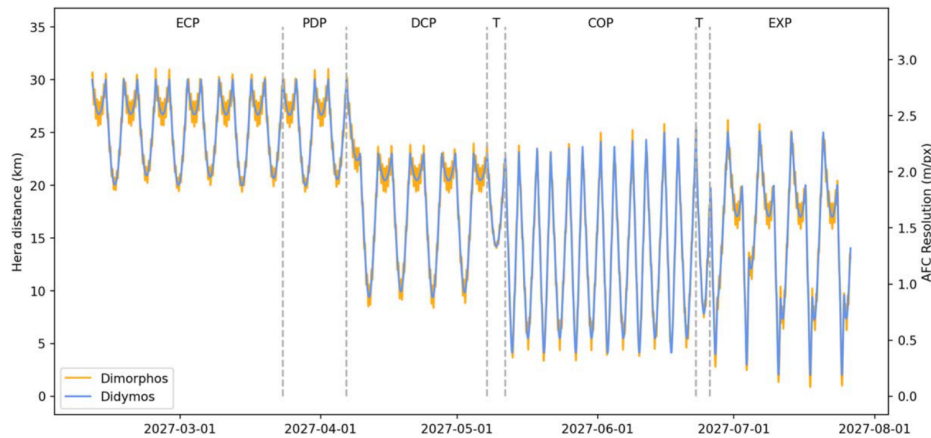


Figura 5.7: Andamento della risoluzione della AFC e della distanza di Didymos (in blu) e Dimorphos (in giallo) da Hera nel corso delle PO. *Credit: Michel et al. (2022).*

Le immagini presentate nelle sezioni a seguire sono relative alle fasi di prossimità previste per il periodo compreso tra il 9 febbraio e il 24 luglio 2027.

5.2.1 Early Characterization Phase (ECP)

Questa fase avrà luogo nelle prime 6 settimane di prossimità e prevede archi iperbolici con distanze comprese tra 20 e 30 km dal sistema. Le traiettorie sono organizzate in un ciclo settimanale, composto da archi brevi di 3 giorni alternati ad archi lunghi di 4 giorni. Le immagini in Figura 5.8, 5.9 e 5.10 sono relative a questa fase, in cui la distanza è tale che il sistema Didymos–Dimorphos occupa soltanto una porzione ridotta del campo visivo. A queste distanze, la risoluzione della AFC è dell'ordine di 2–3 m/px, sufficiente a caratterizzare massa, gravità, forma e proprietà termiche e dinamiche del sistema. L'immagine simulata in Figura 5.9 è stata acquisita da una distanza di ~ 21 km e mostra il sistema binario evidenziando le sue proporzioni: Didymos appare in primo piano (in basso), mentre Dimorphos è visibile sullo sfondo (in alto). La Figura 5.8 presenta una simulazione dell'immagine acquisita a una distanza di ~ 20 km. Osservando Didymos risulta particolarmente evidente il netto confine tra modello dettagliato e modello approssimato. I modelli dei 2 asteroidi, infatti, mostrano metà corpo con dettagli (crateri, increspature) e metà superficiale omogenea e con forma approssimata ad ellissoide. Ciò è dovuto ai limiti della mappatura fornita dalla missione DART, il cui obiettivo primario

non era la caratterizzazione morfologica ma l'impatto ad alta velocità. Questa lacuna verrà colmata dalla AFC che, in questa prima fase, effettuerà una mappatura preliminare e individuerà possibili regioni di interesse (oltre al cratere DART) per le fasi successive.



Figura 5.8: Immagine simulata acquisita il 14/02/27 12:12:00 UTC (fase ECP) da una distanza di ~ 20 km.



Figura 5.9: Immagine simulata acquisita il 21/02/27 09:41:00 UTC (fase ECP) da una distanza di ~ 21 km.



Figura 5.10: Immagine simulata acquisita il 17/03/27 13:42:00 UTC (fase ECP) da una distanza di ~ 28 km.

5.2.2 Payload Deployment Phase (PDP)

La fase di 2 settimane è dedicata al rilascio e alle prime operazioni dei due CubeSat Milani e Juventas. In questa fase l'impiego della AFC è marginale, mentre l'attenzione

è concentrata sul supporto al dispiegamento.

5.2.3 Detailed Characterization Phase (DCP)

In questa fase, della durata di circa 4 settimane, Hera continua a seguire archi iperbolici ma a distanze ridotte, comprese tra 8 e 20 km. Le immagini simulate in questa fase vedi (Figura 5.11, 5.12 e 5.13) mostrano chiaramente un aumento del dettaglio. A tal punto che, come si nota nella Figura 5.11 dove viene ripreso Dimorphos, iniziano ad essere apprezzabili i dettagli del cratere generato da DART (in rosso). La risoluzione della AFC migliora fino a ~ 1 m/px, permettendo una mappatura a scala metrica delle superfici. La riduzione della distanza tra lo S/C e il sistema va a discapito, però, di una minore visione d'insieme del sistema in prossimità del pericentro della traiettoria. Infatti dalla sequenza di immagini in Figura 5.13, scattate da una distanza di ~ 9.4 km, si può notare come l'ingombro di Didymos renda più difficile avere contemporaneamente entrambi gli asteroidi nel campo visivo. La sequenza evidenzia come la mappatura di Didymos sia agevolata dalla rapida velocità di rotazione del corpo stesso, il quale in 2 ore espone alla AFC quasi tutta la sua superficie. A queste quote viene, inoltre, introdotta una prima componente di navigazione autonoma, che utilizza la posizione di Didymos come riferimento per il controllo d'assetto, riducendo la dipendenza dal controllo da terra. L'immagine in Figura 5.12 mostra Didymos da una distanza di ~ 9.3 km, che è abbastanza piccola da richiedere controllo di assetto autonomo ma sufficientemente elevata da permetterlo. Infatti affinché possa essere attuato è necessario che si possano distinguere i contorni di Didymos in modo da individuarne il centroide.

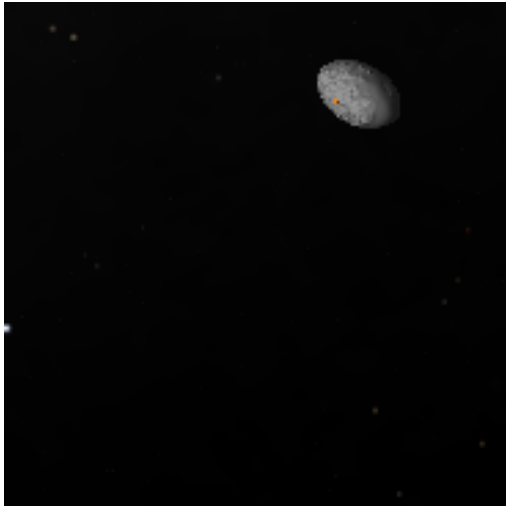


Figura 5.11: Immagine simulata acquisita l'11/04/27 08:20:00 UTC (fase DCP) che mostra Dimorphos da una distanza di ~ 10 km.

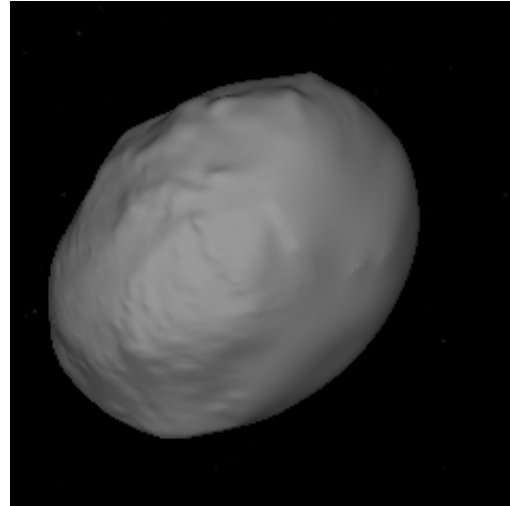


Figura 5.12: Immagine simulata acquisita il 25/04/27 16:07:00 UTC (fase DCP) che mostra Didymos da una distanza di ~ 9.3 km.

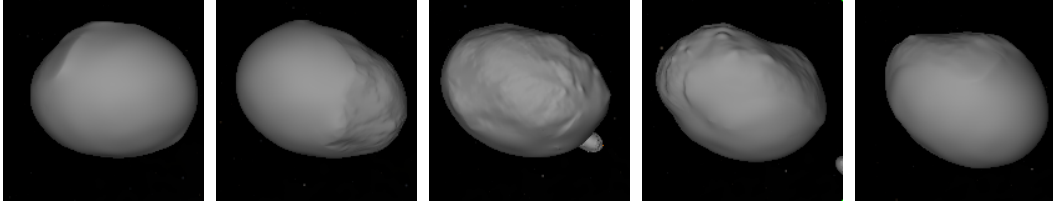


Figura 5.13: Sequenza di immagini simulate acquisite l'11/04/27 dalle 16:30:00 alle 18:30:00 UTC (fase DCP) a intervalli regolari. Mostra Didymos da una distanza di ~ 9.4 km.

5.2.4 Close Observation Phase (COP)

La durata prevista è di 6 settimane, con un totale di dodici flyby ravvicinati. Hera raggiunge distanze fino a 4 km dal sistema, ottenendo immagini con risoluzione fino a $\sim 0,5$ m/px. La sequenza in Figura 5.16 rappresenta il secondo dei dodici cicli che compongono la COP e illustra l'evoluzione del puntamento della AFC: a distanze sufficientemente elevate entrambi i corpi rientrano nel campo visivo; successivamente, in base alle esigenze di navigazione e ai requisiti di rilevamento ottico, il puntamento si sposta prima su Didymos, poi su Dimorphos, per ritornare infine alla configurazione iniziale. A queste distanze è necessario un sistema di navigazione completamente autonomo: Didymos, nell'intorno del pericentro riempie completamente il campo visivo della camera (come mostrato nell'immagine simulata in Figura 5.15) e diventa indispensabile il *feature tracking*, ossia il riconoscimento di morfologie superficiali (*landmarks*) per stimare posizione e velocità della sonda. Durante questa fase entra in gioco anche PALT, impiegato sia per la navigazione sia per la topografia di precisione. La Figura 5.14 presenta l'immagine simulata in cui compare Dimorphos da una distanza di ~ 5.8 km. Per la maggior parte della COP le osservazioni saranno, infatti, focalizzate su Dimorphos e sul cratere di DART.



Figura 5.14: Immagine simulata acquisita il 27/05/27 09:30:00 UTC (fase COP) che mostra Dimorphos da una distanza di ~ 5.8 km.

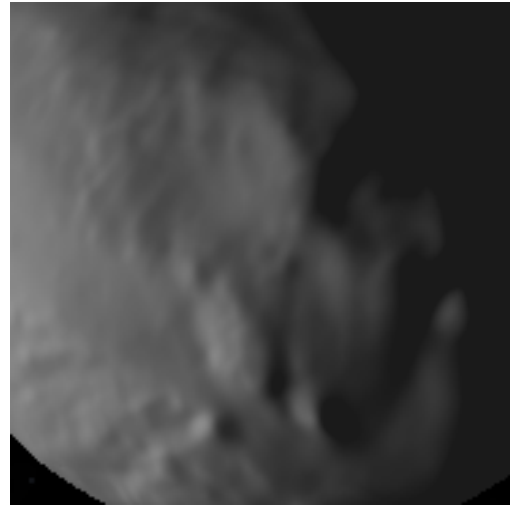
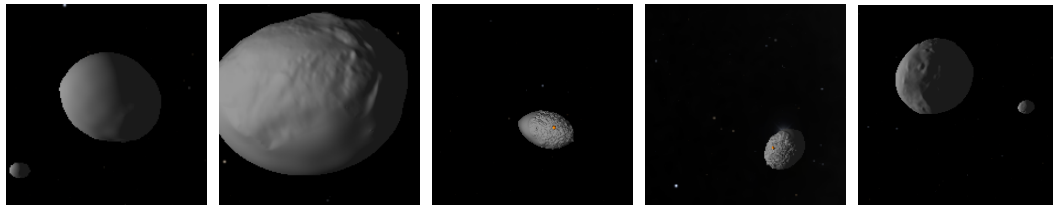


Figura 5.15: Immagine simulata acquisita il 27/05/27 04:43:00 UTC (fase COP) che mostra la superficie di Didymos da una distanza di ~ 4.6 km.



15/05/27 07:00:00 UTC Dist. ~ 16.5 km 16/05/27 06:30:00 UTC Dist. ~ 7.9 km 16/05/27 13:00:00 UTC Dist. ~ 6.5 km 17/05/27 02:30:00 UTC Dist. ~ 7.9 km 18/05/27 11:00:00 UTC Dist. ~ 21 km

Figura 5.16: Sequenza di immagini simulate acquisite nell'arco del secondo flyby della fase COP che mette in risalto l'evoluzione del puntamento della AFC.

5.2.5 Experimental Phase (EXP)

Ultima fase operativa, della durata di 6 settimane, con l'obiettivo di spingersi fino a distanze inferiori al chilometro. La Figura 5.17 mostra la superficie di Didymos da una distanza di ~ 2.5 km. Il campo visivo è interamente occupato dal corpo primario, perciò è indispensabile attuare la navigazione autonoma. La regione nella simulazione è quasi del tutto priva di *landmarks* perchè appartiene alla metà dello *shape model* di Didymos approssimato, ma durante questa fase la mappatura sarà già ultimata. Saranno testate tecniche di navigazione autonoma più avanzate, combinando *feature tracking* e misure altimetriche di PALT. Le immagini simulate, come quella in Figura 5.18, prevedono una risoluzione al decimetro per aree selezionate di Dimorphos, inclusa la regione dell'impatto di DART. Questa fase consentirà di ottenere la caratterizzazione morfologica più dettagliata dell'intera missione e si concluderà

con la discesa e l'atterraggio controllato di Hera su Didymos, fornendo dati ad alta risoluzione anche sul corpo primario.

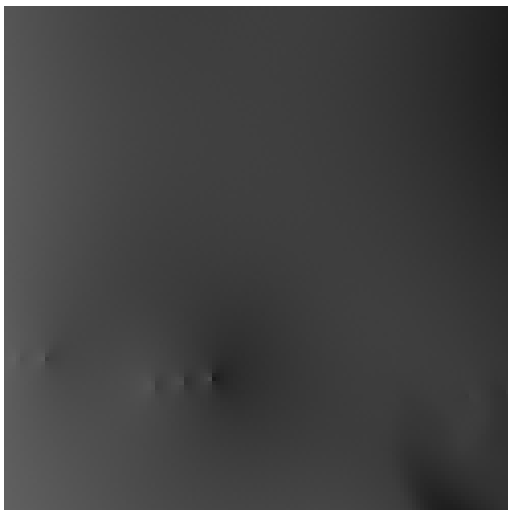


Figura 5.17: Immagine simulata acquisita il 17/07/27 17:42:00 UTC (fase EXP) che mostra la superficie di Didymos da distanza ~ 2.5 km.

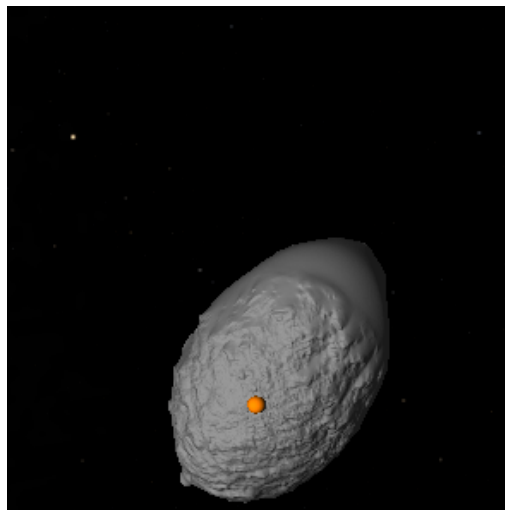


Figura 5.18: Immagine simulata acquisita il 03/07/27 17:42:00 UTC (fase EXP) che mostra Dimorphos da distanza ~ 1 km.

Capitolo 6

Conclusioni

In questo lavoro di tesi è stato sviluppato un setup dedicato in Cosmographia della missione Hera volto a simulare e analizzare le osservazioni della AFC. I risultati ottenuti contribuiranno a supportare la pianificazione e l'attuazione del RSE, fornendo la geometria di osservazione attesa durante le PO e permettendo anche di visualizzare i risultati attesi in seguito a eventuali operazioni satellitari non nominali.

L'attività ha previsto la selezione e l'organizzazione dei kernel SPICE, la creazione dei *Catalog file* in formato JSON e la configurazione di scenari di osservazione coerenti con i dati disponibili della missione. Come primo passo, il setup è stato applicato al flyby di Marte del 12 marzo 2025. Questa fase ha rappresentato un banco di prova fondamentale per validare il metodo: il confronto fra le immagini simulate e quelle reali ha mostrato una buona corrispondenza, confermando l'affidabilità dell'approccio adottato e la capacità del software di supportare l'analisi geometrica delle osservazioni.

L'attività è stata poi estesa alla fase asteroidale della missione. In questo scenario, le immagini simulate ottenute nelle diverse fasi operative (ECP, DCP, COP, EXP) hanno permesso di ricostruire l'evoluzione della risoluzione e delle condizioni di osservazione man mano che Hera si avvicina al sistema Didymos–Dimorphos. I risultati hanno evidenziato il ruolo dell'AFC nella caratterizzazione dei due corpi e la possibilità di ottenere anteprime attendibili delle immagini che la sonda acquisirà, essenziali per il RSE e la pianificazione delle osservazioni dello spacecraft.

Per lavori futuri sarà essenziale sostituire i kernel utilizzati in questa tesi con versioni più recenti e specifiche della fase di prossimità, non appena saranno resi disponibili dall'ESA. Questo, con minime modifiche al setup, permetterà di ottenere simulazioni più fedeli e utili per avere una visualizzazione 3D del sistema durante la missione e per pianificare le acquisizioni delle successive fasi. Inoltre, analogamente a quanto fatto per la AFC, l'implementazione potrà essere estesa alle camere dei CubeSats Juventas e Milani permettendo di affinare ulteriormente la capacità predittiva del setup, fornendo uno strumento completo per anticipare e supportare le osservazioni reali della missione Hera.

Appendice A

Codice JSON

Figura A.1: Spacecraft Catalog file di Hera.

```
1 {
2   "version": "1.0",
3   "name": "Mars flyby",
4   "items": [
5     {
6       "class": "spacecraft",
7       "name": "HERA",
8       "startTime": "2025-03-02 01:00:00.000 UTC",
9       "center": "Sun",
10      "trajectory": {
11        "type": "Spice",
12        "target": "HERA_SPACECRAFT",
13        "center": "Sun" },
14      "bodyFrame": {
15        "type": "Spice",
16        "name": "HERA_SPACECRAFT" },
17      "geometry": {
18        "type": "Mesh",
19        "source": "../3ds/hera_sc_mli_v01.3ds" },
20      "label": {
21        "color": [1, 1, 1] },
22      "trajectoryPlot": {
23        "color": [1, 0, 0],
24        "lineWidth": 1,
25        "duration": "7 d",
26        "lead": 0.0,
27        "fade": 0.25,
28        "sampleCount": 1000 }
29    },
30
31    {
32      "class": "spacecraft",
33      "name": "HERA_AFC-1",
34      "startTime": "2025-03-02 01:00:00.000 UTC",
```

```

35     "center": "HERA",
36     "trajectory": {
37         "type": "Spice",
38         "target": "HERA_AFC-1",
39         "center": "HERA_SPACECRAFT" },
40     "bodyFrame": {
41         "type": "Spice",
42         "name": "HERA_AFC-1" },
43     "geometry": {
44         "type": "Mesh",
45         "source": "../3ds/hera_sc_afc_v01.3ds" },
46     "label": {
47         "showText": false }
48 },
49
50 {
51     "class": "spacecraft",
52     "name": "HERA_TIRI",
53     "startTime": "2025-03-02 01:00:00.000 UTC",
54     "center": "HERA",
55     "trajectory": {
56         "type": "Spice",
57         "target": "HERA_TIRI",
58         "center": "HERA_SPACECRAFT" },
59     "bodyFrame": {
60         "type": "Spice",
61         "name": "HERA_TIRI" },
62     "geometry": {
63         "type": "Mesh",
64         "source": "../3ds/hera_sc_tiri_v01.3ds" },
65     "label": {
66         "showText": false }
67 },
68 .
69 .
70 .
71 .

```

*il codice non è completo perchè molto lungo (400 righe) e ripetitivo: vengono infatti definiti tutti gli strumenti a bordo analogamente a HERA_AFC_1 e HERA_TIRI.

Figura A.2: Observation Catalog file del flyby.

Questo script è stato utilizzato per generare l'immagine in Figura 5.2.

```

1 {
2   "version": "1.0",
3   "name": "Mars Flyby",
4   "items": [
5     {
6       "class": "observation",
7       "name": "AFC_Flyby_Mars",
8       "startTime": "2025-03-11 22:00:00.000 UTC",
9       "endTime": "2025-03-13 15:00:00.000 UTC",
10      "center": "Mars",
11      "trajectoryFrame": {
12        "type": "BodyFixed",
13        "body": "Mars"},
14      "bodyFrame": {
15        "type": "BodyFixed",
16        "body": "Mars"},
17      "geometry": {
18        "type": "Observations",
19        "sensor": "HERA_AFC-1-SENSOR",
20        "groups": [
21          { "startTime": "2025-03-12 10:38:29.000 UTC",
22            "endTime": "2025-03-12 10:38:29.500 UTC",
23            "obsRate": 1 },
24          { "startTime": "2025-03-12 12:08:31.000 UTC",
25            "endTime": "2025-03-12 12:08:31.500 UTC",
26            "obsRate": 1 },
27          { "startTime": "2025-03-12 12:27:01.000 UTC",
28            "endTime": "2025-03-12 12:27:01.500 UTC",
29            "obsRate": 1 },
30          { "startTime": "2025-03-12 12:43:01.000 UTC",
31            "endTime": "2025-03-12 12:43:01.500 UTC",
32            "obsRate": 1 } ],
33        "footprintColor": [1, 0.5, 0],
34        "footprintOpacity": 0.8,
35        "showResWithColor": false,
36        "sideDivisions": 125,
37        "alongTrackDivisions": 500,
38        "shadowVolumeScaleFactor": 1.75,
39        "fillInObservations": false }
40      }
41    ]
42  }

```

Figura A.3: Spacecraft Catalog file di Didymos e Dimorphos.

```

1 {
2   "version": "1.0",
3   "name": "Asteroid Phase",
4   "items": [
5     {
6       "class": "spacecraft",
7       "name": "DIDYMOS_BARYCENTER",
8       "startTime": "2022-01-01 01:00:00.000 UTC",
9       "center": "Sun",
10      "trajectory": {
11        "type": "Spice",
12        "target": "DIDYMOS_BARYCENTER",
13        "center": "Sun" },
14      "bodyFrame": {
15        "type": "Spice",
16        "name": "DIDYMOS_FIXED" },
17      "geometry": {
18        "type": "Globe",
19        "radii": [ 0.00001, 0.00001, 0.00001 ] },
20      "label": {
21        "showText": false,
22        "color": [ 1, 1, 1 ] }
23    },
24
25    {
26      "class": "spacecraft",
27      "name": "DIDYMOS",
28      "startTime": "2022-01-01 01:00:00.000 UTC",
29      "center": "DIDYMOS_BARYCENTER",
30      "trajectory": {
31        "type": "Spice",
32        "target": "DIDYMOS",
33        "center": "DIDYMOS_BARYCENTER" },
34      "bodyFrame": {
35        "type": "Spice",
36        "name": "DIDYMOS_FIXED" },
37      "geometry": {
38        "type": "DSK",
39        "kernel": "g_01165mm_spc_obj_didy..._v003.bds",
40        "color": [ 0.5, 0.5, 0.5 ] },
41      "label": {
42        "showText": false,
43        "color": [ 1, 1, 1 ] }
44    },

```

```
45 {
46   "class": "spacecraft",
47   "name": "DIMORPHOS",
48   "startTime": "2022-01-01 01:00:00.000 UTC",
49   "center": "DIDYMOS_BARYCENTER",
50   "trajectory": {
51     "type": "Spice",
52     "target": "DIMORPHOS",
53     "center": "DIDYMOS_BARYCENTER" },
54   "bodyFrame": {
55     "type": "Spice",
56     "name": "DIMORPHOS_FIXED" },
57   "geometry": {
58     "type": "DSK",
59     "kernel": "g_00243mm_spc_obj_dimo_..._v004.bds",
60     "color": [ 0.4, 0.4, 0.4 ],
61     "opacity": 1.0 },
62   "label": {
63     "showText": false,
64     "color": [ 1, 1, 1 ] }
65 },
66
67 {
68   "class": "spacecraft",
69   "name": "DART_IMPACT_SITE",
70   "startTime": "2022-01-01 01:00:00.000 UTC",
71   "center": "DIMORPHOS",
72   "trajectory": {
73     "type": "Spice",
74     "target": "DART_IMPACT_SITE",
75     "center": "DIMORPHOS" },
76   "bodyFrame": {
77     "type": "Spice",
78     "name": "DIMORPHOS_FIXED" },
79   "geometry": {
80     "type": "Globe",
81     "radii": [ 0.01, 0.01, 0.01 ],
82     "baseMap" : "red.dds" }
83 }
84 ]
85 }
```

Bibliografia

- Cheng, A. F., Agrusa, H. F., Barbee, B. W., Meyer, A. J., Farnham, T. L., Raducan, S. D., Richardson, D. C., Dotto, E., Zinzi, A., Della Corte, V., et al. (2023). Momentum transfer from the dart mission kinetic impact on asteroid dimorphos. *Nature*, 616(7957):457–460.
- Cheng, A. F., Rivkin, A. S., Michel, P., Atchison, J., Barnouin, O., Benner, L., Chabot, N. L., Ernst, C., Fahnestock, E. G., Kueppers, M., et al. (2018). Aida dart asteroid deflection test: Planetary defense and science objectives. *Planetary and Space Science*, 157:104–115.
- Gramigna, E., Manghi, R. L., Zannoni, M., Tortora, P., Park, R. S., Tommei, G., Maistre, S. L., Michel, P., Castellini, F., and Küppers, M. (2024). The hera radio science experiment at didymos. *Planetary and Space Science*, 215:1–17.
- Michel, P., Küppers, M., Bagatin, A. C., Carry, B., Charnoz, S., de Leon, J., Fitzsimmons, A., Gordo, P., Green, S. F., Hérique, A., Juzi, M., Özgür Karatekin, Kohout, T., Lazzarin, M., Murdoch, N., Okada, T., Palomba, E., Pravec, P., Snodgrass, C., Tortora, P., Tsiganis, K., Ulamec, S., Vincent, J.-B., Wünnemann, K., Zhang, Y., Raducan, S. D., Dotto, E., Chabot, N., Cheng, A. F., Rivkin, A., Barnouin, O., Ernst, C., Stickle, A., Richardson, D. C., Thomas, C., Arakawa, M., Miyamoto, H., Nakamura, A., Sugita, S., Yoshikawa, M., Abell, P., Asphaug, E., Ballouz, R.-L., Jr., W. F. B., Lauretta, D. S., Walsh, K. J., Martino, P., and Carnelli, I. (2022). The esa hera mission: Detailed characterization of the dart impact outcome and of the binary asteroid (65803) didymos. *The Planetary Science Journal*, 207:2–19.
- Michelle Park, Farhan Alam, C. A. B. S. (2015). *COSMOGRAPHIA-SPICE USER’S GUIDE*.
- NAIF, N. (2025). Spice. <https://naif.jpl.nasa.gov/naif/>.