



# UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Fisica e Astronomia “Galileo Galilei”

Corso di Laurea in Astronomia

Tesi di Laurea

## La Missione Hera: Studio del Sistema Binario Didymos–Dimorphos

**Relatrice**

Prof.ssa Monica Lazzarin

**Laureando**

Marco Caprara

**Correlatore**

Dr. Andrea Farina

Matricola: 2045341

Anno Accademico 2025–2026



# Abstract

La missione Hera dell'ESA raggiungerà il sistema binario (65803) Didymos, dove la sonda DART della NASA ha già impattato il satellite Dimorphos riducendone il periodo orbitale di 33 minuti. L'arrivo è previsto per novembre 2026 ed Hera condurrà la prima indagine post-impatto ad alta risoluzione su un asteroide binario, con l'obiettivo di completare la validazione della tecnica del *kinetic impactor* per la difesa planetaria. La missione misurerà direttamente la massa di Dimorphos, determinerà con precisione il fattore di amplificazione della quantità di moto  $\beta$  e verificherà se l'urto ha prodotto un cratere localizzato o una deformazione globale del satellite. Per raggiungere questi scopi, la sonda madre integra le camere ottiche AFCs, lo spettrometro iperspettrale HS-H, la termocamera TIRI, l'altimetro PALT e l'esperimento RSE, mentre i due CubeSat Juventas (radar JuRa e gravimetro GRASS) e Milani (spettrometro ASPECT e analizzatore di polveri VISTA) estenderanno le indagini alla tomografia interna e alla composizione superficiale. In questa tesi, i dati acquisiti da HS-H durante il *flyby* di Marte del 12 marzo 2025 sono stati analizzati estraendo spettri di riflettanza da regioni selezionate e confrontati, tramite un test del chi-quadro, con le classi spettrali della tassonomia di Mahlke, opportunamente convolute con la risposta strumentale dello strumento. I risultati attesi della missione includono la prima tomografia radar di un *rubble-pile*, la mappatura della macroporosità e immagini a scala metrica del sito d'impatto, che permetteranno di risolvere le attuali incertezze sui modelli di impatto in microgravità. L'analisi, invece, ha permesso di identificare correttamente le principali province geologiche marziane, quali Syrtis Major e Arabia Terra, con una distribuzione delle classi tassonomiche coerente con i modelli litologici consolidati in letteratura. Le misure di Hera elimineranno le approssimazioni residue dell'esperimento DART, fornendo condizioni iniziali e finali completamente documentate per un impatto iperveloce. La validazione dei modelli numerici di deflessione consentirà di estrapolare leggi di scala affidabili per future minacce asteroidali reali. Il test condotto su Marte, inoltre, conferma l'idoneità della procedura di classificazione in vista delle future osservazioni di Hera su Didymos e Dimorphos.



# Indice

|                                                                       |           |
|-----------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Abstract</b>                                                       | <b>3</b>  |
| <b>Indice</b>                                                         | <b>5</b>  |
| <b>Elenco delle figure</b>                                            | <b>9</b>  |
| <b>Elenco delle tabelle</b>                                           | <b>11</b> |
| <b>Glossario degli Acronimi</b>                                       | <b>13</b> |
| <b>Introduzione</b>                                                   | <b>15</b> |
| <b>1 Gli Asteroidi</b>                                                | <b>19</b> |
| 1.1 Classificazione . . . . .                                         | 19        |
| 1.1.1 Tassonomia Spettrale . . . . .                                  | 20        |
| 1.1.1.1 Il Complesso S . . . . .                                      | 20        |
| 1.1.1.2 Il Complesso C . . . . .                                      | 21        |
| 1.1.1.3 Il Complesso X . . . . .                                      | 21        |
| 1.1.1.4 Gli <i>end-members</i> . . . . .                              | 21        |
| 1.1.2 Distribuzione Spaziale ed Orbitale nel Sistema Solare . . . . . | 22        |
| 1.2 Struttura Interna e Morfologia . . . . .                          | 24        |
| 1.2.1 Dai Monoliti ai <i>Rubble-Pile</i> . . . . .                    | 24        |
| 1.2.2 Densità e Porosità Macroscopica . . . . .                       | 24        |
| 1.2.3 Coesione Interna e Meccanica dei Materiali . . . . .            | 25        |
| 1.2.4 Forma <i>Top-Shape</i> e Rigonfiamento Equatoriale . . . . .    | 26        |
| 1.2.5 Strutture Superficiali e Processi Sismici . . . . .             | 28        |
| 1.3 Evoluzione Dinamica e Rotazionale . . . . .                       | 29        |
| 1.3.1 L'Effetto Yarkovsky e la Deriva Orbitale . . . . .              | 29        |
| 1.3.2 L'Effetto YORP e l'Evoluzione dello Spin . . . . .              | 30        |
| 1.3.3 Limiti Coesivi e Fissione Rotazionale . . . . .                 | 31        |
| <b>2 I Sistemi Binari di Asteroidi</b>                                | <b>33</b> |
| 2.1 Classificazione e Terminologia . . . . .                          | 33        |
| 2.1.1 Sincronicità del Sistema . . . . .                              | 34        |
| 2.1.2 Sottogruppi Morfologici e Dinamici . . . . .                    | 34        |
| 2.1.3 Statistiche Osservative . . . . .                               | 36        |

|          |                                                                                        |           |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.2      | Meccanismi di Formazione . . . . .                                                     | 37        |
| 2.2.1    | Dinamica della Fissione e Accrescimento del Satellite . . . . .                        | 38        |
| 2.2.2    | Dinamica del Processo e Condizioni Energetiche . . . . .                               | 38        |
| 2.2.3    | Biforcazione Evolutiva: Rapporto di Massa Critico . . . . .                            | 39        |
| 2.3      | Evoluzione Dinamica del Sistema . . . . .                                              | 40        |
| 2.3.1    | L'Effetto Radiativo BYORP . . . . .                                                    | 40        |
| 2.3.2    | Interazioni di Marea ed Equilibrio Dinamico . . . . .                                  | 41        |
| 2.3.3    | Equilibrio Termo-Gravitazionale a Lungo Termine . . . . .                              | 42        |
| 2.3.4    | Perturbazioni Esterne . . . . .                                                        | 43        |
| <b>3</b> | <b>La Missione DART</b>                                                                | <b>45</b> |
| 3.1      | Il Sistema Didymos-Dimorphos (Pre-Impatto) . . . . .                                   | 45        |
| 3.1.1    | Proprietà fisiche di (65803) Didymos (Primario) . . . . .                              | 46        |
| 3.1.2    | Proprietà stimate di Dimorphos (Secondario) . . . . .                                  | 47        |
| 3.1.3    | Parametri orbitali del sistema binario . . . . .                                       | 48        |
| 3.2      | Il Concetto di Difesa Planetaria e gli Obiettivi di DART . . . . .                     | 49        |
| 3.2.1    | Analisi Comparativa delle Tecniche di Deflessione . . . . .                            | 49        |
| 3.2.2    | Obiettivi Scientifici e Requisiti di Successo . . . . .                                | 50        |
| 3.3      | Strumentazione . . . . .                                                               | 50        |
| 3.3.1    | Payload principale: DRACO . . . . .                                                    | 51        |
| 3.3.2    | Il contributo italiano: LICIACube . . . . .                                            | 52        |
| 3.4      | Dinamica dell'Impatto . . . . .                                                        | 52        |
| 3.4.1    | Cinematica e geometria della collisione . . . . .                                      | 52        |
| 3.4.2    | Dinamica del contatto superficiale . . . . .                                           | 53        |
| 3.5      | Analisi dei Risultati . . . . .                                                        | 54        |
| 3.5.1    | Quantificazione della variazione del periodo orbitale . . . . .                        | 54        |
| 3.5.2    | Dati fotometrici e spettroscopici post-impatto . . . . .                               | 55        |
| 3.5.3    | Analisi morfologica dei plume di ejecta . . . . .                                      | 55        |
| 3.5.4    | Stima del fattore di trasferimento della quantità di moto ( $\beta$ ) . . . . .        | 57        |
| 3.6      | Limiti di DART: Incertezze e Questioni Aperte . . . . .                                | 57        |
| 3.6.1    | L'incognita della massa di Dimorphos e l'imprecisione nel calcolo di $\beta$ . . . . . | 57        |
| 3.6.2    | Assenza di dati diretti sulla struttura interna . . . . .                              | 58        |
| 3.6.3    | Mancata osservazione del cratere residuo . . . . .                                     | 58        |
| <b>4</b> | <b>La Missione Hera</b>                                                                | <b>59</b> |
| 4.1      | Obiettivi Scientifici . . . . .                                                        | 59        |
| 4.2      | Payload e Strumentazione dell'Orbiter . . . . .                                        | 61        |
| 4.2.1    | Asteroid Framing Cameras (AFCs) . . . . .                                              | 61        |
| 4.2.2    | HyperScout-H (HS-H) . . . . .                                                          | 62        |
| 4.2.3    | Thermal Infrared Imager (TIRI) . . . . .                                               | 63        |
| 4.2.4    | Planetary Altimeter (PALT) . . . . .                                                   | 63        |
| 4.3      | Radio Science Experiment (RSE) . . . . .                                               | 63        |
| 4.4      | I CubeSat di Hera: Juventas e Milani . . . . .                                         | 64        |
| 4.5      | Stato Attuale della Missione e Timeline . . . . .                                      | 65        |
| 4.5.1    | Lancio e Deep Space Cruise . . . . .                                                   | 65        |
| 4.5.2    | Mars Flyby e calibrazione degli strumenti . . . . .                                    | 66        |

---

|                     |                                                                           |           |
|---------------------|---------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.5.2.1             | Dataset HyperScout-H per il flyby marziano . . . . .                      | 66        |
| 4.5.2.2             | Estrazione degli spettri e mappe di riflettanza . . . . .                 | 68        |
| 4.5.2.3             | Mappe tassonomiche e interpretazione geologica . . . . .                  | 71        |
| 4.5.3               | Arrivo al sistema binario . . . . .                                       | 76        |
| 4.6                 | Strategia Operativa e Fasi di Prossimità . . . . .                        | 76        |
| 4.6.1               | Dalle prime acquisizioni alle indagini di dettaglio . . . . .             | 77        |
| 4.6.2               | Close Observation ed Experimental Phase . . . . .                         | 77        |
| 4.7                 | Risultati Attesi e Validazione dei Modelli di Difesa Planetaria . . . . . | 78        |
| <b>Conclusioni</b>  |                                                                           | <b>79</b> |
| <b>Bibliografia</b> |                                                                           | <b>81</b> |



# Elenco delle figure

|      |                                                                                                                                 |    |
|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.1  | Profili spettrali della tassonomia di Bus-DeMeo . . . . .                                                                       | 20 |
| 1.2  | Relazione tra diametro e periodo di rotazione degli asteroidi . . . . .                                                         | 26 |
| 1.3  | Distribuzione delle pendenze gravitazionali e morfologia equatoriale<br>dell'asteroide 1999 KW4 . . . . .                       | 27 |
| 2.1  | Periodo di rotazione del corpo primario in funzione del suo diametro<br>per la classificazione morfologica . . . . .            | 35 |
| 2.2  | Osservazione radar Delay-Doppler per la risoluzione delle componenti<br>del NEA binario (285263) 1998 QE <sub>2</sub> . . . . . | 37 |
| 3.1  | Ultime 10 immagini acquisite da DRACO prima dell'impatto . . . . .                                                              | 51 |
| 3.2  | Morfologia del sito d'impatto e interazione con i massi superficiali . . .                                                      | 53 |
| 3.3  | Curve di luce e rilevamento degli eventi mutui post-impatto . . . . .                                                           | 54 |
| 3.4  | Evoluzione morfologica del cono di detriti acquisita da LICIACube . . .                                                         | 56 |
| 4.1  | Architettura della sonda madre Hera . . . . .                                                                                   | 61 |
| 4.2  | Panoramica cronologica delle fasi principali della missione Hera . . . .                                                        | 65 |
| 4.3  | Immagine dell'intero disco marziano acquisita da HS-H . . . . .                                                                 | 67 |
| 4.4  | Porzione zoomata degli altopiani meridionali di Marte acquisita da<br>HS-H . . . . .                                            | 67 |
| 4.5  | Mappa di riflettanza dell'intero disco marziano con le regioni selezionate                                                      | 69 |
| 4.6  | Mappa di riflettanza della porzione dettagliata con le regioni selezionate                                                      | 69 |
| 4.7  | Spettri normalizzati delle regioni selezionate per l'immagine dell'intero<br>disco marziano . . . . .                           | 70 |
| 4.8  | Spettri normalizzati delle regioni selezionate per la porzione più<br>dettagliata della superficie marziana . . . . .           | 71 |
| 4.9  | Mappa tassonomica delle regioni selezionate . . . . .                                                                           | 73 |
| 4.10 | Mappa tassonomica continua dell'intero disco marziano (025C) a 7<br>macropixel . . . . .                                        | 74 |
| 4.11 | Mappa tassonomica continua della porzione dettagliata (025D) a 25<br>macropixel . . . . .                                       | 75 |
| 4.12 | Evoluzione delle fasi di prossimità e risoluzione spaziale . . . . .                                                            | 77 |



# Elenco delle tabelle

|     |                                                                               |    |
|-----|-------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.1 | Confronto tra le tassonomie spettrali degli asteroidi . . . . .               | 22 |
| 3.1 | Proprietà dell'impatto DART e del sistema Didymos . . . . .                   | 46 |
| 3.2 | Parametri orbitali di <i>best-fit</i> del sistema Didymos-Dimorphos . . . . . | 48 |
| 4.1 | Matrice di tracciabilità scientifica per la missione Hera . . . . .           | 60 |
| 4.2 | Risultati della classificazione tassonomica per le regioni selezionate . .    | 72 |



# Glossario degli Acronimi

|                  |                                                                          |
|------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| <b>AFC</b>       | <i>Asteroid Framing Camera</i>                                           |
| <b>AIDA</b>      | <i>Asteroid Impact and Deflection Assessment</i>                         |
| <b>ASPECT</b>    | <i>Asteroid Spectral Imager</i>                                          |
| <b>BYORP</b>     | <i>Binary YORP</i>                                                       |
| <b>COP</b>       | <i>Close Observation Phase</i>                                           |
| <b>DART</b>      | <i>Double Asteroid Redirection Test</i>                                  |
| <b>DCP</b>       | <i>Detailed Characterization Phase</i>                                   |
| <b>DRACO</b>     | <i>Didymos Reconnaissance and Asteroid Camera for Optical navigation</i> |
| <b>ECP</b>       | <i>Early Characterization Phase</i>                                      |
| <b>ESA</b>       | <i>European Space Agency</i>                                             |
| <b>EXP</b>       | <i>Experimental Phase</i>                                                |
| <b>FWHM</b>      | <i>Full Width at Half Maximum</i>                                        |
| <b>GRASS</b>     | <i>Gravimeter for Small Solar System Objects</i>                         |
| <b>GT</b>        | <i>Gravity Tractor</i>                                                   |
| <b>HED</b>       | <i>Howardite-Eucrite-Diogenite</i>                                       |
| <b>HS-H</b>      | <i>HyperScout-H</i>                                                      |
| <b>IBS</b>       | <i>Ion Beam Shepherd</i>                                                 |
| <b>JAXA</b>      | <i>Japan Aerospace eXploration Agency</i>                                |
| <b>JuRa</b>      | <i>Juventus Radar</i>                                                    |
| <b>KI</b>        | <i>Kinetic Impactor</i>                                                  |
| <b>LICIACube</b> | <i>Light Italian CubeSat for Imaging of Asteroids</i>                    |
| <b>LIDAR</b>     | <i>Light Detection and Ranging</i>                                       |
| <b>LUKE</b>      | <i>LICIACube Unit Key Explorer</i>                                       |
| <b>MAB</b>       | <i>Main Asteroid Belt</i>                                                |
| <b>NASA</b>      | <i>National Aeronautics and Space Administration</i>                     |
| <b>NEA</b>       | <i>Near-Earth Asteroid</i>                                               |
| <b>NED</b>       | <i>Nuclear Explosive Device</i>                                          |
| <b>NEO</b>       | <i>Near-Earth Object</i>                                                 |
| <b>NIR</b>       | <i>near infrared</i>                                                     |
| <b>PALT</b>      | <i>Planetary Altimeter</i>                                               |
| <b>PDP</b>       | <i>Payload Deployment Phase</i>                                          |
| <b>RAMSES</b>    | <i>Rapid Apophis Mission for Space Safety</i>                            |
| <b>RSE</b>       | <i>Radio Science Experiment</i>                                          |
| <b>SMART Nav</b> | <i>Small-body Maneuvering Autonomous Real-Time Navigation</i>            |
| <b>SS</b>        | <i>Sistema Solare</i>                                                    |
| <b>TIRI</b>      | <i>Thermal Infra Red Imager</i>                                          |
| <b>VISTA</b>     | <i>Volatile In Situ Thermogravimeter Analyser</i>                        |
| <b>YORP</b>      | <i>Yarkovsky–O’Keefe–Radzievskii–Paddack</i>                             |



# Introduzione

Lo studio dei piccoli corpi rappresenta uno dei pilastri fondamentali per la comprensione delle origini e dell'evoluzione del Sistema Solare (SS). Tra questi, i sistemi composti da due o più corpi legati gravitazionalmente rivestono un ruolo di primaria importanza nell'ambito dell'astrofisica e delle scienze planetarie. Lungi dall'essere anomalie statistiche, i sistemi multipli — che includono binari, tripli e coppie di asteroidi — costituiscono una frazione considerevole dell'intera popolazione asteroidale nota, a conferma che i meccanismi fisici alla base della loro formazione sono processi ubiquitari [Margot et al., 2015].

Da un punto di vista scientifico, tali sistemi fungono da eccellenti laboratori astrofisici naturali. L'indagine delle proprietà fondamentali di un piccolo corpo isolato presenta notevoli sfide, poiché parametri cruciali come la massa o la densità interna risultano spesso inaccessibili. Al contrario, i sistemi binari offrono un'opportunità privilegiata per derivare con precisione tali caratteristiche: attraverso l'osservazione delle mutue interazioni gravitazionali e della dinamica orbitale, è possibile calcolare le masse dei singoli componenti. La massa, unita alle stime volumetriche, consente di ricavare la densità media e di inferire preziose informazioni sulla porosità e sulla natura strutturale degli asteroidi, come la loro configurazione *rubble-pile* [Margot et al., 2015]. Inoltre, le architetture di questi sistemi conservano la memoria delle interazioni collisionali passate e dei lenti processi di alterazione guidati dalla radiazione solare [Margot et al., 2015]. Comprendere la dinamica dei sistemi binari significa, in ultima analisi, decifrare i meccanismi evolutivi che governano l'intera popolazione dei piccoli corpi.

L'indagine sui piccoli corpi ha evidenziato come i *Near-Earth Objects* (NEOs), e in particolare i *Near-Earth Asteroids* (NEAs), rappresentino un rischio per il nostro pianeta. Sebbene il continuo monitoraggio e le relative soluzioni orbitali degli oggetti attualmente noti non individuino minacce dirette per il prossimo secolo Daly et al. [2023], il catalogo dei NEAs risulta intrinsecamente incompleto. Non conoscendo l'intera popolazione asteroidale, risulta impossibile escludere a priori la presenza di pericoli per i secoli a venire Daly et al. [2023]. Tale lacuna osservativa è particolarmente critica per gli oggetti con diametro superiore ai 140 m: se da un lato non tutti i corpi di taglia inferiore al chilometro costituiscono una minaccia, gli asteroidi che superano tale limite dimensionale possiedono l'energia cinetica sufficiente per causare catastrofiche devastazioni su scala regionale in caso di impatto terrestre Daly et al. [2023]. Tale consapevolezza ha spinto la comunità internazionale a strutturare programmi dedicati alla difesa planetaria. L'obiettivo non si limita al

potenziamento delle reti di monitoraggio, ma prevede lo sviluppo e la validazione di tecnologie atte a mitigare proattivamente un'eventuale rotta di collisione [Michel et al., 2022]. Affinché le strategie di mitigazione siano validate, è tuttavia indispensabile condurre esperimenti pratici su scala astronomica.

In questo contesto operativo, i sistemi binari di asteroidi, che costituiscono circa il 15 % della popolazione dei NEAs [Margot et al., 2015], offrono un ambiente dinamico ideale per testare le tecniche di deflessione in sicurezza. Deviare l'orbita di un asteroide singolo comporterebbe lunghi tempi di osservazione per confermare l'entità della deviazione, oltre al rischio di modificare la sua traiettoria attorno al Sole in modo indesiderato [Thomas et al., 2023]. Un sistema binario, al contrario, offre un ambiente di test molto più sicuro e controllabile. Colpendo esclusivamente il corpo secondario, si modifica unicamente la sua orbita attorno all'asteroide principale [Thomas et al., 2023; Michel et al., 2022]. Questa variazione può essere calcolata da Terra in modo rapido e preciso osservando le eclissi reciproche tra i due corpi, ovvero le periodiche diminuzioni di luminosità del sistema che si verificano quando un asteroide transita davanti all'altro [Thomas et al., 2023]. Così facendo, è possibile quantificare l'efficacia della deflessione senza alterare la traiettoria dell'intero sistema nel Sistema Solare [Michel et al., 2022].

Le strategie di mitigazione orbitale si suddividono formalmente in approcci *slow-push* e impulsivi [Thiry and Vasile, 2017]. Le tecniche a spinta continua, quali il *Gravity Tractor* (GT) e lo *Ion Beam Shepherd* (IBS), garantiscono deviazioni precise annullando il rischio di frammentazione del bersaglio, ma risultano penalizzate dalla necessità di sonde massicce o dal complesso controllo del veicolo a lungo termine [Ballouz et al., 2025; Bombardelli et al., 2013]. Al contrario, metodi impulsivi come la deflessione nucleare offrono un'elevata spinta, ideale per bersagli massicci o qualora la finestra temporale utile per l'intervento prima di una collisione risulti estremamente limitata [Howley et al., 2014], esponendo tuttavia l'asteroide al rischio di una pericolosa disgregazione strutturale [Barbee et al., 2026]. Tra tutte le opzioni, il *Kinetic Impactor* (KI) si distingue per la sua semplicità progettuale e l'elevata affidabilità [Barbee et al., 2026], risultando la tecnica più performante nel 78 % degli scenari di deflessione analizzati [Thiry and Vasile, 2017].

In virtù di questi vantaggi operativi, la tecnica del KI è attualmente l'approccio tecnologicamente più maturo per gli scopi di difesa planetaria. A consolidare tale maturità contribuiscono inoltre le fondamentali poste da importanti missioni precursori come Deep Impact e Hayabusa2, le quali hanno condotto veri e propri esperimenti di impatto per la formazione di crateri artificiali a scopi scientifici [A'Hearn et al., 2005; Arakawa et al., 2020]. Sfruttando le medesime dinamiche collisionali, il principio fisico della mitigazione cinetica consiste nell'intercettare l'asteroide bersaglio con un veicolo spaziale ad altissima velocità, trasferendogli quantità di moto per indurre una variazione della velocità orbitale [Thiry and Vasile, 2017]. Il trasferimento di momento, tuttavia, non si riduce a un semplice urto anelastico. Durante una collisione iperveloce, un volume considerevole di materiale (*ejecta*) viene espulso dalla superficie. Per il principio di conservazione della quantità di moto, l'espulsione retrograda dei detriti fornisce una spinta aggiuntiva al bersaglio. Questo effetto viene quantificato dal fattore di amplificazione della quantità di moto ( $\beta$ ). Se  $\beta = 1$  descrive

un urto perfettamente anelastico, una vigorosa emissione di *ejecta* genera valori di  $\beta > 1$ , amplificando l'efficienza della deflessione [Barbee et al., 2026]. La previsione teorica del parametro  $\beta$  è estremamente complessa, dipendendo criticamente dalle proprietà intrinseche del bersaglio (densità, porosità, resistenza coesiva) e dalla sua struttura interna [Barbee et al., 2026; Howley et al., 2014]. In regime di microgravità, i modelli numerici necessitano obbligatoriamente di dati misurati *in situ* per essere validati in modo definitivo [Barbee et al., 2026].

Per trasformare l'impatto cinetico in una capacità operativa validata, la *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) e la *European Space Agency* (ESA) hanno istituito la collaborazione internazionale *Asteroid Impact and Deflection Assessment* (AIDA) [Michel et al., 2022]. Il programma mira a testare la tecnologia di deviazione e a studiare la fisica degli impatti in microgravità, focalizzandosi sul sistema binario (65803) Didymos. La prima fase della collaborazione è stata condotta dalla missione *Double Asteroid Redirection Test* (DART) della NASA, che ha intercettato e colpito intenzionalmente il satellite Dimorphos per alterarne il periodo orbitale [Daly et al., 2023]. L'esperimento ha dimostrato la fattibilità dell'intercettazione cinematica, permettendo di misurare da Terra l'avvenuta perturbazione del sistema [Thomas et al., 2023]. Tuttavia, parametri fondamentali quali la massa esatta di Dimorphos, la distribuzione della densità e l'esatta morfologia del cratere generato non sono derivabili con precisione dalle osservazioni terrestri. Per completare il quadro sperimentale, l'ESA ha sviluppato la missione Hera, progettata per condurre un'indagine post-impatto ad altissima risoluzione [Michel et al., 2022]. Effettuando un *rendezvous* con il sistema, Hera misurerà la massa del secondario, sonderà la sua struttura interna e mapperà le conseguenze dell'impatto. Le due missioni operano in stretta sinergia: DART esegue la perturbazione dinamica, mentre Hera fornisce la caratterizzazione fisica definitiva, necessaria per validare i modelli numerici di deflessione cinetica e d'impatto in microgravità [Michel et al., 2022].

Il presente lavoro si prefigge di analizzare il primo test su scala reale di difesa planetaria, esplorando l'intersezione tra le dinamiche dei sistemi binari e le tecnologie di mitigazione orbitale, con particolare riferimento alla missione Hera e al sistema (65803) Didymos. L'elaborato è strutturato in quattro capitoli. A seguito della presente introduzione, il Capitolo 1 presenta un inquadramento generale sulla natura degli asteroidi, descrivendone la classificazione tassonomica e orbitale, i modelli di struttura interna e i meccanismi di evoluzione dinamica guidati da forze non gravitazionali. Il Capitolo 2 esplora il fondamento teorico dei sistemi multipli di asteroidi, definendone la classificazione, le diverse configurazioni morfologiche e i relativi meccanismi di formazione. Il Capitolo 3 restringe l'indagine al sistema binario Didymos–Dimorphos e alla missione DART, definendo inizialmente l'architettura fisica e orbitale del sistema bersaglio nello scenario pre-impatto. Successivamente, vengono esaminati la dinamica della collisione, i risultati primari ottenuti tramite le osservazioni terrestri e le incertezze residue legate all'impossibilità di determinare la massa esatta di Dimorphos. Infine, il Capitolo 4 è dedicato alla missione Hera, delineandone gli obiettivi scientifici, la strumentazione di bordo e le strategie operative, evidenziando il ruolo cruciale della caratterizzazione post-impatto per la validazione definitiva dei modelli di impatto cinetico in regime di microgravità. Il capitolo include

inoltre un'analisi spettrale dei dati HyperScout-H acquisiti durante il flyby di Marte del 12 marzo 2025, basata sulla tassonomia di Mahlke, che ha permesso di classificare le regioni superficiali e di confrontare i risultati con i modelli litologici consolidati in letteratura.

# Capitolo 1

## Gli Asteroidi

L'ultimo decennio ha portato a notevoli miglioramenti nella scoperta e nella caratterizzazione su larga scala degli asteroidi. Con oltre mezzo milione di corpi noti, di cui più di centomila provvisti di misurazioni fisiche, questa inedita abbondanza di dati ha permesso alla comunità scientifica di delineare una nuova visione globale della *Main Asteroid Belt* (MAB) [DeMeo et al., 2015]. Integrando le osservazioni telescopiche con le misurazioni derivanti dai campioni meteoritici e con i più recenti modelli dinamici, è emerso un quadro decisamente più completo dell'evoluzione del SS. L'attuale paradigma scientifico ha infatti superato l'idea classica secondo cui le fasce di planetesimi sarebbero strutture puramente primordiali e statiche; le evidenze dimostrano invece come queste popolazioni siano state attivamente modellate e alterate da processi evolutivi successivi alla formazione del sistema planetario [DeMeo et al., 2015].

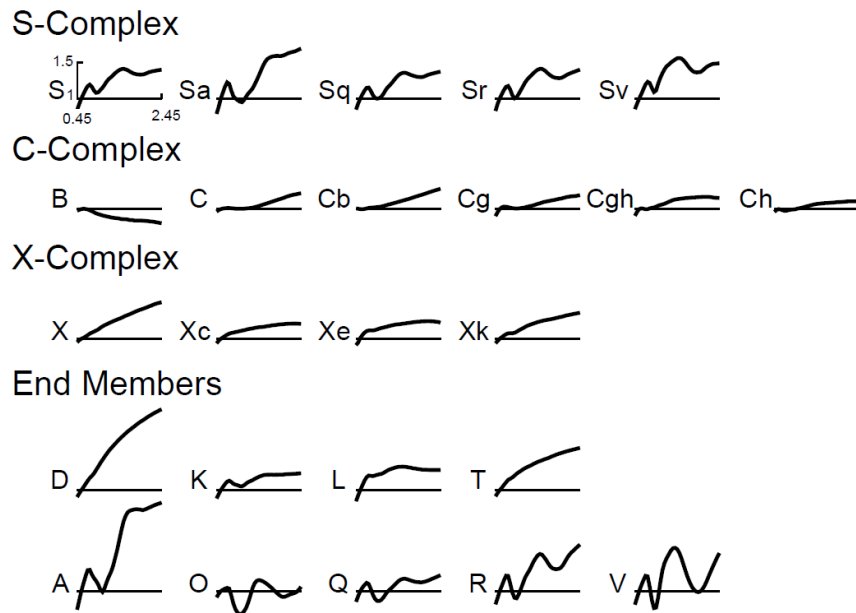
Al fine di comprendere a fondo la natura di questi oggetti e la complessa rete di gradienti composizionali che li caratterizza, risulta essenziale definire i parametri attraverso i quali vengono raggruppati e studiati.

### 1.1 Classificazione

Le proprietà superficiali di un asteroide, tra cui la granulometria, la mineralogia e il grado di alterazione spaziale (*space weathering*), possono essere dedotte attraverso misurazioni spettroscopiche e fotometriche effettuate a lunghezze d'onda che spaziano dall'ultravioletto ( $0.33\ \mu\text{m}$ ) all'infrarosso ( $2.45\ \mu\text{m}$ ) [DeMeo et al., 2015]. Le classificazioni tassonomiche forniscono una caratterizzazione rapida e un linguaggio comune per il confronto delle proprietà chimico-fisiche dei piccoli corpi. L'evoluzione di questi sistemi ha visto il passaggio dalle prime indagini nel visibile di Tholen ( $0.33\text{--}1.0\ \mu\text{m}$ ) a quelle più estese nel *near infrared* (NIR) di Bus-DeMeo ( $0.45\text{--}2.45\ \mu\text{m}$ ), permettendo di risolvere ambiguità mineralogiche precedentemente inaccessibili [DeMeo et al., 2015]. I dettagli spettrali e le corrispondenze meteoritiche di tali sistemi sono sintetizzati nella Tabella 1.1.

### 1.1.1 Tassonomia Spettrale

L'analisi degli spettri di riflessione ha permesso di suddividere gli asteroidi in tre grandi complessi principali, a cui si aggiungono alcune classi peculiari, ciascuno caratterizzato da firme mineralogiche distinte, le cui morfologie sono visivamente riassunte nell'attuale standard tassonomico di Bus-DeMeo mostrato in Figura 1.1.



**Figura 1.1:** Profili di riflettanza definiti dalla tassonomia di Bus-DeMeo. La figura illustra le 24 classi spettrali degli asteroidi misurate nell'intervallo di lunghezze d'onda che spazia dal visibile al vicino infrarosso ( $0.45\text{--}2.45\ \mu\text{m}$ ). L'andamento delle curve evidenzia le marcate differenze morfologiche utilizzate per la classificazione mineralogica: la presenza e la profondità delle bande di assorbimento a  $1\ \mu\text{m}$  e  $2\ \mu\text{m}$  (tipiche del complesso S e di end-members come il tipo V), la piattezza spettrale (caratteristica del complesso C) e le variazioni di pendenza (osservabili nel complesso X e nei tipi D). Immagine adattata da DeMeo et al. [2015].

#### 1.1.1.1 Il Complesso S

Il complesso S, la cui denominazione deriva dalla composizione silicatica, è caratterizzato da spettri con moderate bande di assorbimento a  $1\ \mu\text{m}$  e  $2\ \mu\text{m}$  dovute alla presenza di olivina e pirosseno [DeMeo et al., 2015]. Storicamente associato alle condriti ordinarie, specialmente per la classe S(IV), il complesso S mostra una notevole diversità interna. Le tassonomie più raffinate, come quella di Gaffey et al. [1993], distinguono sette classi mineralogiche basate sul centro della "Banda I" e sul rapporto tra le aree delle bande di assorbimento. Parallelamente, il sistema di Bus introduce criteri di separazione basati sulla forza della pendenza (*drop*) a  $0.9\ \mu\text{m}$  per discriminare le diverse sottoclassi [DeMeo et al., 2015]. Tale precisione permette di associare sottogruppi specifici a diverse famiglie meteoritiche, come schematizzato nella Tabella 1.1: ad esempio, gli asteroidi S(I) presentano analogie con le pallasiti e le condriti R, il tipo S(VII) è associato alle acondriti basaltiche, mentre per il tipo S(V) si ipotizza un legame con le acondriti primitive [DeMeo et al., 2015]. Nella popolazione dei NEOs, il complesso S rappresenta oltre la metà delle osservazioni

[Binzel et al., 2015]. Tuttavia, processi di *shock darkening* dovuti a impatti violenti possono attenuare le bande di assorbimento dei silicati, portando questi oggetti a essere erroneamente classificati nei complessi C o X [DeMeo et al., 2015].

#### 1.1.1.2 Il Complesso C

Il complesso C identifica corpi a basso albedo spettralmente piatti o con pendenze ridotte, composti prevalentemente da materiali opachi, carbonio e fillosilicati [DeMeo et al., 2015]. Sebbene associati alle condriti carbonacee (fatta eccezione per il gruppo CV), alcuni membri mostrano deboli tracce spettrali indicanti la presenza di olivina e pirosseno. È stato inoltre ipotizzato che alcuni tipi C possano rappresentare prodotti di fusione da impatto (*impact melts*) derivanti da condriti ordinarie o meteoriti *Howardite-Eucrite-Diogenite* (HED) [DeMeo et al., 2015]. Sotto il profilo analitico, Bus-DeMeo evidenzia come le caratteristiche nel NIR per questo complesso risultino ampiamente degeneri, rendendo difficile la distinzione tra le sottoclassi in quella regione dello spettro. Se nel sistema di Tholen la distinzione era affidata principalmente al calo di riflettanza nell'ultravioletto ( $0.3\text{--}0.5\ \mu\text{m}$ ), le classificazioni di Bus e Bus-DeMeo — mostrate nella Tabella 1.1 — hanno introdotto sottoclassi (come Cgh e Ch) definite dalla presenza di specifiche bande a  $0.7\ \mu\text{m}$  [DeMeo et al., 2015].

#### 1.1.1.3 Il Complesso X

Il complesso X raccoglie oggetti con spettri a pendenza moderata e, analogamente al complesso C, presenta una marcata degenerazione spettrale nel NIR. La tassonomia di Tholen risolveva tale ambiguità attraverso l'albedo, separando il complesso nelle classi E (alta albedo, associata a enstatite e oldhamite), M (albedo media, legata a metalli ferrosi o condriti carbonacee) e P (bassa albedo, ricca di opachi, carbonio e pirosseno a basso contenuto di ferro) [DeMeo et al., 2015]. La tassonomia di Bus identifica inoltre la classe Xe tramite una specifica *feature* diagnostica a  $0.49\ \mu\text{m}$ . Gli analoghi meteoritici, descritti in Tabella 1.1, variano considerevolmente: dalle enstatiti per il tipo E, ai ferri e meteoriti di tipo CB (inclusi i ferri ricchi di silicati) per gli asteroidi M caratterizzati da alto albedo radar [DeMeo et al., 2015].

#### 1.1.1.4 Gli *end-members*

Infine, esistono classi spettrali peculiari definite *end-members*. Tra queste, i tipi V mostrano forti affinità con le meteoriti HED, essendo dominati da pirosseno e plagioclasti feldspati. I tipi A sono caratterizzati da una profonda banda a  $1\ \mu\text{m}$  indicativa di una composizione ricca di olivina, con analogie estese alle pallasiti, brachiniti e condriti R. I tipi Q rappresentano lo spettro "fresco" delle condriti ordinarie LL non ancora alterate dallo *space weathering* [Binzel et al., 2015].

Altre classi, tutte coerentemente definite tra i vari sistemi tassonomici e mostrate nella Tabella 1.1, includono: i tipi D, composti da organici e materiali opachi; i tipi K, associati a condriti carbonacee CO/CV e olivina; i tipi L, caratterizzati da spinelli e inclusioni ricche di calcio e alluminio; e infine i tipi O e R, composti rispettivamente da combinazioni di pirosseno-olivina e olivina-pirosseno [DeMeo et al., 2015].

**Tabella 1.1:** Confronto e descrizione dell'evoluzione delle tassonomie spettrali. Tabella adattata da DeMeo et al. [2015].

|                                    | Tholen<br>(1984)           | Gaffey<br>(1993)            | Bus<br>(2002)               | Bus-<br>DeMeo<br>(2009)     | Note<br>Tassonomiche                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Minerali rilevanti<br>e analoghi meteoritici                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|------------------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Intervallo<br>$\lambda$            | 0.33–<br>1 $\mu\text{m}$   | 0.35–<br>2.50 $\mu\text{m}$ | 0.45–<br>0.90 $\mu\text{m}$ | 0.45–<br>2.45 $\mu\text{m}$ |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| <b>Complesso<br/>S</b>             | S                          | SI                          | S                           |                             | <b>Tholen:</b> Definita solo la classe S.<br><b>Gaffey:</b> 7 classi mineralogiche basate su centro Banda I e rapporto aree Banda II/I.<br><b>Bus:</b> Separazione basata sulla forza del <i>drop</i> a 0.9 $\mu\text{m}$ .<br><b>B-D:</b> Definizione ereditata da Bus. Include le bande a 1 e 2 $\mu\text{m}$ nel NIR. Sl, Sk, Ld rimossi, Sv aggiunta. | <b>Minerali:</b> olivina, pirosseno.<br><b>Meteoriti:</b> S(I): pallasiti?, condriti R. S(IV): molte simili a condriti ordinarie. S(V): acondriti primitive? S(VII): acondriti basaltiche.                                                                                                                                                                         |
|                                    |                            | SII                         | Sa                          | S                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|                                    |                            | SIII                        | Sq                          | Sa                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|                                    |                            | SIV                         | Sr                          | Sq                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|                                    |                            | SV                          | Sk                          | Sr                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|                                    |                            | SVI                         | Sl                          | Sv                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|                                    |                            | SVII                        |                             |                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| <b>Complesso<br/>C</b>             | B<br>C<br>F<br>G           | —                           | B                           | B                           | <b>Tholen:</b> Distinzione basata principalmente sul calo di riflettanza nell'UV (0.3–0.5 $\mu\text{m}$ ).<br><b>Bus:</b> Definita dal calo nell'UV e/o dalla banda a 0.7 $\mu\text{m}$ (Cgh, Ch).<br><b>B-D:</b> Definizione ereditata da Bus. Caratteristiche nel NIR ampiamente degeneri.                                                              | <b>Minerali:</b> opachi, carbonio, fillosilicati; alcune tracce di olivina e pirosseno.<br><b>Meteoriti:</b> condriti carbonacee (eccetto CV); possibili prodotti di fusione da impatto ( <i>impact melts</i> ) da condriti ordinarie o HED?                                                                                                                       |
|                                    |                            |                             | C                           | C                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|                                    |                            |                             | Cb                          | Cb                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|                                    |                            |                             | Cg                          | Cg                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|                                    |                            |                             | Cgh                         | Cgh                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| <b>Complesso<br/>X</b>             | E<br>M<br>P                | —                           | X                           | X                           | <b>Tholen:</b> E, M, P spettralmente degeneri. Distinti per albedo: alta (E), media (M) e bassa (P).<br><b>Bus:</b> Classe X definita dalla forma dello spettro e/o dalla <i>feature</i> a 0.49 $\mu\text{m}$ (Xe).<br><b>B-D:</b> Definizione ereditata da Bus. Caratteristiche nel NIR ampiamente degeneri.                                             | <b>Minerali:</b> M,P: opachi, carbonio, pirosseno a basso contenuto di Fe.<br>E: enstatite, oldhamite.<br><b>Meteoriti:</b> M,P: condriti carbonacee (non CV). M ad alto albedo radar: meteoriti ferrose, CB, ferri ricchi di silicati. E: enstatiti.                                                                                                              |
|                                    |                            |                             | Xc                          | Xc                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|                                    |                            |                             | Xe                          | Xe                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|                                    |                            |                             | Xk                          | Xk                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|                                    |                            |                             |                             |                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| <b>Altro:<br/>End-<br/>members</b> | T<br>D<br>O<br>R<br>V<br>A | —                           | T                           | T                           | Definizioni coerenti tra i vari sistemi tassonomici poiché classi spettralmente distinte.                                                                                                                                                                                                                                                                 | <b>D:</b> opachi, organici.<br><b>Q:</b> prevalentemente condriti ordinarie LL.<br><b>O:</b> pirosseno, olivina.<br><b>R:</b> olivina, pirosseno.<br><b>V:</b> HED, pirosseno, plagioclasti feldspati.<br><b>A:</b> pallasiti, brachinititi, condriti R, olivina.<br><b>K:</b> CO, CV, olivina.<br><b>L:</b> inclusioni ricche di Ca-Al (CAI), ricche di spinelli. |
|                                    |                            |                             | D                           | D                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|                                    |                            |                             | Q                           | Q                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|                                    |                            |                             | O                           | O                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|                                    |                            |                             | R                           | R                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|                                    |                            |                             | V                           | V                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|                                    |                            |                             | A                           | A                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|                                    |                            |                             | K                           | K                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|                                    |                            |                             | L                           | L                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|                                    |                            |                             | Ld                          | L                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |

### 1.1.2 Distribuzione Spaziale ed Orbitale nel Sistema Solare

La distribuzione spaziale degli asteroidi all'interno del SS non è una configurazione statica, bensì il risultato di una continua e complessa evoluzione dinamica. Per studiare l'architettura primordiale di queste popolazioni, l'indagine si avvale del calcolo degli elementi orbitali propri (*proper elements*), parametri che fungono da quasi-integrali di moto mantenendosi pressoché costanti nel tempo [DeMeo et al.,

2015]. Tuttavia, a causa dell'intensa evoluzione collisionale e della migrazione orbitale su vasta scala, le orbite attuali conservano traccia della struttura originaria della MAB solo per i corpi dotati di grandi dimensioni, tipicamente con un diametro  $D > 50$  km [DeMeo et al., 2015]. Per gli oggetti più piccoli, l'orbita odierna non riflette le condizioni di partenza, ma è l'esito di una lenta diffusione nello spazio degli elementi orbitali [Michel et al., 2015].

La MAB è delimitata e solcata da zone di instabilità gravitazionale che fungono da veri e propri corridoi di transito verso il SS interno. Tali regioni critiche includono le risonanze dinamiche, come le risonanze di moto medio con Giove (tra cui la 3:1 a 2.5 AU o la 5:2 a 2.82 AU) e le potenti risonanze secolari di ordine elevato, come la  $\nu_6$  legata all'influenza di Saturno [Binzel et al., 2015]. L'ingresso in queste risonanze deforma drasticamente l'eccentricità orbitale dei piccoli corpi, estraendoli dalla MAB e immettendoli su orbite estreme. Una volta su queste traiettorie, gli asteroidi sono destinati a incrociare le orbite dei pianeti terrestri, a collidere con il Sole o a subire una definitiva espulsione dal SS [DeMeo et al., 2015; Bottke et al., 2015].

I modelli dinamici hanno permesso di mappare con precisione le regioni sorgente che definiscono l'attuale distribuzione di questi corpi fuggiti dalle loro orbite originarie. La complessa architettura orbitale prevede che circa il 61% della popolazione in migrazione provenga dalla MAB interna ( $a < 2,5$  AU), il 24% dalla MAB centrale ( $2,5 < a < 2,8$  AU, inclusa la regione di incrocio con l'orbita di Marte) e circa l'8% dalle propaggini della MAB esterna ( $a > 2,8$  AU) [Binzel et al., 2015].

Una volta raggiunte le regioni in prossimità della Terra, questi corpi vanno a costituire la popolazione dei NEO. Tale denominazione, in contesti generali, viene preferita a NEA per riconoscere formalmente che il bacino degli oggetti in prossimità terrestre riceve contributi sia da corpi di origine asteroidale che cometaria; si stima infatti che il restante 6% della popolazione NEO provenga dalle comete della famiglia di Giove (*Jupiter Family Comets*) [Binzel et al., 2015].

L'analisi demografica e spaziale dei NEO è pesantemente condizionata da intrinseci bias osservativi: le survey di rilevamento, essendo limitate dalla magnitudine apparente degli oggetti, favoriscono l'individuazione di corpi dotati di albedo elevato. Di conseguenza, si osserva una predominanza del complesso S, che include oltre la metà delle osservazioni [Binzel et al., 2015]. Al contrario, si registra una sotto rappresentazione sistematica delle popolazioni scure: i complessi C e X costituiscono, in base alle attuali misurazioni, rispettivamente solo il  $\sim 15\%$  e il  $\sim 10\%$  delle osservazioni dei NEO, valori anomali e ridotti se rapportati alle percentuali abbondanti presenti nella MAB [Binzel et al., 2015]. Risulta inoltre arduo discriminare in modo netto i serbatoi originari basandosi unicamente sulla posizione: oggetti classificati come primitivi o cometari in virtù della loro bassa albedo risiedono su orbite tipiche, ma la complessa miscelazione dinamica può spingere materiali puramente asteroidali verso stati orbitali comunemente imputati al dominio cometario [Binzel et al., 2015].

## 1.2 Struttura Interna e Morfologia

Poiché le strutture interne e la geofisica degli asteroidi rimangono in gran parte inesplorate e inaccessibili a campionamenti diretti, lo studio dei loro interni deve affidarsi a una complessa combinazione di misurazioni indirette e modelli teorici [Scheeres et al., 2015]. Le caratteristiche più accessibili di un asteroide — massa, densità, forma e stato rotazionale — sono infatti profondamente vincolate dalla struttura interna e dalle proprietà meccaniche e di resistenza dei materiali che la compongono [Scheeres et al., 2015].

### 1.2.1 Dai Monoliti ai *Rubble-Pile*

La visione canonica della differenziazione asteroidale assumeva che un corpo completamente differenziato dovesse formare un nucleo di ferro, un mantello silicatico e una crosta basaltica, riscaldandosi e fondendosi a causa del decadimento dell'isotopo radiogeno  $^{26}\text{Al}$  [DeMeo et al., 2015]. Tuttavia, modelli più recenti hanno messo in discussione l'universalità di questo semplice meccanismo di riscaldamento interno, suggerendo che perfino i corpi progenitori delle condriti ordinarie possano essere aggregati di macerie, formatisi a seguito di collisioni primordiali avvenute quando i materiali erano ancora ad alte temperature [DeMeo et al., 2015].

Dal punto di vista dell'evoluzione collisionale, si stima che solo i corpi con diametro superiore a decine o centinaia di chilometri possiedano tempi di vita collisionali superiori all'età del SS, suggerendo per essi una natura primordiale. Al contrario, la quasi totalità dei corpi di dimensioni inferiori è costituita da frammenti collisionali di seconda generazione [Michel et al., 2015]. Il passaggio tra il regime di frammentazione dominato dalla resistenza a trazione del materiale (*strength-scaling*) e quello governato dall'autogravità (*gravity-scaling*) si colloca in un intervallo dimensionale stimato tra  $100 < D < 200$  m [Bottke et al., 2015]. Per impatti che coinvolgono corpi di diametro superiore a qualche centinaio di metri, le simulazioni idrodinamiche dimostrano che la distruzione catastrofica non genera frammenti isolati, bensì porta alla formazione di grandi aggregati dovuti alla riaccumulazione gravitazionale dei detriti [Michel et al., 2015].

Queste strutture sono definite *rubble-pile* (letteralmente "cumuli di macerie") o aggregati gravitazionali: corpi completamente frantumati e riassemblati, che per gli oggetti rocciosi rappresentano la norma strutturale fino alla scala di pochi metri [Scheeres et al., 2015; Bottke et al., 2015]. Di conseguenza, l'idea di asteroidi monolitici è stata ampiamente ridimensionata: si ritiene oggi che la maggior parte dei corpi di grandi dimensioni presenti nella fascia principale, così come gli oggetti con  $D < 100$  km, siano corpi pesantemente frantumati (*pre-shattered*) o aggregati gravitazionali [Michel et al., 2015; Bottke et al., 2015].

### 1.2.2 Densità e Porosità Macroscopica

La struttura interna di un asteroide può essere vincolata confrontando la sua densità di massa globale ( $\rho_A$ ) con la densità dei grani dei suoi costituenti mineralogici probabili ( $\rho_C$ ), determinata attraverso l'analisi spettrale della superficie. Essendo i

meteoriti caratterizzati da una microporosità intrinseca ( $p_m$ , ovvero gli spazi vuoti alla scala dei singoli grani), la macroporosità  $\mathcal{P}$  del corpo è definita come la frazione di volume occupata da grandi vuoti strutturali, esprimibile analiticamente come  $\mathcal{P} = p - p_m$  [Scheeres et al., 2015].

Se risulta  $\rho_A \gg \rho_C$ , l'asteroide è sovradenso, condizione che impone la presenza di materiali ad alta densità nel suo interno, giustificabile tramite processi di differenziazione, autocompressione gravitazionale o collisioni tra corpi di densità differenti [Scheeres et al., 2015]. La sovradensità è una caratteristica ricorrente negli oggetti massicci (con massa superiore a  $10^{19}$  kg), i quali possedevano energia interna sufficiente per innescare la differenziazione; i pianeti nani (con masse superiori a  $10^{20}$  kg) presentano infatti una macroporosità quasi nulla [Scheeres et al., 2015]. L'asteroide (21) Lutetia, ad esempio, mostra una densità così elevata da suggerire la presenza di un nucleo differenziato [DeMeo et al., 2015]. Al contrario, se  $\rho_A \ll \rho_C$ , l'asteroide è sottodenso, indicando la presenza di grandi vuoti interni o di volatili a bassa densità, una caratteristica comune nella maggior parte dei corpi al di sotto dei  $10^{19}$  kg [Scheeres et al., 2015].

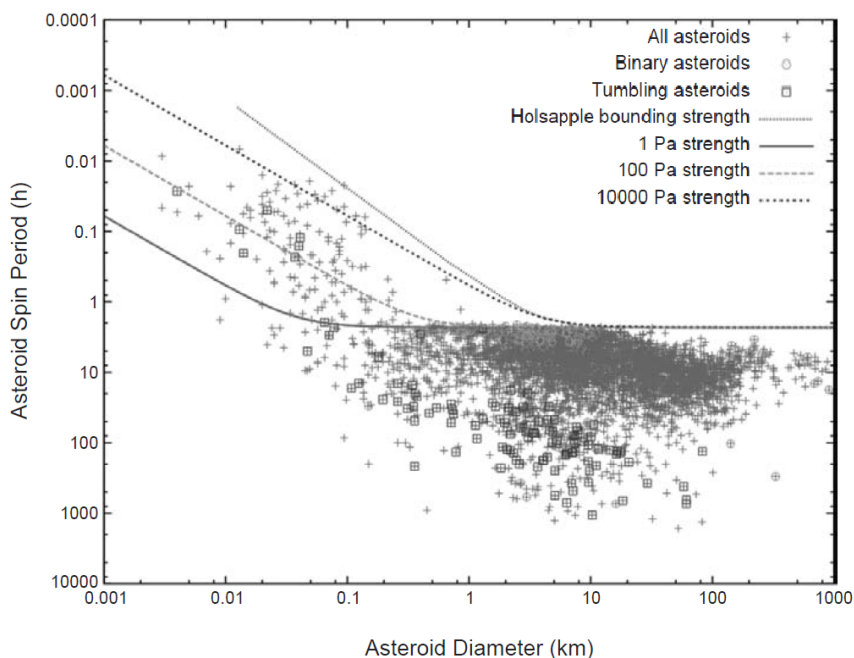
Le misurazioni rivelano inoltre una forte correlazione tra tassonomia e struttura. Gli asteroidi del complesso S presentano mediamente una densità superiore e una macroporosità inferiore rispetto agli oggetti del complesso C, i quali esibiscono una struttura interna notevolmente meno compatta [Scheeres et al., 2015]. Per le famiglie primitive o di tipo scuro, si assume infatti un alto grado di porosità [Michel et al., 2015], caratteristica che potrebbe peraltro garantire ai membri del complesso C (come l'asteroide (253) Mathilde) una sopravvivenza collisionale prolungata [DeMeo et al., 2015]. Tra le sottoclassi, i tipi B mostrano densità anomale e significativamente superiori ( $\sim 2.4 \text{ g cm}^{-3}$ ) rispetto agli altri membri del complesso C ( $\sim 1.4 \text{ g cm}^{-3}$ ) [Scheeres et al., 2015]. Infine, la popolazione dei NEAs ( $10^{11}$ – $10^{16}$  kg) mostra una densità mediamente ridotta rispetto agli analoghi della fascia principale, in accordo con il trend che vede una progressiva diminuzione della macroporosità al crescere della massa [Scheeres et al., 2015].

### 1.2.3 Coesione Interna e Meccanica dei Materiali

La dinamica deformativa dei *rubble-pile* non è assimilabile a quella dei fluidi o dei corpi rigidi, ma viene modellata seguendo i principi della meccanica delle terre (o dei mezzi granulari continui), adottando criteri di snervamento come quello di Mohr-Coulomb o Drucker-Prager [Scheeres et al., 2015; Michel et al., 2015]. In tali modelli, la resistenza al taglio del materiale aumenta in modo lineare se sottoposta a una pressione di compressione (ad esempio l'autogravità), la quale sopprime lo scorrimento dei grani rigidi gli uni sugli altri [Scheeres et al., 2015]. Inoltre, a causa della concentrazione degli sforzi generata dalla presenza di macroporosità e vuoti, la rigidità adimensionale effettiva di un aggregato gravitazionale risulta inferiore rispetto a quella di un monolite di pari dimensioni [Scheeres et al., 2015].

La resistenza meccanica definisce i limiti rotazionali di un asteroide, come mostrato dalla distribuzione osservativa in Figura 1.2. In assenza di coesione, un corpo con densità costante di  $\rho \sim 2.2 \text{ g cm}^{-3}$  cede strutturalmente quando la sua velocità di

rotazione supera il limite critico  $\omega_d = \sqrt{4\pi G\rho/3}$ , oltre il quale si innescano sforzi di trazione interna [Scheeres et al., 2015]. Tuttavia, l'analisi dell'asteroide (29075) 1950 DA ha dimostrato che, per non disgregarsi, la sua regione equatoriale deve necessariamente trovarsi in uno stato di trazione, contrastando le forze centrifughe estreme. Attraverso il modello di Drucker-Prager, è stata stimata una resistenza minima necessaria di circa 65 Pa, confermando per la prima volta l'azione di forze coesive su un asteroide [Scheeres et al., 2015]. Questa coesione è originata dalle attrazioni di van der Waals agenti tra i grani più fini della regolite, i quali formano una matrice cementante in grado di mantenere i massi più voluminosi saldamente ancorati alla struttura globale [Scheeres et al., 2015]. Tali forze coesive alterano radicalmente la dinamica di un'eventuale rottura rotazionale per i corpi più piccoli: al di sotto di determinate dimensioni, la velocità di rotazione necessaria affinché la fissione superi la coesione indurrebbe i frammenti a separarsi a velocità superiori alla loro mutua velocità di fuga gravitazionale [Scheeres et al., 2015].



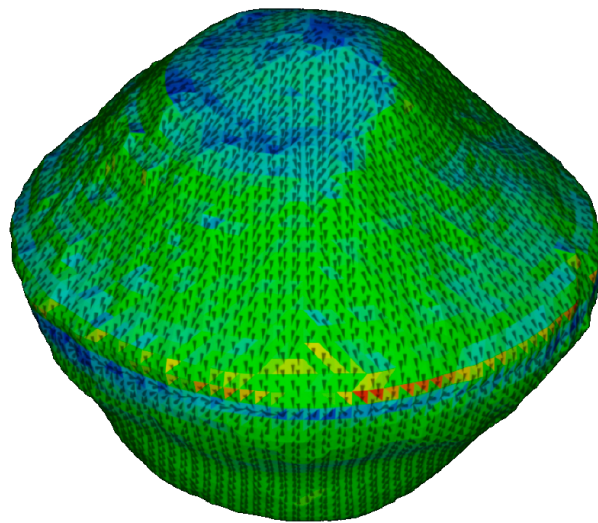
**Figura 1.2:** Distribuzione del periodo di rotazione in funzione del diametro per la popolazione asteroidale nota. Il grafico evidenzia un limite strutturale netto per i corpi di grandi dimensioni: nessun oggetto supera la cosiddetta "barriera gravitazionale" (gravity spin barrier). A tali scale dimensionali, l'equilibrio è dominato dall'autogravità e un aggregato privo di coesione si disgregherebbe qualora superasse il limite critico  $\omega_d$ . Al contrario, la presenza di corpi di piccole dimensioni (fast rotators) che ruotano a velocità estreme fornisce la prova osservativa della necessità di forze coesive interne, in grado di sostenere i massicci sforzi di trazione. Le curve continue illustrano i limiti teorici di spin in funzione di diversi gradi di resistenza del materiale. Immagine adattata da Scheeres et al. [2015].

#### 1.2.4 Forma *Top-Shape* e Rigonfiamento Equatoriale

La morfologia globale degli asteroidi, in particolare di quelli di dimensioni inferiori ai 30 – 40 km, è strettamente legata alla loro evoluzione rotazionale guidata dall'effetto

*Yarkovsky–O’Keefe–Radzievskii–Paddack* (YORP) [Bottke et al., 2015], discusso in dettaglio nella Sezione 1.3.2. Quando le coppie termiche accelerano la rotazione di un aggregato gravitazionale, il corpo deve riconfigurarsi per adattarsi al nuovo bilancio di momento angolare [Bottke et al., 2015]. Durante l’incremento dello spin, le componenti materiali migrano verso l’equatore, innescando la formazione di un rigonfiamento pronunciato o di creste equatoriali ben definite (spesso rivelate dalle indagini radar) e originando la caratteristica forma a trottola o *top-shape* [Scheeres et al., 2015; Binzel et al., 2015].

La ridistribuzione del materiale superficiale è intrinsecamente governata dalla topografia gravitazionale del corpo. Su un aggregato in rapida rotazione, le aree situate a latitudini intermedie sviluppano pendenze locali elevate; tali inclinazioni favoriscono un continuo scivolamento e una costante migrazione della regolite verso le quote inferiori. L’accumulo di questo materiale si concentra all’equatore, dando forma a un massiccio rigonfiamento. La migrazione accresce la struttura equatoriale preservandone, in media, una sezione trasversale pressoché circolare, caratterizzata da un rapporto degli assi equatoriali pari a  $a/b \approx 1.13 \pm 0.07$  [Walsh and Jacobson, 2015]. In questa specifica fascia, l’estrema velocità angolare del corpo genera un’accelerazione centrifuga di entità tale da bilanciare quasi totalmente l’attrazione gravitazionale locale, instaurando un peculiare ambiente superficiale in cui la gravità netta risulta pressappoco nulla.



**Figura 1.3:** Modello morfologico dell’asteroide 1999 KW4 ricavato da osservazioni radar, che illustra la distribuzione spaziale delle pendenze gravitazionali locali. La mappa cromatica evidenzia il delicato equilibrio delle forze agenti sulla superficie: le aree in verde indicano pendenze elevate (tra  $30^\circ$  e  $40^\circ$ ), propizie allo scivolamento e alla migrazione della regolite verso le basse latitudini. Le regioni in blu, disposte prevalentemente lungo il pronunciato rigonfiamento equatoriale, indicano pendenze prossime allo zero, definendo una fascia in cui l’intensa accelerazione centrifuga arriva a compensare quasi totalmente l’attrazione gravitazionale locale. Immagine adattata da Walsh and Jacobson [2015].

Un esempio empirico paradigmatico di questa dinamica morfologica è fornito dall’a-

steroidi 1999 KW4, come illustrato nella Figura 1.3. Nello specifico modello radar mostrato in figura, le pendenze gravitazionali locali sono state codificate cromaticamente per mappare il delicato equilibrio delle forze: le latitudini instabili, con inclinazioni comprese tra i  $30^\circ$  e i  $40^\circ$ , sono evidenziate in verde, mentre la fascia a gravità nulla, situata lungo il pronunciato rigonfiamento equatoriale, è mappata in blu.

L'elevata energia rotazionale non si limita a plasmare la morfologia superficiale, ma agisce in profondità influenzando l'intero assetto degli aggregati gravitazionali. Le dinamiche interne di adattamento indotte dai processi di spin-up comportano infatti un'espansione volumetrica del corpo, alterandone significativamente la densità macroscopica e la configurazione strutturale complessiva [Scheeres et al., 2015]. In questo stato di sollecitazione estrema, l'asteroide viene spinto verso un limite critico di cedimento meccanico, rendendo indispensabile l'azione di una resistenza coesiva interna per preservare l'integrità globale contro l'intensità delle forze centrifughe [Scheeres et al., 2015].

Lo stesso asteroide (66391) 1999 KW4 costituisce un banco di prova ideale anche per questi modelli di equilibrio profondo. Le indagini condotte su questo oggetto non si limitano infatti a validare la topografia superficiale precedentemente illustrata, ma confermano che il suo regime rotazionale estremo colloca l'aggregato in una condizione di stabilità limite, fornendo una prova empirica diretta sia dell'espansione volumetrica, sia della necessità di coesione strutturale previste dalla teoria. [Scheeres et al., 2015]

### 1.2.5 Strutture Superficiali e Processi Sismici

La superficie di un asteroide rappresenta un'interfaccia complessa, modellata in modo continuo da agenti esterni e alterazioni termomeccaniche. La distribuzione dei materiali superficiali evidenzia importanti disomogeneità termiche: si rileva un'inerzia termica notevolmente superiore per i blocchi rocciosi (*boulders*) rispetto alla regolite a granulometria fine. Poiché una porzione massiccia di roccia possiede una capacità termica maggiore rispetto ai singoli grani frammentati, necessita di tempi prolungati per assorbire l'energia solare necessaria a innalzare la propria temperatura [Binzel et al., 2015]. La distribuzione di massi sulla superficie degli aggregati *rubble-pile* è coerente con gli esiti dei processi di frammentazione e successiva riaccumulazione, meccanismo che spiega la morfologia di oggetti come l'asteroide (25143) Itokawa [Michel et al., 2015].

I piccoli corpi sono altresì soggetti a severi processi sismici. Gli impatti craterizzanti introducono nel corpo onde sismiche la cui attenuazione può essere direttamente stimata analizzando le dimensioni del cratere principale impresso sulla struttura dell'aggregato gravitazionale [Scheeres et al., 2015]. Un ulteriore potente motore di *resurfacing* è costituito dai passaggi ravvicinati con i corpi planetari: all'interno di una determinata "distanza sismica", le interazioni mareali inducono forti distorsioni e scuotimenti in grado di provocare frane localizzate o il rimodellamento completo della regolite superficiale [Binzel et al., 2015].

Infine, l'energia cinetica e vibrazionale in eccesso può essere dissipata internamente qualora l'asteroide venga immesso in uno stato di rotazione non uniforme, o *tumbling* [Scheeres et al., 2015]. Tale stato, che può essere innescato da frammentazioni catastrofiche, flyby planetari o eventi di fissione YORP, genera un campo di accelerazioni variabile nel tempo che sottopone l'aggregato a sforzi e deformazioni cicliche, permettendo la dissipazione dell'energia meccanica attraverso gli attriti tra i componenti interni [Scheeres et al., 2015].

## 1.3 Evoluzione Dinamica e Rotazionale

L'evoluzione a lungo termine della popolazione asteroidale, specialmente per i corpi di dimensioni inferiori ai 30 – 40 km, non è dettata esclusivamente dalle interazioni gravitazionali e collisionali, ma è profondamente alterata da forze termiche di natura non gravitazionale. L'assorbimento e la successiva riemissione della radiazione solare generano infatti spinte continue che, accumulandosi su scale temporali astronomiche, dominano le dinamiche orbitali e plasmano l'assetto strutturale e rotazionale dei corpi minori [Vokrouhlický et al., 2015; Bottke et al., 2015].

### 1.3.1 L'Effetto Yarkovsky e la Deriva Orbitale

L'effetto Yarkovsky induce una deriva secolare del semiasse maggiore dell'orbita, la cui entità dipende dalle dimensioni fisiche del corpo ed è generata dall'anisotropia nella riemissione della radiazione termica [Vokrouhlický et al., 2015; DeMeo et al., 2015]. Affinché questo fenomeno si manifesti, è strettamente necessario che l'asteroide possieda un'inerzia termica non nulla, la quale ritarda l'emissione del calore rispetto all'assorbimento della luce solare, generando una debole spinta propulsiva [Vokrouhlický et al., 2015].

Da un punto di vista analitico, assumendo una linearizzazione delle condizioni al contorno superficiali, una rotazione attorno a un asse di spin fisso nello spazio inerziale e un'orbita eliocentrica approssimativamente circolare, la variazione secolare del semiasse maggiore  $a$  mediata sull'orbita si compone di due contributi distinti, l'effetto diurno e l'effetto stagionale [Vokrouhlický et al., 2015]:

$$\left(\frac{da}{dt}\right)_{diurnal} = -\frac{8}{9} \frac{\alpha \Phi}{n} W(R_w, \Theta_w) \cos \gamma \quad (1.1)$$

$$\left(\frac{da}{dt}\right)_{seasonal} = \frac{4}{9} \frac{\alpha \Phi}{n} W(R_n, \Theta_n) \sin^2 \gamma \quad (1.2)$$

dove  $\Phi = \pi R^2 F / (mc)$ , con  $R$  che rappresenta il raggio caratteristico del corpo,  $F$  il flusso di radiazione solare alla distanza orbitale,  $m$  la massa dell'asteroide,  $c$  la velocità della luce e  $n$  il moto medio orbitale. Il parametro  $\alpha = 1 - A$  dipende dall'albedo di Bond  $A$ , mentre l'angolo  $\gamma$  rappresenta l'obliquità dell'asse di rotazione. Le funzioni  $W$  racchiudono le dipendenze dai parametri termofisici del corpo [Vokrouhlický et al., 2015].

Da tali equazioni, e in particolare dalla definizione del parametro  $\Phi$ , emerge che il tasso di deriva orbitale scala approssimativamente come  $1/R$  (o  $1/D$ ). Questa proporzionalità scaturisce direttamente dalla fisica del fenomeno: l'accelerazione indotta dalla radiazione dipende dalla sezione d'urto illuminata dell'asteroide, che scala con il quadrato del raggio ( $R^2$ ), mentre l'inerzia del corpo è determinata dalla sua massa, la quale, essendo proporzionale al volume, scala con il cubo del raggio ( $R^3$ ). Il rapporto intrinseco tra la superficie ricevente e la massa ( $R^2/R^3$ ) genera dunque la dipendenza netta da  $1/R$ , indicando che la velocità di migrazione aumenta in modo marcato al diminuire del diametro dell'asteroide e con la prossimità al Sole [DeMeo et al., 2015; Vokrouhlický et al., 2015]. A livello macroscopico, l'effetto Yarkovsky costituisce il principale motore dinamico in grado di modificare il semiasse maggiore proprio ( $a_p$ ) degli asteroidi multi-chilometrici, inducendo la dispersione a lungo termine delle famiglie asteroidali. Esso funge inoltre da "pozzo" per i corpi della fascia principale, agendo come il motore che spinge inesorabilmente gli asteroidi verso le zone di instabilità gravitazionale e le risonanze dinamiche già discusse nella Sezione 1.1.2 [DeMeo et al., 2015; Bottke et al., 2015]. Di conseguenza, la valutazione quantitativa della deriva di Yarkovsky di un oggetto richiede la formulazione di un accurato modello termofisico, risultando fondamentale per vincolare parametri interni quali la densità di massa e l'inerzia termica [Vokrouhlický et al., 2015].

### 1.3.2 L'Effetto YORP e l'Evoluzione dello Spin

L'effetto YORP, precedentemente introdotto nella Sezione 1.2.4 come il meccanismo responsabile della morfologia *top-shape* e del rigonfiamento equatoriale, rappresenta la controparte rotazionale dell'effetto Yarkovsky. Esso descrive il momento torcente generato dall'interazione tra la radiazione solare incidente (sia come luce direttamente diffusa sia come rinculo dovuto alla radiazione termica riprocessata) e le irregolarità morfologiche superficiali di un asteroide [Vokrouhlický et al., 2015; Bottke et al., 2015]. Al contrario dell'effetto Yarkovsky, lo YORP si annulla in presenza di modelli di forma geometricamente semplici, quali gli ellissoidi di rotazione; la sua efficacia deriva intrinsecamente dall'irregolarità dell'oggetto e da effetti non lineari come l'ombreggiamento reciproco tra porzioni di superfici non convesse [Vokrouhlický et al., 2015].

Mediando i momenti torcenti sui cicli di rotazione e rivoluzione, le equazioni che governano le variazioni a lungo termine del tasso di rotazione  $\omega$  e dell'obliquità  $\gamma$  sono descritte dalle relazioni [Vokrouhlický et al., 2015]:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\Lambda}{C} \sum_{n>1} A_n P_{2n}(\cos \gamma) \quad (1.3)$$

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{\Lambda}{C\omega} \sum_{n>1} B_n P_{2n}^1(\cos \gamma) \quad (1.4)$$

dove  $\Lambda = 2FR^3/(3c)$  e  $C$  rappresenta il momento di inerzia rispetto all'asse di rotazione (l'asse più corto del tensore d'inerzia). Le funzioni  $P_{2n}(\cos \gamma)$  e  $P_{2n}^1(\cos \gamma)$

sono, rispettivamente, i polinomi di Legendre di grado pari e le corrispondenti funzioni associate [Vokrouhlický et al., 2015]. Poiché il momento d'inerzia  $C$  scala in proporzione a  $R^5$ , le alterazioni dello stato rotazionale indotte dal YORP scalano con il raggio caratteristico come  $1/R^2$ . Tale marcata dipendenza dimensionale implica che la capacità dello YORP di alterare gli stati di spin aumenti in modo estremamente rapido procedendo verso oggetti di dimensioni inferiori, dominando l'evoluzione rotazionale degli asteroidi con  $D < 30 - 40$  km [Vokrouhlický et al., 2015; Bottke et al., 2015].

L'estrema sensibilità topografica di questo meccanismo determina che minime alterazioni della forma dell'asteroide, come la formazione di un piccolo cratere da impatto o lo spostamento superficiale di un masso, possano modificare sufficientemente il momento torcente da variarne l'intensità o persino invertirne il segno. Tali interruzioni ripetute del ciclo YORP rendono l'evoluzione dello spin stocastica (*stochastic YORP*), prolungando significativamente le tempistiche di accelerazione rotazionale e agendo come un potenziale meccanismo autolimitante contro i processi di perdita di massa continua [Bottke et al., 2015; Vokrouhlický et al., 2015].

L'evoluzione guidata dallo YORP può risolversi in un incremento (*spin-up*) o in un decremento (*spin-down*) del tasso rotazionale. Un rallentamento eccessivo priva il corpo di un asse principale stabile, immettendolo in una fase di rotazione non uniforme, o *tumbling*, e innescando così i meccanismi di dissipazione dell'energia meccanica già analizzati nella Sezione 1.2.5 [Scheeres et al., 2015; Vokrouhlický et al., 2015]. Al contrario, un'accelerazione persistente impone all'aggregato gravitazionale una drastica riconfigurazione per assecondare il nuovo bilancio del momento angolare, innescando quella migrazione di materiale verso l'equatore che origina la caratteristica morfologia *top-shape* discussa in dettaglio nella Sezione 1.2.4 [Bottke et al., 2015].

### 1.3.3 Limiti Coesivi e Fissione Rotazionale

Quando l'accelerazione rotazionale continua impressa dall'effetto YORP spinge l'aggregato a superare i limiti critici di coesione strutturale, già definiti nella Sezione 1.2.3 in relazione alla stabilità dei mezzi granulari, l'equilibrio meccanico del corpo viene meno. In questo regime di instabilità, il risultato atteso è una biforcazione morfologica che culmina nella fissione rotazionale. Tale meccanismo rappresenta il processo primario per la formazione dei sistemi binari di asteroidi, la cui genesi ed evoluzione dinamica verranno trattate in dettaglio nel Capitolo 2.



## Capitolo 2

# I Sistemi Binari di Asteroidi

Come evidenziato nel Capitolo 1, la popolazione asteroidale è costantemente modellata da processi collisionali e da forze termiche non gravitazionali che ne alterano l'assetto dinamico, strutturale e morfologico. In questo quadro evolutivo, l'abbondanza dei sistemi multipli all'interno del SS fornisce un'opportunità osservativa inestimabile per la caratterizzazione fisica dei piccoli corpi. Lo studio delle interazioni gravitazionali reciproche permette infatti di derivare con estrema precisione parametri fondamentali, altrimenti inaccessibili, quali la massa totale del sistema, la densità media e, conseguentemente, la macroporosità degli aggregati interni [Margot et al., 2015]. Tuttavia, per poter sfruttare appieno le potenzialità di questi complessi laboratori astrofisici naturali, è necessario definirne le rigorose architetture strutturali e dinamiche. I sistemi multipli, pur condividendo la medesima natura gravitazionale, non costituiscono una popolazione omogenea. Essi presentano una marcata diversità morfologica, dimensionale e orbitale, fortemente dipendente dalla regione del SS in cui risiedono e dai meccanismi fisici che ne hanno guidato la genesi e la successiva evoluzione. Di conseguenza, lo studio sistematico di tali oggetti richiede in primo luogo l'adozione di rigorosi criteri di classificazione [Margot et al., 2015].

### 2.1 Classificazione e Terminologia

Dal punto di vista terminologico, i sistemi costituiti da due o tre componenti legati gravitazionalmente vengono definiti rispettivamente asteroidi binari e tripli. Qualora i componenti siano geneticamente correlati, ovvero originati dal medesimo evento di separazione, ma non risultino più legati da reciproca attrazione gravitazionale condividendo orbite eliocentriche simili, essi si definiscono coppie di asteroidi (*asteroid pairs*) [Margot et al., 2015]. In un sistema multiplo gravitazionalmente legato, il corpo di dimensioni maggiori si definisce primario (indicato con il diametro  $D_1$  o  $D_p$ ), mentre il corpo minore orbitante attorno ad esso viene definito secondario o satellite (indicato con il diametro  $D_2$  o  $D_s$ ) [Margot et al., 2015].

Un parametro critico per la classificazione macroscopica dei sistemi binari è la taglia del corpo primario. Le evidenze osservative individuano uno spartiacque naturale situato in corrispondenza di un diametro  $D_p \approx 20$  km [Margot et al., 2015;

Walsh and Jacobson, 2015]. Come analizzato in dettaglio nella Sezione 1.3.2 in merito all'evoluzione rotazionale, tale limite dimensionale separa fisicamente i piccoli asteroidi, per i quali l'effetto YORP agisce in modo predominante su scale temporali brevi, dai corpi più massicci, per i quali tale forza termica radiativa risulta invece trascurabile [Margot et al., 2015].

### 2.1.1 Sincronicità del Sistema

Dal punto di vista dinamico, lo stato rotazionale e orbitale dei componenti permette di categorizzare i sistemi binari in base alla sincronicità:

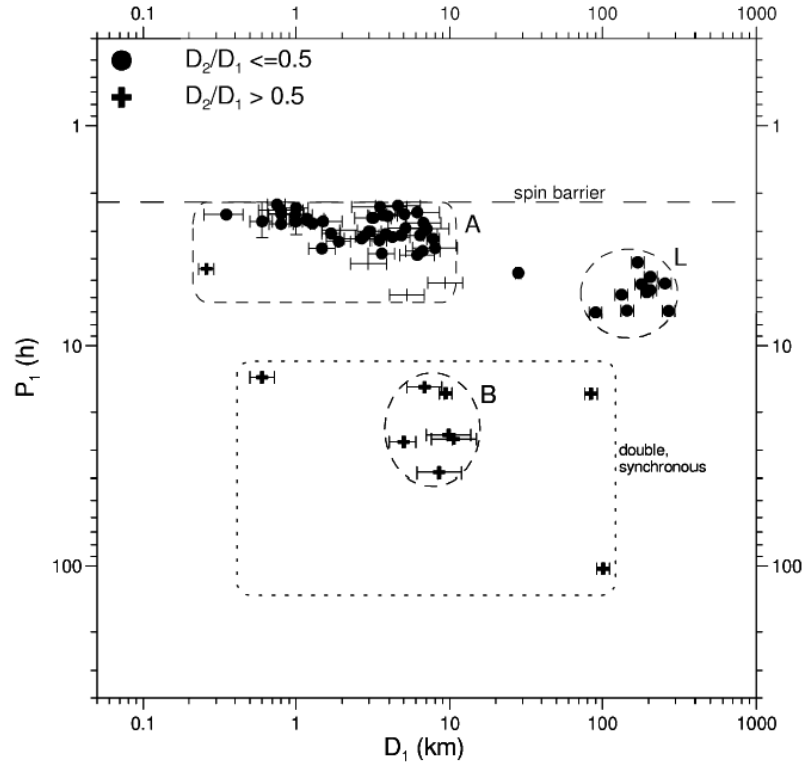
- **Sistemi Asincroni:** Sono caratterizzati da un'assenza di risonanza spin-orbita. Il periodo di rotazione del secondario non equivale al periodo orbitale mutuo [Margot et al., 2015]. Le osservazioni indicano che circa il 25% dei sistemi rilevati via radar possiede satelliti asincroni, i quali tipicamente ruotano più velocemente del loro moto orbitale medio, indicando uno stato dinamico relativamente giovane in cui le forze di dissipazione mareale non hanno ancora completato il processo di sincronizzazione mareale [Margot et al., 2015].
- **Sistemi Sincroni:** Il satellite secondario si trova in uno stato di rotazione sincrona, con un periodo di spin in risonanza 1 : 1 rispetto al periodo orbitale mutuo [Margot et al., 2015]. Si tratta di una configurazione energeticamente rilassata in cui il satellite rivolge sempre la medesima faccia verso il primario. La maggior parte dei sistemi binari scoperti tra i NEAs appartiene a questa configurazione stabile [Margot et al., 2015].
- **Sistemi Doppiaemente Sincroni:** Rappresentano lo stato terminale dell'evoluzione mareale di un sistema. Sia il periodo di rotazione del primario sia quello del secondario sono sincronizzati con il periodo orbitale mutuo [Margot et al., 2015].

### 2.1.2 Sottogruppi Morfologici e Dinamici

Sulla base della classificazione originariamente proposta da Pravec and Harris [2007] e dei successivi aggiornamenti analizzati da Walsh and Jacobson [2015], la popolazione dei sistemi binari del SS interno è suddivisa in sottopopolazioni distinte. Come illustrato in Figura 2.1, tale classificazione si fonda su tre parametri osservabili: il diametro del primario  $D_1$ , il rapporto dei diametri  $D_2/D_1$  e il semiasse maggiore dell'orbita mutua  $a$ , espresso in unità di raggio del primario  $R_p$  [Walsh and Jacobson, 2015]:

- **Gruppo L (Grandi Asteroidi):** Comprende primari massicci ( $D_1 \gtrsim 20$  km) accompagnati da satelliti proporzionalmente molto piccoli, caratterizzati da un rapporto dimensionale  $D_2/D_1 \lesssim 0.2$ . Data la scala dimensionale dei primari, per i quali l'effetto YORP risulta inefficace, la formazione di tali satelliti viene solitamente attribuita a processi di frammentazione collisionale e alla cattura gravitazionale di ejecta.

- **Gruppo A (Sistemi Piccoli e Stretti):** Raccoglie la quasi totalità dei sistemi binari aventi un corpo primario di ridotte dimensioni ( $D_1 < 20$  km). Questi sistemi risiedono prevalentemente tra i NEAs e la MAB interna. Il corpo secondario presenta dimensioni modeste ( $0.1 \lesssim D_2/D_1 \lesssim 0.6$ ) e descrive un'orbita stretta attorno al primario, con semiasse maggiore  $a < 9 R_p$ . I primari di questo gruppo sono tipicamente strutturati come aggregati gravitazionali in rapida rotazione, con periodi compresi tra 2.2 e 4.4 h. Come visibile in Figura 2.1, essi si addensano in prossimità del limite critico di disgregazione rotazionale (*spin-barrier*), dinamica discussa in dettaglio nella Sottosezione 1.2.3. Circa il 66% di questi sistemi ospita satelliti che hanno già raggiunto la rotazione sincrona.
- **Gruppo B (Sistemi Doppi in orbite strette):** Costituito da piccoli asteroidi ( $D_1 \lesssim 20$  km) formati da due componenti di dimensioni quasi identiche ( $D_2/D_1 \gtrsim 0.7$ ). Essi orbitano a distanze serrate ( $a \lesssim 9 R_p$ ) e risiedono stabilmente in uno stato dinamico doppiamente sincrono, con periodi orbitali tipicamente estesi, compresi tra 13.9 h e 49.1 h.
- **Gruppo W (Sistemi Piccoli e Larghi):** Caratterizzato da corpi primari di piccole dimensioni ( $D_1 < 20$  km) accompagnati da satelliti situati su orbite marcatamente ampie, con separazioni  $a > 9 R_p$  che possono estendersi in modo anomalo fino a  $116 R_p$ . In questi sistemi a basso accoppiamento mareale, il satellite manifesta sovente stati rotazionali asincroni.



**Figura 2.1:** Periodo di rotazione del corpo primario in funzione del suo diametro. Il grafico illustra la suddivisione morfologica dei sistemi binari. Il Gruppo A (sistemi piccoli e stretti) si addensa in prossimità della curva teorica del limite critico di disgregazione

rotazionale (*spin-barrier*). Il Gruppo B raccoglie i sistemi con componenti di dimensioni simili in orbite strette. Spiccano in posizioni isolate tre sistemi doppiamente sincroni peculiari: il piccolo asteroide (69230) Hermes sulla sinistra, e i grandi asteroidi (90) Antiope e (617) Patroclus sulla destra, i quali presentano dimensioni compatibili con il Gruppo L ma caratteristiche dinamiche affini al Gruppo B. Immagine adattata da Margot et al. [2015].

La classificazione individua, inoltre, alcuni sistemi peculiari definiti *outlier*, che deviano dai parametri standard come mostrato in Figura 2.1. Due eccezioni di particolare interesse sono costituite da (90) Antiope e (617) Patroclus: date le loro considerevoli dimensioni ( $D_1 \sim 87$  e  $101$  km rispettivamente), rientrerebbero teoricamente nel Gruppo L; tuttavia, esibiscono componenti di taglia pressoché identica, caratteristica morfologica esclusiva del Gruppo B [Walsh and Jacobson, 2015]. Un ulteriore caso anomalo è rappresentato dal NEA (69230) Hermes, un sistema doppiamente sincrono di dimensioni ridotte che, a causa di un periodo orbitale insolitamente rapido, si colloca in posizione isolata nel diagramma morfologico. Infine, (4951) Iwamoto possiede componenti di dimensioni comparabili, ma si differenzia per un'orbita mutua eccezionalmente ampia ( $a \sim 17 R_p$ ), caratteristica propria del Gruppo W [Walsh and Jacobson, 2015].

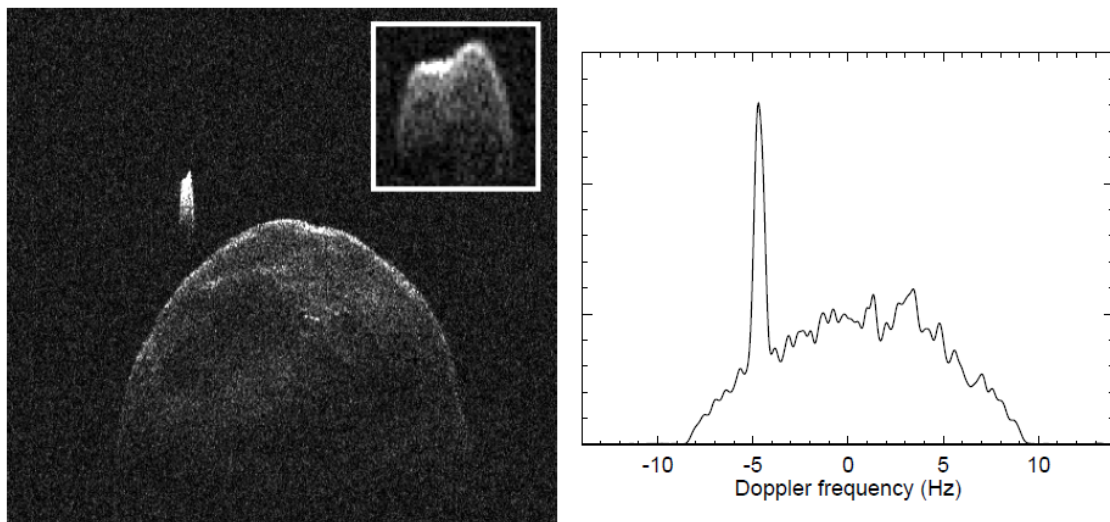
### 2.1.3 Statistiche Osservative

L'integrazione di dati fotometrici e indagini radar ha rivelato che la presenza di satelliti è ubiquitaria. Sistemi multipli sono stati individuati in quasi tutti i raggruppamenti dinamici del SS: tra i NEAs, gli asteroidi areosecanti (*Mars-crossers*) e in tutta la MAB, spaziando dagli oggetti non raggruppati ai membri delle grandi famiglie collisionali, fino ad estendersi ai Troiani di Giove e agli oggetti transnettuniani [Margot et al., 2015].

Dal punto di vista statistico, circa un sesto (il  $\sim 16\%$ ) di tutti i NEAs con diametro superiore a  $200$  m risulta far parte di un sistema multiplo [Margot et al., 2015]. Indagini fotometriche rigorose confermano questa abbondanza, stimando che la frazione effettiva di sistemi binari tra i NEAs di diametro superiore a  $300$  m si attesti al  $15 \pm 4\%$  [Margot et al., 2015].

La rilevazione di queste configurazioni si avvale principalmente di due tecniche osservative complementari, la cui efficacia operativa dipende in modo critico dalla distanza del target dalla Terra [Margot et al., 2015]. Da un lato, l'analisi fotometrica delle curve di luce rappresenta il metodo principale per gli oggetti più distanti, come gli asteroidi della MAB, permettendo di rivelare le mutue occultazioni ed eclissi del sistema [Margot et al., 2015]. Per la popolazione dei NEAs, invece, le distanze ravvicinate durante i *flyby* terrestri (tipicamente a distanze inferiori a  $0.2$  au) consentono l'impiego diretto delle indagini radar Delay-Doppler [Margot et al., 2015]. Questa tecnica risulta fondamentale poiché permette di risolvere le due componenti del sistema binario sia spazialmente sia in frequenza [Margot et al., 2015]. Un esempio delle potenzialità di questa tecnica è fornito dalle osservazioni del NEA (285263) 1998 QE2, mostrato in Figura 2.2. Nelle eco radar di questi sistemi asimmetrici, l'analisi dello spettro consente di discriminare nettamente i due corpi: il corpo primario,

tipicamente caratterizzato da maggiori dimensioni e da una rapida rotazione, produce un eco ampiamente disperso, definita a banda larga (*broad-band*); al contrario, il secondario, trovandosi tipicamente in uno stato di rotazione sincrona molto più lento, genera un picco netto e concentrato, definibile come eco a banda stretta (*narrow-band*) [Margot et al., 2015]. L'analisi combinata del ritardo del segnale (strettamente correlato alla distanza fisica del target dall'osservatore) e dello spostamento Doppler (indotto dalla cinematica orbitale e rotazionale) permette di separare visivamente i due corpi, stimarne il corretto rapporto dimensionale e, nel caso di indagini ad alta risoluzione, ricostruirne accuratamente la morfologia tridimensionale [Margot et al., 2015].



**Figura 2.2:** Osservazione radar Delay-Doppler di (285263) 1998 QE<sub>2</sub>, un *Near-Earth Asteroid* (NEA) binario. Nel pannello di destra è riportato lo spettro in frequenza, dove l'eco a banda stretta (*narrow-band*) del satellite si distingue chiaramente dall'eco a banda larga (*broad-band*) del primario. Nel pannello di sinistra, l'immagine radar separa visivamente le due componenti: l'asse verticale rappresenta il ritardo del segnale (correlato alla distanza dall'osservatore), mentre l'asse orizzontale indica la frequenza Doppler. Immagine adattata da Margot et al. [2015].

## 2.2 Meccanismi di Formazione

La comprensione della genesi dei sistemi binari è fondamentale per tracciarne la storia evolutiva e interpretarne le proprietà fisiche attuali. Storicamente, l'origine di tali configurazioni veniva attribuita a processi quali la cattura gravitazionale a tre corpi, l'azione delle forze di marea durante i passaggi ravvicinati con i pianeti terrestri o l'aggregazione di detriti generati da impatti sub-catastrofici [Margot et al., 2015; Walsh and Jacobson, 2015]. Tuttavia, l'analisi statistica condotta sulla popolazione dei piccoli corpi ha mostrato proprietà incompatibili con queste dinamiche classiche.

In primo luogo, l'ipotesi della distruzione mareale planetaria risulta applicabile esclusivamente alla popolazione dei NEAs; tuttavia, la scoperta di numerosi sistemi

binari nella MAB, dove l'assenza di pianeti massicci esclude tale meccanismo, ne ha confutato l'universalità [Walsh and Jacobson, 2015]. In secondo luogo, la cattura gravitazionale involontaria è un evento estremamente inefficiente per corpi di piccola massa. Infine, quasi la totalità dei piccoli sistemi presenta primari in rapida rotazione e un contenuto di momento angolare prossimo al limite critico di stabilità [Margot et al., 2015]. Come introdotto nella Sezione 1.3.3, tali caratteristiche identificano nella fissione rotazionale indotta dall'effetto YORP il meccanismo di formazione più accreditato per i sistemi di piccole dimensioni [Margot et al., 2015; Walsh and Jacobson, 2015].

### 2.2.1 Dinamica della Fissione e Accrescimento del Satelliti

Il processo di formazione inizia quando l'accelerazione rotazionale impressa dall'effetto YORP (descritto nella Sezione 1.3.2) spinge un corpo di tipo *rubble-pile* verso il proprio limite di stabilità meccanica. Come analizzato nella Sezione 1.2.4, questo incremento di spin induce inizialmente una migrazione di regolite e frammenti verso le basse latitudini, originando la morfologia *top-shape* e il rigonfiamento equatoriale [Margot et al., 2015; Walsh and Jacobson, 2015].

Quando la velocità angolare del primario supera il limite critico  $\omega_d$  definito nella Sezione 1.2.3, l'accelerazione centrifuga all'equatore eccede l'attrazione gravitazionale locale. In questa fase, il sistema entra in un regime di espulsione di massa (*mass shedding*): singoli componenti o piccoli aggregati di materiale granulare si distaccano dalla superficie equatoriale [Walsh and Jacobson, 2015]. Non trattandosi di un corpo monolitico, la perdita di massa non avviene tramite una frattura catastrofica istantanea, bensì attraverso un rilascio graduale e continuo di frammenti [Walsh and Jacobson, 2015].

Una volta espulsi, questi detriti non sfuggono immediatamente dal sistema, ma entrano in un'orbita caotica attorno al corpo principale, formando un disco prograde di materiale granulare in prossimità del piano equatoriale del primario. All'interno di questo disco, le frequenti collisioni mutue tra i frammenti dissipano l'energia cinetica in eccesso, portando alla stabilizzazione delle orbite [Walsh and Jacobson, 2015]. In un processo analogo all'accrescimento planetario, ma su scala ridotta, i detriti iniziano a riaccumularsi gravitazionalmente all'interno del disco. Se il materiale espulso è sufficiente e le perturbazioni esterne sono limitate, questa massa si organizza in un corpo secondario legato, completando la transizione da un asteroide singolo con disco di detriti a un sistema binario propriamente detto [Walsh and Jacobson, 2015].

### 2.2.2 Dinamica del Processo e Condizioni Energetiche

La fisica della fissione rotazionale è governata dalla conservazione dell'energia e del momento angolare tra lo stato di pre-fissione e quello di post-fissione. Un modello analitico approssima le due future componenti come due sfere a riposo l'una sull'altra;

in tale configurazione, la velocità angolare limite di fissione  $\omega_q$  dipende dal rapporto di massa  $q = M_s/M_p$  secondo la relazione [Margot et al., 2015]:

$$\omega_q = \omega_d \sqrt{\frac{1+q}{(1+q^{1/3})^3}} \quad (2.1)$$

dove  $\omega_d$  è il limite critico di disgregazione del corpo primario. Da questa relazione emerge che maggiore è il rapporto di massa  $q$  dei due membri, minore è la velocità di rotazione necessaria per innescare la separazione spaziale [Margot et al., 2015]. Questa ripartizione definisce l'energia libera  $E_f$  del sistema neo-formato, ovvero l'energia totale accessibile ai serbatoi rotazionali e orbitali (escludendo l'energia di legame interna) [Margot et al., 2015]. Per due componenti sferici, l'energia libera al momento della fissione è espressa come [Margot et al., 2015]:

$$E_f = \frac{2\pi\rho\omega_d^2 R_p^5}{15} f(q) \quad (2.2)$$

dove  $R_p$  è il raggio del corpo primario e  $f(q)$  è una funzione algebrica monotonamente decrescente nell'intervallo  $0 < q \leq 1$ .

### 2.2.3 Biforcazione Evolutiva: Rapporto di Massa Critico

Il modello basato sull'energia libera  $E_f$  prevede una netta differenziazione nei destini evolutivi dei sistemi. La funzione  $f(q)$  incrocia lo zero per un valore critico del rapporto di massa pari a  $q \approx 0.204$  [Margot et al., 2015]. Questo limite costituisce una soglia di transizione che determina la stabilità gravitazionale del sistema appena formato [Margot et al., 2015]:

- **Sistemi ad alto rapporto di massa ( $q > 0.2$ ):** Caratterizzati da  $E_f < 0$ , questi sistemi sono intrinsecamente legati (*bound systems*). Essi iniziano un'evoluzione stabile guidata dalle forze di marea e dall'effetto *Binary YORP* (BYORP), il cui meccanismo è approfondito nella Sezione 2.3.1, che portano nel tempo alla sincronizzazione mareale descritta nella Sezione 2.1.
- **Sistemi a basso rapporto di massa ( $q < 0.2$ ):** Caratterizzati da  $E_f > 0$ , questi sistemi risultano gravitazionalmente non legati (*unbound systems*). Possedendo energia sufficiente a superare la reciproca attrazione, i due corpi non si stabilizzano immediatamente, ma entrano in una fase di forte interazione caotica esplorando l'intero spazio delle fasi orbitali.

Questa evoluzione caotica dei sistemi a basso rapporto di massa può sfociare in molteplici configurazioni. La maggior parte di essi trova una traiettoria di fuga permanente, portando alla formazione degli *asteroid pairs* la cui dinamica di allontanamento avviene a velocità estremamente basse, tipicamente nell'ordine di 1 m/s [Margot et al., 2015]. A conferma della validità del modello, le osservazioni fotometriche condotte su decine di *asteroid pairs* hanno evidenziato l'assenza di coppie con

un rapporto di massa  $q > 0.2$ , coerentemente con il vincolo per cui energie libere negative impediscono la fuga definitiva del secondario [Margot et al., 2015].

Durante lo stato dinamico caotico che precede l'eventuale separazione, le interazioni gravitazionali sono talmente intense che il secondario può a sua volta subire un evento di fissione rotazionale. In questo caso, l'incremento di momento angolare non è indotto direttamente dall'effetto YORP, bensì dal forte accoppiamento spin-orbita [Margot et al., 2015]. La conseguente perdita di massa da parte del secondario svolge un ruolo stabilizzatore cruciale per le masse rimanenti: il materiale espulso può ricadere sul primario (contribuendo all'innalzamento del rigonfiamento equatoriale), disperdersi nello spazio interplanetario sottraendo energia cinetica, oppure riaccumularsi in un'orbita indipendente, dando così origine a un sistema triplo [Margot et al., 2015].

Infine, nel caso in cui il sistema riesca a sopravvivere a questa complessa fase caotica senza disgregarsi, esso si stabilizza sotto forma di sistema binario. Pur mantenendo un'energia libera intrinsecamente positiva (e rimanendo pertanto vulnerabile a perturbazioni esterne a lungo termine), il secondario intraprende il lento processo di dissipazione mareale che lo condurrà infine alla sincronizzazione rotazionale [Margot et al., 2015].

## 2.3 Evoluzione Dinamica del Sistema

In seguito alla fase di formazione e alla stabilizzazione del satellite, i sistemi binari intraprendono una complessa evoluzione dinamica governata da una pluralità di forze perturbative. Mentre i sistemi massicci appartenenti al Gruppo L risultano sostanzialmente imperturbati da gran parte di questi meccanismi a causa della loro inerzia gravitazionale, la vasta popolazione dei piccoli sistemi binari subisce alterazioni orbitali significative su scale temporali astronomiche [Walsh and Jacobson, 2015]. Le dimensioni ridotte dei componenti e le orbite mutualmente strette — tipicamente collocate a circa  $2.5 R_p$ , in prossimità del limite di Roche — rendono questi sistemi estremamente sensibili sia alle interazioni mareali sia, in modo predominante, alle forze radiative [Walsh and Jacobson, 2015].

I due meccanismi fondamentali che governano l'evoluzione a lungo termine dei parametri orbitali sono l'effetto BYORP e le maree gravitazionali di corpo solido. Come analizzato nella Sezione 1.3 per i corpi singoli, le forze non gravitazionali dominano la dinamica dei piccoli oggetti; nei sistemi doppi, queste forze si accoppiano con la meccanica orbitale, determinando il destino finale del sistema attraverso configurazioni di equilibrio o processi di disgregazione [Walsh and Jacobson, 2015].

### 2.3.1 L'Effetto Radiativo BYORP

La teoria dell'effetto BYORP costituisce un'estensione diretta dell'effetto YORP applicata alla dinamica orbitale di un sistema binario. Mentre lo YORP classico modifica lo stato di rotazione di un singolo corpo, come descritto nella Sezione 1.3.2, l'effetto BYORP agisce alterando il semiasse maggiore e l'eccentricità dell'orbita

mutua. Tale fenomeno si manifesta quando il satellite si trova in una condizione di risonanza spin-orbita, tipicamente nella sincronizzazione mareale 1 : 1 discussa nella Sezione 2.1 [Walsh and Jacobson, 2015].

Poiché il secondario in rotazione sincrona rivolge sempre la medesima faccia al primario, la spinta termica asimmetrica sulla sua superficie non ne altera lo spin, ma genera un momento torcente netto rispetto al baricentro del sistema. Sotto l'ipotesi di rotazione sincrona, l'evoluzione del semiasse maggiore  $a$  e dell'eccentricità  $e$  è descritta dal sistema di equazioni differenziali [Walsh and Jacobson, 2015]:

$$\frac{da}{dt} = \frac{3H_{\odot}B_s a^{3/2} \sqrt{1+q}}{2\pi\rho\omega_d R_p^2 q^{1/3}} \quad (2.3)$$

$$\frac{de}{dt} = -\frac{3H_{\odot}B_s a^{1/2} e \sqrt{1+q}}{8\pi\rho\omega_d R_p^2 q^{1/3}} = -\frac{e}{4a} \frac{da}{dt}. \quad (2.4)$$

In queste espressioni,  $q$  è il rapporto di massa tra secondario e primario,  $\rho$  è la densità (assunta costante e identica per i due corpi),  $\omega_d$  è il tasso critico di disgregazione rotazionale,  $R_p$  rappresenta il raggio del corpo primario e  $B_s$  è il coefficiente BYORP adimensionale del secondario. Il fattore  $H_{\odot}$  è legato all'orbita eliocentrica ed è definito come  $H_{\odot} = F_{\odot}/(a_{\odot}^2 \sqrt{1-e_{\odot}^2})$ , con  $F_{\odot}$  che rappresenta la costante di radiazione solare, mentre  $a_{\odot}$  ed  $e_{\odot}$  sono rispettivamente il semiasse maggiore e l'eccentricità dell'orbita eliocentrica del sistema.

Il coefficiente  $B_s$  quantifica l'asimmetria della forma del secondario relativa alla sua orientazione e può assumere valori sia positivi sia negativi [Walsh and Jacobson, 2015]. Un coefficiente positivo induce un'espansione del semiasse maggiore (e un conseguente smorzamento dell'eccentricità), che può teoricamente proseguire come processo di *runaway* fino al raggio di Hill, causando l'interazione a tre corpi con il Sole e la distruzione del sistema con la conseguente formazione di una coppia di asteroidi [Walsh and Jacobson, 2015]. Tuttavia, modelli dinamici più complessi dimostrano che l'espansione BYORP può essere interrotta da un'invarianza adiabatica tra il semiasse maggiore mutuo e lo stato di librazione del secondario. All'espandersi dell'orbita, la librazione può crescere fino a desincronizzare il satellite. Questo meccanismo di interruzione lascia il secondario confinato in un'orbita molto larga, spiegando l'origine dei sistemi osservati appartenenti al Gruppo W [Walsh and Jacobson, 2015].

### 2.3.2 Interazioni di Marea ed Equilibrio Dinamico

In opposizione o in sinergia alle forze radiative, l'evoluzione dei sistemi binari è profondamente influenzata dalle interazioni di marea. Le maree di corpo solido nei piccoli asteroidi sono il risultato del ritardo con cui la distribuzione di massa dell'aggregato insegue una figura di equilibrio in costante cambiamento. Tale figura è determinata dinamicamente dallo stato di rotazione dell'asteroide e dai potenziali gravitazionali combinati di entrambi i membri del sistema [Walsh and Jacobson, 2015].

Poiché il rilassamento verso questa figura di equilibrio è un processo dissipativo, l'energia meccanica viene persa sotto forma di calore e, conseguentemente, sottratta allo stato di rotazione del corpo [Walsh and Jacobson, 2015]. La differenza di potenziale tra la figura reale in ritardo dell'asteroide e la figura di equilibrio teorico definisce il cosiddetto rigonfiamento di marea (*tidal bulge*). Questo disallineamento genera un momento torcente secolare sull'orbita mutua, la cui funzione è garantire la rigorosa conservazione del momento angolare totale all'interno del sistema binario [Walsh and Jacobson, 2015]. A differenza delle maree lunari sulla Terra, in cui la maggior parte dell'energia viene dissipata all'interfaccia tra l'oceano e il fondale marino o nell'oceano profondo, le maree mutue tra gli asteroidi non dissipano energia lungo strati fluidi, bensì attraverso l'intero volume del corpo solido, conformemente alla loro natura strutturale [Walsh and Jacobson, 2015].

Dal punto di vista analitico, il momento torcente di marea  $\Gamma_C$  esercitato su un asteroide sferico di raggio  $R$ , indotto da un corpo perturbatore con rapporto di massa  $q$ , è espresso dalla relazione:

$$\Gamma_C = \frac{2\pi k_2 \omega_d^2 \rho R^5 q^2}{Q a^6} \left( \frac{\omega - n}{|\omega - n|} \right) \quad (2.5)$$

dove il semiasse maggiore mutuo  $a$  è adimensionale in quanto misurato in unità di raggi dell'asteroide  $R$ . Il termine frazionario  $\frac{\omega - n}{|\omega - n|}$  indica la direzione del momento torcente, determinata dalla differenza tra la velocità di rotazione dell'asteroide  $\omega$  e il moto medio orbitale  $n$ . Il parametro  $k_2$  rappresenta il numero di Love di secondo ordine del potenziale, il quale quantifica il potenziale gravitazionale aggiuntivo prodotto dal rigonfiamento di marea rispetto al potenziale deformante; in altri termini, definisce la misura in cui la struttura risponde alla deformazione. Infine, il termine  $Q$  rappresenta il fattore di dissipazione specifica del materiale [Walsh and Jacobson, 2015].

Nella configurazione più comune dei piccoli sistemi binari, definita singolarmente sincrona, le interazioni di marea agiscono unicamente per espandere il semiasse maggiore mutuo e per smorzare l'eccentricità orbitale [Walsh and Jacobson, 2015].

### 2.3.3 Equilibrio Termo-Gravitazionale a Lungo Termine

La sopravvivenza a lungo termine dei piccoli sistemi binari, dipende criticamente dall'interazione accoppiata tra le forze di marea e l'effetto BYORP. Mentre le maree di corpo solido agiscono costantemente per espandere il semiasse maggiore e smorzare l'eccentricità, l'effetto radiativo può sia espandere sia contrarre l'orbita mutua, a seconda della forma e dell'orientazione del secondario [Walsh and Jacobson, 2015].

Il destino evolutivo del sistema è pertanto dettato dalla sinergia o dalla competizione tra questi due momenti torcenti [Walsh and Jacobson, 2015]:

- **Espansione sinergica** ( $B_s > 0$ ): Qualora il coefficiente BYORP forzi un'espansione orbitale, entrambi i processi lavorano in sinergia. Il semiasse maggiore

cresce e l'eccentricità si riduce ulteriormente. Come descritto in dettaglio nella Sottosezione 2.3.1, questo meccanismo può condurre alla disgregazione del sistema per interazione a tre corpi al raggiungimento del raggio di Hill, oppure, a causa di un'invarianza adiabatica, può desincronizzare il satellite confinandolo su orbite ampie, spiegando l'origine dei sistemi del Gruppo W.

- **Equilibrio dinamico ( $B_s < 0$ ):** Se l'asimmetria termica del secondario genera un coefficiente negativo, l'effetto BYORP agisce in direzione opposta, tendendo a far collassare l'orbita e opponendosi all'allontanamento mareale.

In questo secondo scenario si instaura una forte competizione dinamica fortemente dipendente dalla distanza orbitale. I due effetti guidano il semiasse maggiore verso una precisa posizione di equilibrio stabile in cui i rispettivi momenti torcenti si annullano perfettamente [Walsh and Jacobson, 2015].

L'esistenza di questo equilibrio termo-gravitazionale rappresenta la chiave teorica per risolvere il paradosso della breve vita media dei sistemi binari. Prevenendo la rapida distruzione o separazione delle componenti, questo bilanciamento giustifica l'elevata abbondanza osservata di sistemi a orbita stretta, senza dover postulare tassi di formazione irrealisticamente elevati per compensare le altrimenti rapide tempistiche di disgregazione imposte dall'effetto BYORP [Walsh and Jacobson, 2015]. Inoltre, l'ipotesi che la popolazione dei binari singolarmente sincroni occupi attualmente tale stato di equilibrio offre la straordinaria opportunità di dedurre le proprietà interne e meccaniche degli asteroidi basandosi esclusivamente su misurazioni ottenute tramite *remote sensing* [Walsh and Jacobson, 2015].

### 2.3.4 Perturbazioni Esterne

Oltre alle interazioni termo-gravitazionali interne, le orbite dei sistemi binari possono subire alterazioni indotte da agenti esterni. L'impatto di tali meccanismi dipende fortemente dalla configurazione orbitale del sistema e dalla sua posizione nel SS [Walsh and Jacobson, 2015].

Per la maggior parte dei sistemi, il secondario orbita troppo vicino al primario per poter risentire di simili risonanze perturbative [Walsh and Jacobson, 2015]. Tuttavia, per i sistemi caratterizzati da orbite mutue più ampie e distanti (come quelli appartenenti al Gruppo W), subentra l'effetto Kozai-Lidov. Questo meccanismo induce forti escursioni nell'eccentricità e nell'inclinazione orbitale del satellite. Tali alterazioni possono portare alla disgregazione del sistema oppure guidare le due componenti verso una collisione diretta, portando alla potenziale formazione di sistemi binari a contatto (*contact-binaries*) [Walsh and Jacobson, 2015].

Un'ulteriore dinamica perturbativa è strettamente legata alla popolazione di appartenenza dell'asteroide. Mentre i sistemi binari situati nella MAB non subiscono interazioni planetarie, i sistemi appartenenti alla popolazione dei NEAs sono soggetti a incontri ravvicinati con i pianeti terrestri [Walsh and Jacobson, 2015]. Quando un NEA binario si avvicina sufficientemente a un pianeta, le intense forze gravitazionali in gioco possono alterare radicalmente l'orbita mutua del sistema o, nei casi più estremi, provocarne la completa distruzione [Walsh and Jacobson, 2015].



## Capitolo 3

# La Missione DART

La missione DART della NASA rappresenta il primo esperimento a scala reale di difesa planetaria, finalizzato a dimostrare la capacità di alterare la traiettoria di un asteroide potenzialmente pericoloso [Daly et al., 2023; Thomas et al., 2023]. Sebbene la comunità scientifica abbia esplorato molteplici strategie di mitigazione nel corso degli anni, differenziate principalmente per i tempi di applicazione e per il profilo di spinta impartito al bersaglio [Thiry and Vasile, 2017; Bombardelli et al., 2013; Howley et al., 2014; Barbee et al., 2026], la tecnica dell’impatto cinetico risulta essere l’unica soluzione di immediata fattibilità nel breve termine [Daly et al., 2023; Barbee et al., 2026; Thiry and Vasile, 2017]

Il sistema binario (65803) Didymos rappresenta il laboratorio ideale per questa dimostrazione. L’intercettazione del satellite Dimorphos permette di quantificare l’alterazione del periodo orbitale del sistema in tempi ristretti e con elevata precisione tramite indagini fotometriche e radar da terra [Thomas et al., 2023]. L’efficacia della deviazione non è determinata esclusivamente dalla massa e dalla velocità della sonda intercettatrice, ma dipende criticamente dall’efficienza del trasferimento della quantità di moto. Quest’ultima è una variabile complessa, strettamente governata dalla geologia, dalla porosità e dalla coesione interna del corpo colpito, nonché dalla successiva dinamica di espulsione del materiale [Raducan et al., 2024; Barbee et al., 2026]. La validazione di questa architettura difensiva si fonda, di conseguenza, sulla comprensione delle dinamiche collisionali in regime di microgravità [Deshapriya et al., 2023; Chabot et al., 2024].

### 3.1 Il Sistema Didymos-Dimorphos (Pre-Impatto)

Il sistema binario *near-Earth* (65803) Didymos è stato selezionato in virtù della sua elevata accessibilità orbitale, caratterizzata da un basso  $\Delta v$  di trasferimento, e per le dimensioni del suo corpo secondario, rientranti nel range di interesse primario per i futuri scenari operativi di mitigazione [Thomas et al., 2023]. Al fine di definire con esattezza le condizioni iniziali prima dell’evento cinetico, estese campagne osservative terrestri hanno permesso di tracciare un accurato quadro fisico e dinamico del sistema, riassunto nella Tabella 3.1.

**Tabella 3.1:** Proprietà fisiche e cinematiche dell’impatto della sonda DART e del sistema binario Didymos-Dimorphos. Tabella adattata da Daly et al. [2023].

| Proprietà                                               | Valore                                                                                     |
|---------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| Istante dell’impatto                                    | 26 settembre 2022 alle 23:14:24.183 $\pm$ 0.004 UTC                                        |
| Velocità di impatto (km/s)                              | 6.1449 $\pm$ 0.0003                                                                        |
| Angolo di impatto (gradi)                               | 73 $\pm$ 7 rispetto al piano orizzontale,<br>17 $\pm$ 7 rispetto alla normale superficiale |
| Coordinate del sito d’impatto (latitudine, longitudine) | 8.84 $\pm$ 0.45° S, 264.30 $\pm$ 0.47° E                                                   |
| Distanza del sito d’impatto dal centro di figura (m)    | 25 $\pm$ 1                                                                                 |
| Massa della sonda al momento dell’impatto (kg)          | 579.4 $\pm$ 0.7                                                                            |
| Energia cinetica dell’impatto (GJ)                      | 10.94 $\pm$ 0.01                                                                           |
| Estensioni assiali di Dimorphos (m)                     | X: 177 $\pm$ 2                                                                             |
|                                                         | Y: 174 $\pm$ 4                                                                             |
|                                                         | Z: 116 $\pm$ 2                                                                             |
| Estensioni assiali di Didymos (m)                       | X: 849 $\pm$ 15                                                                            |
|                                                         | Y: 851 $\pm$ 15                                                                            |
|                                                         | Z: 620 $\pm$ 15                                                                            |
| Diametro volumetrico equivalente di Dimorphos (m)*      | 151 $\pm$ 5                                                                                |
| Massa del sistema Didymos (kg)                          | (5.6 $\pm$ 0.5) $\times 10^{11}$                                                           |
| Densità apparente del sistema (kg/m <sup>3</sup> )      | 2400 $\pm$ 300                                                                             |

\*Calcolato dai volumi dei modelli di forma, non dai volumi degli ellissoidi triassiali con le estensioni sopra riportate.

### 3.1.1 Proprietà fisiche di (65803) Didymos (Primario)

Il corpo principale del sistema, (65803) Didymos, è un asteroide la cui superficie presenta un’età stimata di circa 12.5 Myr, dedotta dall’analisi della distribuzione dimensionale dei crateri [Chabot et al., 2024]. La sua classificazione tassonomica è stata oggetto di revisione nel corso del tempo: inizialmente catalogato come asteroide di tipo Xk sulla base di osservazioni spettroscopiche nel visibile [Binzel et al., 2004], analisi successive nel vicino infrarosso hanno invece rivelato una marcata affinità spettrale con le condriti ordinarie di tipo L e LL [Dunn et al., 2013], collocandolo quindi all’interno del complesso S. Tali condriti presentano densità dei grani comprese tra  $3520 \pm 10$  kg/m<sup>3</sup> e  $3580 \pm 10$  kg/m<sup>3</sup> [Daly et al., 2023; Polishook et al., 2023]. L’albedo geometrico visibile del sistema è stato stimato a  $0.15 \pm 0.02$  [Daly et al., 2023], con stime indipendenti che riportano valori medi tipici per la classe S pari a circa 0.213 [Lin et al., 2023].

Il diametro volumetrico equivalente di Didymos è di circa 780 m [Chabot et al., 2024; Lin et al., 2023]. La ricostruzione del modello di forma è stata effettuata tramite fotoclinometria stereoscopica, una tecnica topografica ampiamente impiegata per i corpi minori che consiste nel generare modelli digitali tridimensionali del terreno a partire dall’analisi delle variazioni di illuminazione e ombreggiatura in un set di immagini Daly et al. [2023]. L’applicazione di tale metodo ai dati della telecamera DRACO e del CubeSat LICIACube ha rivelato una forma sferoidale

oblata caratterizzata da un marcato rigonfiamento equatoriale, tipica per corpi binari di queste dimensioni [Polishook et al., 2023; Chabot et al., 2024]. Le stime delle dimensioni assiali hanno subito affinamenti progressivi: mentre le prime misurazioni riportavano estensioni lungo gli assi X, Y e Z pari rispettivamente a  $849 \pm 15$  m,  $851 \pm 15$  m e  $620 \pm 15$  m [Daly et al., 2023], i modelli di forma successivi hanno fornito valori leggermente inferiori, attestandosi su 819 m, 801 m e 607 m [Chabot et al., 2024].

Didymos è caratterizzato da un periodo di rotazione estremamente rapido, pari a  $2.260 \pm 0.001$  h [Chabot et al., 2024; Thomas et al., 2023]. Questa velocità di rotazione colloca l'asteroide in prossimità del limite critico  $\omega_d$ , rendendo le regioni equatoriali altamente instabili e soggette a smottamenti [Lin et al., 2023]. Per preservare la stabilità strutturale contrastando le forze centrifughe, è necessario che il primario possieda una coesione interna dell'ordine di decine di Pascal, garantita verosimilmente da forze di van der Waals agenti tra i grani di regolite o dalla presenza di un nucleo interno coerente [Raducan et al., 2024].

### 3.1.2 Proprietà stimate di Dimorphos (Secondario)

Il corpo secondario, Dimorphos, possiede un diametro volumetrico equivalente stimato di  $151 \pm 5$  m [Daly et al., 2023; Chabot et al., 2024]. A causa delle sue dimensioni ridotte, Dimorphos contribuiva per solo il 4% – 5% della luminosità totale del sistema pre-impatto, impedendo il rilevamento diretto di una sua curva di luce rotazionale da terra [Thomas et al., 2023; Polishook et al., 2023]. Le immagini ad alta risoluzione acquisite durante la fase di avvicinamento hanno permesso di definirne le estensioni assiali a  $177 \pm 2$  m,  $174 \pm 4$  m e  $116 \pm 2$  m [Daly et al., 2023], con rapporti assiali stimati in  $a_2/c_2 = 1.53$  e  $b_2/c_2 = 1.50$  [Thomas et al., 2023]. Prima dell'impatto, il rapporto equatoriale tra l'asse maggiore e intermedio ( $a/b$ ) era pari a  $1.02 \pm 0.02$  [Raducan et al., 2024].

Morfologicamente, Dimorphos appare come un aggregato gravitazionale caratterizzato da una superficie pesantemente cosparsa di massi (*boulder-strewn*), in netta somiglianza con altri piccoli NEA come (162173) Ryugu e (101955) Bennu [Daly et al., 2023; Raducan et al., 2024]. Questa natura frammentata si riflette nelle sue proprietà meccaniche: le simulazioni indicano una resistenza coesiva estremamente debole, inferiore a pochi Pascal [Raducan et al., 2024].

Non essendoci misurazioni dirette, la massa di Dimorphos viene dedotta dalle proprietà orbitali, sfruttando la Terza Legge di Keplero per calcolare la massa complessiva del sistema ( $M_{sys} = 5.6 \pm 0.5 \times 10^{11}$  kg) e assumendo una densità di massa uniforme tra primario e secondario [Daly et al., 2023]. Tali considerazioni portano a stimare una densità apparente (*bulk density*) nominale per Dimorphos di circa  $2400 \pm 300$  kg/m<sup>3</sup> (sebbene misurazioni di sistema più recenti suggeriscano valori fino a  $2790 \pm 140$  kg/m<sup>3</sup> [Chabot et al., 2024]). Assumendo la medesima composizione di tipo L/LL di Didymos, la densità apparente implica una porosità macroscopica globale nell'ordine del 30% – 35% [Daly et al., 2023; Raducan et al., 2024].

L'età superficiale stimata per Dimorphos è estremamente giovane ( $< 0.3$  Myr) [Chabot et al., 2024]. Questa evidenza, combinata con la compatibilità spettrale, l'elevata porosità e la debolezza strutturale, corrobora i modelli di formazione per *mass shedding* rotazionale discussi in dettaglio nella Sezione 2.2.1. In tale scenario, Dimorphos si sarebbe originato per accumulo di materiale espulso dalle regioni equatoriali di Didymos a seguito dell'accelerazione rotazionale indotta dall'effetto YORP [Polishook et al., 2023; Raducan et al., 2024].

### 3.1.3 Parametri orbitali del sistema binario

Il comportamento dinamico del sistema Didymos-Dimorphos è stato definito con estrema precisione nelle epoche antecedenti l'impatto, passaggio fondamentale per isolare la variazione cinematica successiva. I parametri orbitali di *best-fit* pre e post-impatto discussi di seguito sono riepilogati nella Tabella 3.2. Dimorphos orbitava attorno al centro di massa del sistema su una traiettoria quasi-kepleriana con un periodo di rivoluzione pre-impatto di  $11.92148 \pm 0.00013$  h (equivalente a 11 h e 55 min), determinato con concordanza statistica attraverso molteplici approcci basati sull'analisi delle curve di luce e degli eventi di mutua occultazione/eclissi [Thomas et al., 2023; Chabot et al., 2024].

Il semiasse maggiore dell'orbita pre-impatto misurava  $a = 1.206 \pm 0.035$  km [Thomas et al., 2023]. Di conseguenza, il moto medio iniziale del secondario ( $n_0$ ) era quantificabile in  $1.4640214 \pm 0.000054 \times 10^{-4}$  rad/s. La geometria orbitale mostrava una longitudine del polo ( $\lambda$ ) pari a  $313.3^\circ \pm 5.2^\circ$  e una latitudine ( $\beta$ ) di  $-79.3^\circ \pm 1.0^\circ$  [Thomas et al., 2023].

Nei modelli dinamici utilizzati, l'evoluzione del moto medio è stata rappresentata tenendo conto non solo della pura interazione gravitazionale puntiforme, ma anche di derivate lineari secolari ( $\dot{n}$ ) indotte da effetti non gravitazionali a lungo termine, quali l'effetto BYORP e la dissipazione mareale, i cui fondamenti teorici sono discussi nella Sezione 2.3 [Thomas et al., 2023].

**Tabella 3.2:** Parametri orbitali di *best-fit* del sistema binario. Tabella adattata da Thomas et al. [2023].

| Parametro                                          | Stima $\pm$ incertezza a $1\sigma$         |
|----------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| Epoca (UTC)                                        | 26 settembre 2022 23:14:24.183             |
| Longitudine del polo orbitale ( $\lambda$ , gradi) | $313.3 \pm 5.2$                            |
| Latitudine del polo orbitale ( $\beta$ , gradi)    | $-79.3 \pm 1.0$                            |
| Semiasse maggiore pre-impatto ( $a$ , km)          | $1.206 \pm 0.035$                          |
| Periodo orbitale pre-impatto (h)                   | $11.921473 \pm 0.000044$                   |
| Moto medio all'epoca ( $n_0$ , rad/s)              | $(1.4640214 \pm 0.0000054) \times 10^{-4}$ |
| Periodo orbitale post-impatto (h)                  | $11.3712 \pm 0.0055$                       |
| Variazione del periodo orbitale (min)              | $-33.02 \pm 0.33$                          |

Nota: le incertezze formali sono scalate di un fattore 2 per includere gli errori derivanti da sorgenti non modellate.

## 3.2 Il Concetto di Difesa Planetaria e gli Obiettivi di DART

La difesa planetaria si articola su una gerarchia di strategie di mitigazione il cui impiego è dettato dalla magnitudo della minaccia e dal tempo di risposta disponibile [Howley et al., 2014; Bombardelli et al., 2013]. Sebbene l'introduzione di questo capitolo abbia delineato le categorie principali, è necessario analizzare in dettaglio i vantaggi operativi e i parametri fisici che elevano il KI al di sopra delle altre tecniche, giustificando così il motivo per cui è stata concepita la missione DART al fine di testarne l'efficacia sul campo.

### 3.2.1 Analisi Comparativa delle Tecniche di Deflessione

Le metodologie *slow-push* si fondano sull'applicazione di una forza debole e continua. Il GT sfrutta l'interazione gravitazionale mutua, risultando vantaggioso per la sua indipendenza dalle proprietà superficiali dell'asteroide, ma limitato dalla necessità di masse spaziali elevate e complessi sistemi di controllo per l'*hovering* in prossimità del bersaglio [Ballouz et al., 2025; Bombardelli et al., 2013]. Un'evoluzione tecnologica è rappresentata dall'IBS, che utilizza il momento di un flusso di ioni per trasferire quantità di moto senza contatto fisico; tale metodo si rivela superiore al GT per corpi di piccole dimensioni (inferiori ai 400 m), poiché l'entità della deflessione non dipende dalla massa della sonda ma dalle performance del sistema di propulsione ionica [Bombardelli et al., 2013].

Sul fronte delle tecniche impulsive, l'utilizzo di un *Nuclear Explosive Device* (NED) rimane la più efficace in termini energetici, agendo tramite l'ablazione superficiale indotta da raggi X e neutroni [Howley et al., 2014; Barbee et al., 2026]. Tuttavia, il rischio di frammentazione del corpo primario e le implicazioni legali internazionali ne limitano l'applicabilità [Barbee et al., 2026]. Il KI si inserisce in questo quadro come una soluzione intermedia: tecnologicamente più semplice dei sistemi *slow-push* e operativamente più sicura delle opzioni nucleari, essendo stata validata per la prima volta proprio dalla missione DART [Chabot et al., 2024; Thiry and Vasile, 2017; Barbee et al., 2026].

L'efficacia di un pattatore cinetico è descritta dalla variazione di velocità impartita all'asteroide ( $\Delta \vec{V}$ ), espressa dalla relazione:

$$\Delta \vec{V} = \frac{\beta \vec{V}_{\infty} m_{KI}}{m_{asteroide}} \quad (3.1)$$

dove  $\vec{V}_{\infty}$  rappresenta il vettore velocità della sonda rispetto all'asteroide al momento della collisione, mentre  $m_{KI}$  e  $m_{asteroide}$  indicano rispettivamente la massa dell'impattatore (il KI) e la massa del corpo bersaglio [Barbee et al., 2026]. Il termine  $\beta$ , ovvero il fattore di amplificazione della quantità di moto, costituisce invece la principale incognita fisica dell'equazione. Un valore di  $\beta = 1$  descrive un urto puramente anelastico, mentre un valore  $\beta > 1$  indica che la quantità di moto trasferita eccede quella del solo pattatore a causa del momento di rinculo generato dall'espulsione dei detriti

(*ejecta*) [Barbee et al., 2026; Thomas et al., 2023]. La previsione accurata di questo parametro è estremamente complessa, poiché fortemente influenzata dalla struttura interna del bersaglio (omogenea o *rubble-pile*), dalla porosità e dalla presenza di massi superficiali che possono dissipare l'energia dell'impatto in compattazione piuttosto che in espulsione di materiale [Barbee et al., 2026; Raducan et al., 2024].

### 3.2.2 Obiettivi Scientifici e Requisiti di Successo

La missione DART è stata progettata per trasporre i modelli teorici di difesa planetaria in una dimostrazione tecnologica misurabile [Thomas et al., 2023]. Al fine di sancire il successo dell'esperimento, la NASA ha stabilito criteri rigorosi che spaziano dalla navigazione autonoma alla verifica astrometrica post-impatto.

In primo luogo, la missione doveva dimostrare la capacità di intercettare un corpo minore di ridotte dimensioni ( $\sim 150$  m) ad ipervelocità ( $\sim 6.1$  km s<sup>-1</sup>) in assenza di dati radar o ottici ad alta risoluzione preventivi [Chabot et al., 2024]. Questo obiettivo è stato affidato al sistema *Small-body Maneuvering Autonomous Real-Time Navigation* (SMART Nav), un algoritmo di navigazione autonoma capace di distinguere il satellite Dimorphos dal primario Didymos nelle fasi finali dell'avvicinamento [Daly et al., 2023].

In secondo luogo, il requisito fondamentale di successo consisteva nella modifica del periodo orbitale di Dimorphos attorno a Didymos [Thomas et al., 2023]. Prima dell'impatto, le simulazioni basate su una collisione perfettamente anelastica ( $\beta = 1$ ) prevedevano una riduzione del periodo di circa 7 minuti. Tuttavia, la missione mirava a misurare l'effetto reale dell'amplificazione del momento, con modelli che suggerivano possibili variazioni superiori ai 30 minuti per valori di  $\beta$  elevati [Thomas et al., 2023]. La precisione richiesta nella misurazione di tale variazione tramite telescopi terrestri rappresentava un ulteriore parametro di successo, volto a validare il KI come tecnica affidabile e predicibile per future missioni di mitigazione [Lin et al., 2023; Thomas et al., 2023].

Infine, la caratterizzazione morfologica del sito d'impatto e del plume di detriti era necessaria per correlare la variazione dinamica osservata con le proprietà geologiche del bersaglio, risolvendo l'incertezza legata alla risposta strutturale di un asteroide *rubble-pile* sottoposto a impatto cinetico [Barbee et al., 2026; Daly et al., 2023].

## 3.3 Strumentazione

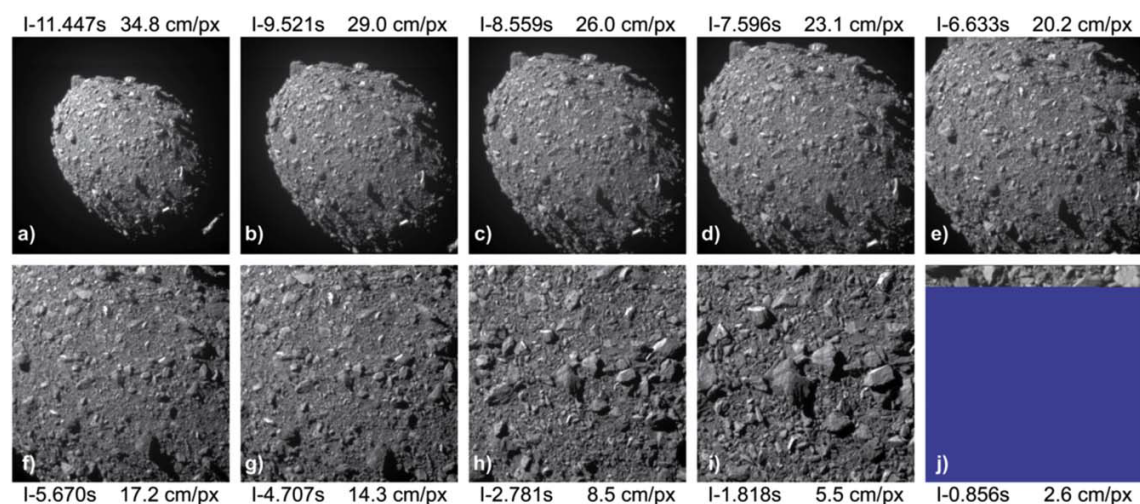
L'architettura della missione DART è stata concepita privilegiando l'essenzialità e l'affidabilità tecnologica, limitando la strumentazione di bordo allo stretto necessario per garantire il successo dell'intercettazione autonoma e la massimizzazione del trasferimento di energia cinetica. Al fine di documentare la geometria del bersaglio e gli effetti della collisione, la sonda principale è stata affiancata da un modulo secondario dispiegabile.

### 3.3.1 Payload principale: DRACO

Il veicolo spaziale DART è stato equipaggiato con un unico carico utile (*payload*) scientifico primario: una fotocamera a campo stretto (*narrow-angle imager*) denominata *Didymos Reconnaissance and Asteroid Camera for Optical navigation* (DRACO) [Daly et al., 2023]. Questo sensore ottico è stato progettato per assolvere tre funzioni critiche durante la fase operativa della missione: la navigazione ottica di precisione, la guida terminale del veicolo e la caratterizzazione fisica dell'asteroide bersaglio [Daly et al., 2023].

Dal punto di vista operativo, la sensibilità del sensore ha permesso a DRACO di rilevare il corpo primario, Didymos, nelle immagini di navigazione ottica ben 61 giorni prima dell'impatto [Daly et al., 2023]. Nelle concitate ore finali della missione, lo strumento ha fornito un flusso continuo di immagini impiegate per l'astrometria relativa di Dimorphos rispetto a Didymos; tali dati visivi sono stati processati in tempo reale dall'algoritmo di navigazione autonoma per correggere la traiettoria di intercettazione [Thomas et al., 2023; Daly et al., 2023].

Nelle ultime frazioni di secondo prima dell'impatto della sonda, le prestazioni ottiche e di trasmissione di DRACO hanno consentito di risolvere la superficie del bersaglio con un dettaglio senza precedenti. La Figura 3.1 mostra le ultime 10 immagini acquisite dalla camera, con una progressione di dettaglio che culmina a pochi centimetri per pixel. In particolare, l'ultima immagine completa dell'asteroide è stata acquisita esattamente 1.818 s prima della collisione (pannello *i*), rivelando la morfologia di Dimorphos con una scala dei pixel pari a 5.5 cm [Daly et al., 2023]. La telemetria è riuscita a trasmettere a Terra anche una successiva immagine parziale, catturata ad appena 0.855 s dal contatto (pannello *j*), la quale ha raggiunto una risoluzione spaziale estrema di 2.6 cm per pixel [Daly et al., 2023]. Oltre al loro impiego per la navigazione, le immagini ad alta risoluzione fornite da DRACO, integrate successivamente con le acquisizioni ottiche del modulo *Light Italian CubeSat for Imaging of Asteroids* (LICIACube), sono risultate essenziali per ricostruire la topografia del sistema binario mediante tecniche di stereofotoclinometria [Chabot et al., 2024].



**Figura 3.1:** Sequenza delle ultime 10 immagini restituite dalla camera DRACO della sonda DART, con indicati i tempi prima dell'impatto e la risoluzione spaziale in cm/pixel. I

pannelli (a)-(i) mostrano le immagini complete; il pannello (j) è l'ultima immagine parziale trasmessa, acquisita 0.855 s prima del contatto, la cui trasmissione è stata interrotta dall'impatto. La progressione evidenzia il crescente dettaglio superficiale, culminante nella scala di 2.6 cm/pixel del frame parziale. Immagine adattata da Chabot et al. [2024].

### 3.3.2 Il contributo italiano: LICIACube

Data la natura distruttiva dell'impiantatore DART, l'acquisizione di una documentazione visiva indipendente della collisione e dell'evoluzione iniziale della nube di detriti ha richiesto il rilascio di un modulo di osservazione separato. Tale compito è stato assegnato a LICIACube [Deshapriya et al., 2023], un CubeSat supportato dall'Agenzia Spaziale Italiana, che costituisce il contributo italiano alla missione.

Integrato originariamente nella sonda DART, il nanosatellite è stato rilasciato 15 giorni prima dell'impatto [Deshapriya et al., 2023]. Questa manovra ha permesso a LICIACube di inserirsi in una traiettoria di sorvolo sicura, garantendo un'osservazione ottimale dell'evento. Il massimo avvicinamento a Dimorphos si è verificato a una distanza di circa 58 km, consentendo l'acquisizione di dati fondamentali per l'analisi della collisione [Deshapriya et al., 2023].

A bordo di LICIACube, la fotocamera *LICIACube Unit Key Explorer* (LUKE) ha acquisito sequenze di immagini — tra cui una serie di otto scatti ampiamente analizzata in letteratura — che documentano lo sviluppo del pennacchio di detriti sollevato dalla collisione [Deshapriya et al., 2023]. Tali evidenze ottiche hanno fornito i dati necessari per modellare la geometria e l'orientamento tridimensionale dell'*ejecta plume* e per porre vincoli rigorosi sulle proprietà meccaniche del bersaglio, risultati che verranno analizzati in dettaglio nella Sezione 3.5 [Deshapriya et al., 2023; Chabot et al., 2024].

## 3.4 Dinamica dell'Impatto

La fase di intercettazione terminale è stata caratterizzata da una rigorosa sequenza cronologica e cinematica, priva di interventi umani in tempo reale.

Nelle fasi finali della missione, il sistema autonomo SMART Nav ha individuato visivamente il satellite Dimorphos 73 minuti prima dell'impatto [Daly et al., 2023]. Le manovre attive di correzione della rotta sono state avviate a 50 minuti dal contatto [Daly et al., 2023]. Per garantire l'acquisizione e la trasmissione di immagini ad altissima risoluzione, prevenendo le distorsioni indotte dalle vibrazioni dei propulsori, ogni manovra di correzione dell'assetto è stata interrotta esattamente 2.5 minuti prima della collisione [Daly et al., 2023]. Questa operazione ha dato inizio alla fase conclusiva di volo balistico inerziale verso il bersaglio [Daly et al., 2023].

### 3.4.1 Cinematica e geometria della collisione

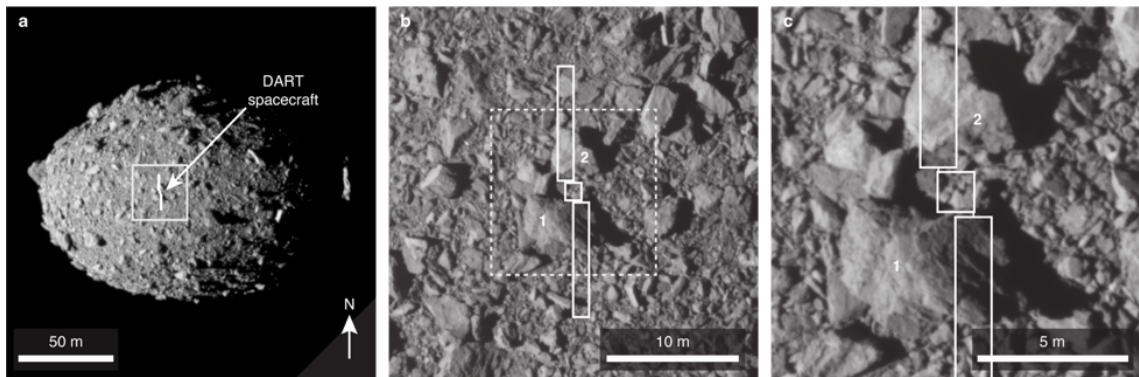
Come riassunto nella Tabella 3.1, l'impatto si è verificato il 26 settembre 2022 alle ore 23:14:24.183  $\pm$  0.004 UTC [Daly et al., 2023]. Al momento del contatto, il veicolo

spaziale possedeva una massa di  $579.4 \pm 0.7$  kg e procedeva a una velocità relativa di  $6.1449 \pm 0.0003$  km/s, rilasciando un'energia cinetica complessiva pari a  $10.94 \pm 0.01$  GJ [Daly et al., 2023]. Dal punto di vista della geometria orbitale, l'angolo formato tra il vettore velocità della sonda e il piano dell'orbita del sistema binario è risultato di 166.2 gradi, con una componente di approccio fuori dal piano orbitale di 9.7 gradi [Chabot et al., 2024].

Il punto esatto della collisione è stato localizzato alle coordinate  $8.84 \pm 0.45$  gradi S e  $264.30 \pm 0.47$  gradi E, con un'incertezza posizionale stimata in  $\pm 68$  cm [Daly et al., 2023]. La sonda ha colpito la superficie a una distanza inferiore a 25 m dal centro di figura di Dimorphos [Daly et al., 2023; Chabot et al., 2024]. L'angolo di incidenza sulla topografia locale è stato misurato in  $73 \pm 7$  gradi rispetto al piano orizzontale e circa 17 gradi rispetto alla normale della superficie [Daly et al., 2023; Chabot et al., 2024].

### 3.4.2 Dinamica del contatto superficiale

L'interazione meccanica tra il veicolo e l'asteroide si è configurata come un processo spazialmente distribuito a causa della spiccata irregolarità morfologica del sito d'impatto. Nelle frazioni di secondo finali, come illustrato nella Figura 3.2, il pannello solare +Y ha colpito direttamente una struttura rocciosa lunga 6.5 m, identificata come massa 1, mentre il pannello solare -Y ha sfiorato un secondo blocco di 6.1 m, denominato massa 2 [Daly et al., 2023; Raducan et al., 2024]. Immediatamente dopo il contatto delle appendici, il corpo centrale della sonda, che costituiva circa l'88% della massa totale e veicolava la quasi totalità dell'energia cinetica, ha impattato nello spazio compreso tra i due massi [Daly et al., 2023].



**Figura 3.2:** L'asteroide Dimorphos e il dettaglio del sito d'impatto acquisiti dalla telecamera *Didymos Reconnaissance and Asteroid Camera for Optical navigation* (DRACO). (a) Vista globale con la sagoma in scala e orientata della sonda DART (dotata di pannelli solari lunghi 8.5 m ciascuna) centrata sul punto di collisione. La freccia in basso a destra indica la direzione dell'asse +Z (Nord). Il riquadro bianco indica la regione del pannello (b). (b) Dettaglio acquisito 2.781 s prima dell'impatto: sono visibili le posizioni delle appendici rispetto al massa 1 (6.5 m) e al massa 2 (6.1 m). Il riquadro tratteggiato indica la regione del pannello (c). (c) Ultima inquadratura acquisita 1.818 s prima del contatto. L'interazione meccanica è spazialmente distribuita a causa dell'irregolarità morfologica: i pannelli solari urteranno i massi 1 e 2, mentre il corpo centrale (costituente circa l'88% della massa totale

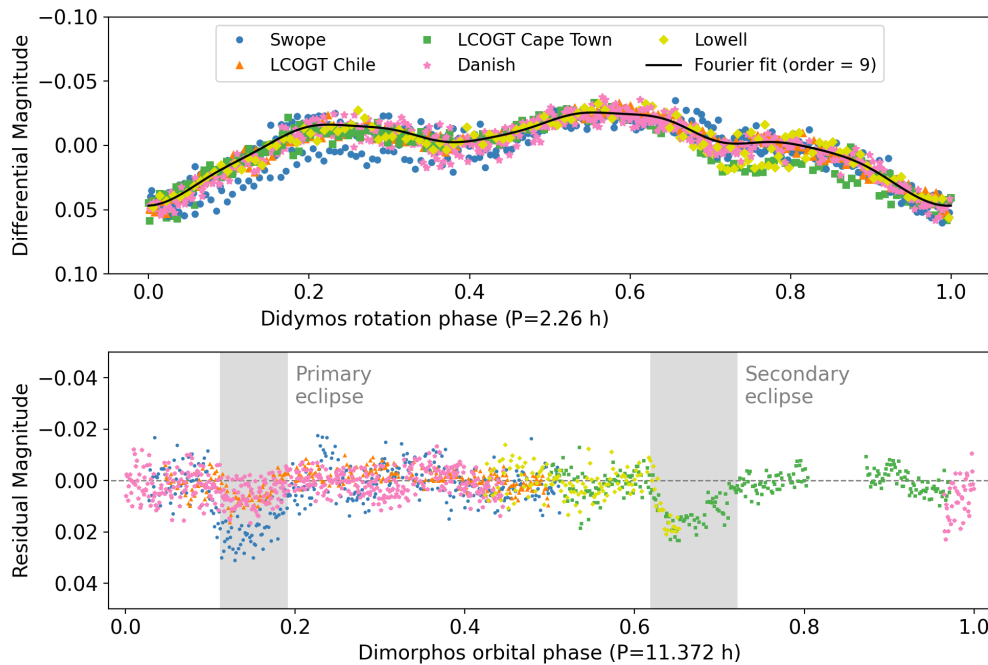
e veicolante quasi tutta l'energia cinetica) impatterà nello spazio intermedio. Immagine e dati adattati da Daly et al. [2023].

## 3.5 Analisi dei Risultati

L'impatto della sonda DART su Dimorphos ha generato un'importante mole di dati, raccolti sia in situ dal modulo LICIACube sia attraverso estese campagne osservative terrestri e spaziali. L'analisi multidisciplinare di tali informazioni ha permesso di quantificare il successo della missione e di derivare proprietà fisiche fondamentali del sistema binario.

### 3.5.1 Quantificazione della variazione del periodo orbitale

L'obiettivo primario di DART era l'alterazione misurabile dell'orbita di Dimorphos attorno a Didymos [Thomas et al., 2023]. Le osservazioni fotometriche e radar post-impatto hanno confermato una riduzione del periodo orbitale pari a  $-33.0 \pm 1.0$  minuti con un livello di confidenza di  $3\sigma$  [Thomas et al., 2023], con stime indipendenti che confermano una variazione di 33.24 minuti [Chabot et al., 2024]. Il periodo di rivoluzione del secondario è passato dal valore pre-impatto di 11.92148 h a circa 11.372 h [Thomas et al., 2023], come documentato dalle curve di luce riportate nella Figura 3.3.



**Figura 3.3:** Fotometria del sistema Didymos-Dimorphos misurata il 2 ottobre 2022 da cinque telescopi indipendenti. (In alto) Curva di luce riorganizzata sul periodo di rotazione del primario Didymos, rimasto inalterato a 2.260 h. (In basso) Eventi mutui estratti sottraendo il segnale rotazionale di Didymos e riorganizzati sul nuovo periodo orbitale di Dimorphos, pari a 11.372 h. L'allineamento dei cali di luminosità documenta

la riduzione del periodo orbitale di  $33.0 \pm 1.0$  minuti rispetto al valore pre-impatto di 11.92148 h, confermando il successo della deflessione cinematica. Immagine e dati adattati da Thomas et al. [2023].

In termini di parametri orbitali, questa variazione si traduce in una contrazione del semiasse maggiore di circa 37 m, portandolo a un valore di  $1152 \pm 18$  m [Chabot et al., 2024]. La collisione ha inoltre indotto una variazione istantanea della componente di velocità orbitale lungo la traiettoria quantificabile in  $2.70 \pm 0.10$  mm/s [Chabot et al., 2024; Raducan et al., 2024]. Al contrario, il periodo di rotazione del primario Didymos è rimasto inalterato a 2.260 h, a dimostrazione che l'evento non ha perturbato lo stato rotazionale del corpo principale [Thomas et al., 2023; Chabot et al., 2024].

### 3.5.2 Dati fotometrici e spettroscopici post-impatto

A seguito dell'urto, il sistema ha registrato un improvviso incremento di luminosità di circa un ordine di grandezza [Lin et al., 2023]. Nelle prime 40 ore post-impatto, la vasta nube di detriti ha dominato l'emissione ottica, contribuendo al 60%-70% della luce totale riflessa dal sistema [Polishook et al., 2023; Lazzarin et al., 2026].

Le analisi spettroscopiche nel vicino infrarosso hanno confermato le stime pre-impatto, discusse nella Sezione 3.1.1, evidenziando che la classificazione tassonomica del sistema è rimasta invariata e indicando che sia Didymos sia Dimorphos sono costituiti dal medesimo materiale silicatico [Polishook et al., 2023; Lazzarin et al., 2026]. Sorprendentemente, l'impatto non ha rivelato tracce di materiale "fresco" o non alterato (tipo Q) [Polishook et al., 2023]. L'assenza di firme spettrali non sottoposte a *space weathering* suggerisce che Dimorphos sia un corpo secondario formatosi per accumulo di materiale superficiale già alterato espulso da Didymos, corroborando definitivamente i modelli di formazione per frammentazione rotazionale [Polishook et al., 2023; Raducan et al., 2024].

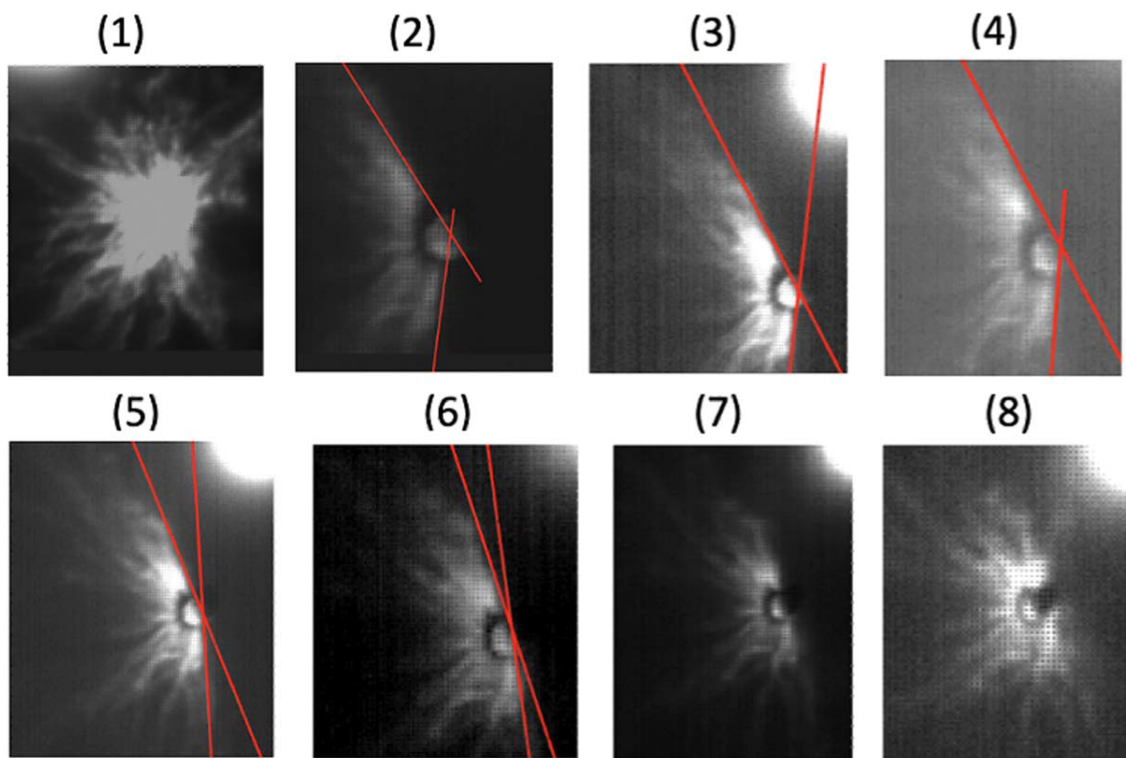
Si è inoltre osservata una variazione transitoria della pendenza spettrale, inizialmente diminuita e poi progressivamente tornata ai valori pre-impatto nell'arco di circa una settimana [Polishook et al., 2023; Lazzarin et al., 2026]. Tale comportamento è imputabile alla granulometria dell'*ejecta*: dopo che la pressione di radiazione solare ha rimosso rapidamente i grani più fini (entro le prime 10 ore), la nube è rimasta dominata da frammenti più grossolani ( $\geq 100 \mu\text{m}$ ), i quali determinano una diminuzione della pendenza spettrale [Polishook et al., 2023]. Con il successivo diradamento della nube, la luce riflessa dalla regolite fine presente sulla superficie di Didymos è tornata a dominare il segnale, ripristinando lo spettro originario [Polishook et al., 2023].

### 3.5.3 Analisi morfologica dei plume di ejecta

L'espulsione di materia innescata dall'impatto ha mostrato una complessa evoluzione morfologica. Nei primi minuti si è generata una nube gassosa e veloce, con particelle proiettate a velocità comprese tra 1.5 km/s e 3.6 km/s in direzione opposta a quella di arrivo della sonda [Polishook et al., 2023; Chabot et al., 2024]. Successivamente,

la polvere più lenta ha formato una coda estesa per oltre 70000 km in direzione antisolare, spinta dalla pressione di radiazione solare [Chabot et al., 2024; Lin et al., 2023]. A circa una settimana di distanza, è comparsa una seconda coda anomala, verosimilmente causata da un impatto secondario di materiale precedentemente espulso e ricaduto nel sistema [Lin et al., 2023; Lazzarin et al., 2026].

Le immagini del CubeSat LICIACube, riportate nella Figura 3.4, hanno permesso di ricostruire la geometria tridimensionale dell'*ejecta plume*, modellizzabile come un cono ellittico caratterizzato da un semiangolo di apertura maggiore di 69 gradi e uno minore di 51 gradi, con l'asse inclinato di circa 18.6 gradi rispetto alla direzione di arrivo di DART [Deshapriya et al., 2023; Chabot et al., 2024]. L'apice di tale cono è stato localizzato ad appena 15 m dal centro di Dimorphos [Deshapriya et al., 2023]. Questa localizzazione profonda indica che la formazione del cratere è avvenuta in un regime dominato dalla gravità piuttosto che dalla coesione strutturale [Deshapriya et al., 2023]. Le simulazioni confermano infatti che DART non ha prodotto un cratere convenzionale, ma ha innescato una deformazione globale del satellite, alterandone il rapporto assiale equatoriale da 1.02 a 1.30 e causando un rimodellamento massiccio del corpo [Raducan et al., 2024; Chabot et al., 2024].



**Figura 3.4:** Sequenza di immagini della fotocamera *LICIACube Unit Key Explorer* (LUKE) che documenta l'evoluzione tridimensionale dell'*ejecta plume*. Il cono di espulsione è inquadrato frontalmente (riquadro 1), lateralmente (riquadri da 2 a 6) e in transizione verso una vista posteriore (riquadri 7 e 8). Nelle viste laterali, le linee rosse delineano i margini del cono proiettato, parametro alla base della modellazione geometrica. Tali dati definiscono un cono ellittico con semiangolo maggiore di 69 gradi, semiangolo minore di 51 gradi e asse inclinato di 18.6 gradi rispetto alla traiettoria di arrivo di DART. Ad eccezione del primo riquadro, è visibile l'ombra proiettata dalla regione otticamente spessa

del pennacchio su Dimorphos; l'oggetto luminoso ai margini è il primario Didymos. La profondità dell'apice del cono (15 m dal centro del bersaglio) evidenzia una dinamica dominata dalla gravità. Immagine e dati adattati da Deshapriya et al. [2023].

### 3.5.4 Stima del fattore di trasferimento della quantità di moto ( $\beta$ )

Come delineato nei requisiti di missione, la riduzione del periodo orbitale eccede ampiamente i circa 7 minuti attesi nel caso di un urto puramente anelastico ( $\beta = 1$ ) [Thomas et al., 2023]. I modelli dinamici indicano che il fattore di amplificazione della quantità di moto,  $\beta$ , è compreso tra 2.2 e 4.9 (oppure tra 2.4 e 4.9 secondo stime parallele), con l'incertezza dominata dalla mancata conoscenza della massa esatta di Dimorphos [Deshapriya et al., 2023; Chabot et al., 2024; Raducan et al., 2024].

Assumendo per Dimorphos una densità apparente di  $2400 \text{ kg/m}^3$ , il valore risultante per  $\beta$  si attesta intorno a 3.6 [Chabot et al., 2024]. Questo dato dimostra inequivocabilmente che la spinta derivante dal rinculo dei detriti espulsi è stata nettamente superiore alla quantità di moto impartita direttamente dall'impatto della sonda [Raducan et al., 2024]. Per giustificare l'ampia apertura del cono di *ejecta*, i valori di  $\beta$  calcolati e la deformazione globale, i modelli richiedono che Dimorphos sia un *rubble-pile* estremamente debole, con una resistenza coesiva inferiore a 500 Pa (con adattamenti ottimali compresi tra 5 e 50 Pa) [Raducan et al., 2024; Chabot et al., 2024].

## 3.6 Limiti di DART: Incertezze e Questioni Aperte

Sebbene la missione DART abbia inequivocabilmente dimostrato la fattibilità tecnica del KI per la difesa planetaria, la natura intrinseca dell'esperimento — che culmina con l'inevitabile distruzione della sonda — ha precluso la misurazione diretta di alcune variabili fisiche fondamentali. L'architettura stessa della missione ha generato una serie di incertezze che impediscono una chiara e definitiva validazione dei modelli di deflessione asteroidale in assenza di indagini successive.

### 3.6.1 L'incognita della massa di Dimorphos e l'imprecisione nel calcolo di $\beta$

Riprendendo la relazione dell'Equazione 3.1, il parametro cruciale per valutare l'efficacia di un impattatore cinetico è la variazione di velocità impressa al bersaglio ( $\Delta \vec{V}$ ), il cui valore è intrinsecamente legato al fattore di amplificazione della quantità di moto ( $\beta$ ) e alla massa dell'asteroide [Barbee et al., 2026]

Tuttavia, il limite intrinseco di DART è stato l'impossibilità di effettuare misurazioni gravimetriche dirette per determinare la massa di Dimorphos [Daly et al., 2023]. Di conseguenza, come anticipato nella Sezione 3.1.2, tale valore è stato dedotto per via

puramente teorica e indiretta, assumendo densità affini tra primario e secondario [Daly et al., 2023]. Questa approssimazione costituisce la principale fonte di incertezza della missione: la mancanza di un dato di massa univoco impedisce di fissare un valore esatto per  $\beta$ , rilegandolo all'ampio intervallo di stime discusso nella Sezione 3.5.4 [Raducan et al., 2024; Deshapriya et al., 2023; Chabot et al., 2024]. Senza una misurazione diretta, la validazione definitiva dell'efficienza dell'urto rimane incompleta [Barbee et al., 2026].

### 3.6.2 Assenza di dati diretti sulla struttura interna

Un'ulteriore limitazione risiede nell'impossibilità di sondare in situ le proprietà meccaniche e l'architettura interna di Dimorphos. I modelli previsionali e le interpretazioni dei risultati dipendono pesantemente da parametri dedotti unicamente per via spettroscopica o per inferenza idrodinamica [Barbee et al., 2026].

Le stime sull'elevata porosità macroscopica e sulla resistenza coesiva quasi nulla — necessarie per giustificare la morfologia della nube di frammenti — rimangono deduzioni indirette [Raducan et al., 2024; Chabot et al., 2024]. Nonostante l'evidenza geologica superficiale suggerisca fortemente una struttura *rubble-pile*, manca una validazione strutturale profonda che possa confermare l'effettiva distribuzione dei vuoti interni e la reale coesione dei grani [Barbee et al., 2026; Raducan et al., 2024; Daly et al., 2023].

### 3.6.3 Mancata osservazione del cratere residuo

L'osservazione diretta del sito d'impatto post-collisione è stata ostacolata non solo dall'ovvia distruzione della sonda DART, ma anche dalla dinamica dell'espulsione dei frammenti. Sebbene il CubeSat LICIAcube abbia effettuato un sorvolo a circa 58 km di distanza, il denso materiale in espansione celava completamente la morfologia della superficie sottostante, impedendo l'osservazione del cratere residuo [Deshapriya et al., 2023].

Di conseguenza, la reale topografia post-collisione rimane ignota. L'ipotesi che l'urto abbia innescato una deformazione globale del corpo piuttosto che un cratere convenzionale, come analizzato nella Sezione 3.5.3 [Raducan et al., 2024], costituisce uno scenario teorico privo di validazione visiva diretta.

Per risolvere queste incognite — misurare la massa reale di Dimorphos, fissare il valore di  $\beta$ , investigare la struttura interna e mappare la reale topografia post-impatto — si rende indispensabile una successiva missione spaziale dedicata a una ricognizione ravvicinata e prolungata [Barbee et al., 2026; Daly et al., 2023; Chabot et al., 2024]. Tale indagine sarà condotta dalla missione Hera dell'ESA, il cui *rendez-vous* con il sistema Didymos-Dimorphos è previsto per la fine del 2026 Michel et al. [2022].

# Capitolo 4

## La Missione Hera

La missione Hera è una sonda dell'ESA, concepita come elemento fondamentale della collaborazione internazionale AIDA, con l'obiettivo primario di condurre un'indagine post-impatto dettagliata sul sistema binario (65803) Didymos [Michel et al., 2022]. Il lancio della missione è avvenuto il 7 ottobre 2024 alle ore 14:52 UT presso il Kennedy Space Center di Cape Canaveral, impiegando come lanciatore il vettore SpaceX Falcon 9. L'architettura della missione prevede l'arrivo al sistema all'inizio di novembre 2026 per misurare con esattezza gli esiti del test di deflessione cinetica effettuato dalla sonda DART della NASA sul componente secondario Dimorphos [Lodiot and Guerbuez, 2025; Michel et al., 2025].

Questa indagine ravvicinata trasformerà il primo test di difesa planetaria in un esperimento di craterizzazione a scala reale e a bassa gravità, caratterizzato da condizioni iniziali e velocità di impatto note, fornendo ai modelli numerici le condizioni finali essenziali per la loro validazione [Michel et al., 2022]. Tale caratterizzazione *in situ* permetterà di superare i severi limiti intrinseci delle osservazioni telescopiche terrestri, consentendo l'estrapolazione delle leggi di scala a futuri scenari di rischio [Michel et al., 2025]. Oltre alle finalità di difesa planetaria, l'architettura della missione integra una sonda madre e due CubeSat operanti nello spazio profondo [Lodiot and Guerbuez, 2025]. Operando attorno al più piccolo asteroide mai visitato, Hera fornirà dati pionieristici non solo per la meccanica degli impatti, ma anche per la comprensione dell'evoluzione dei sistemi binari, per la scienza del SS e per potenziali future attività di *space mining* [Michel et al., 2022].

### 4.1 Obiettivi Scientifici

Come anticipato, la missione Hera rappresenta il completamento indispensabile del test di difesa planetaria avviato dalla missione DART [Michel et al., 2025; Popescu et al., 2025]. Come analizzato in dettaglio nella Sezione 3.5, l'impatto cinetico ha alterato con successo la cinematica del sistema binario. Il *rendez-vous* è concepito per fornire un quadro post-impatto completamente documentato, investigando le proprietà sub-superficiali e interne del bersaglio [Michel et al., 2022], come dettagliato nella matrice di tracciabilità scientifica riportata nella Tabella 4.1.

L'obiettivo primario di Hera consiste nella misurazione ad altissima precisione della massa di Dimorphos, parametro fondamentale la cui stima indiretta pre-impatto è stata discussa nella Sezione 3.1.2 [Michel et al., 2022, 2025]. La determinazione esatta di tale valore tramite indagine gravimetrica è imperativa per raffinare il calcolo dell'efficienza di trasferimento della quantità di moto, superando le incertezze attuali descritte nella Sezione 3.5.4.

Un secondo obiettivo cruciale risiede nell'indagine morfologica dettagliata dell'area colpita. I modelli teorici richiedono di accertare la natura della risposta strutturale del satellite: è necessario discriminare visivamente e topograficamente tra la formazione di un cratere localizzato o una deformazione globale del corpo [Michel et al., 2022]. Inoltre, l'indagine mira alla rilevazione di effetti dinamici di ordine superiore, quali le librazioni e l'eccitazione orbitale e di spin impartite al sistema dal trasferimento di energia [Michel et al., 2022].

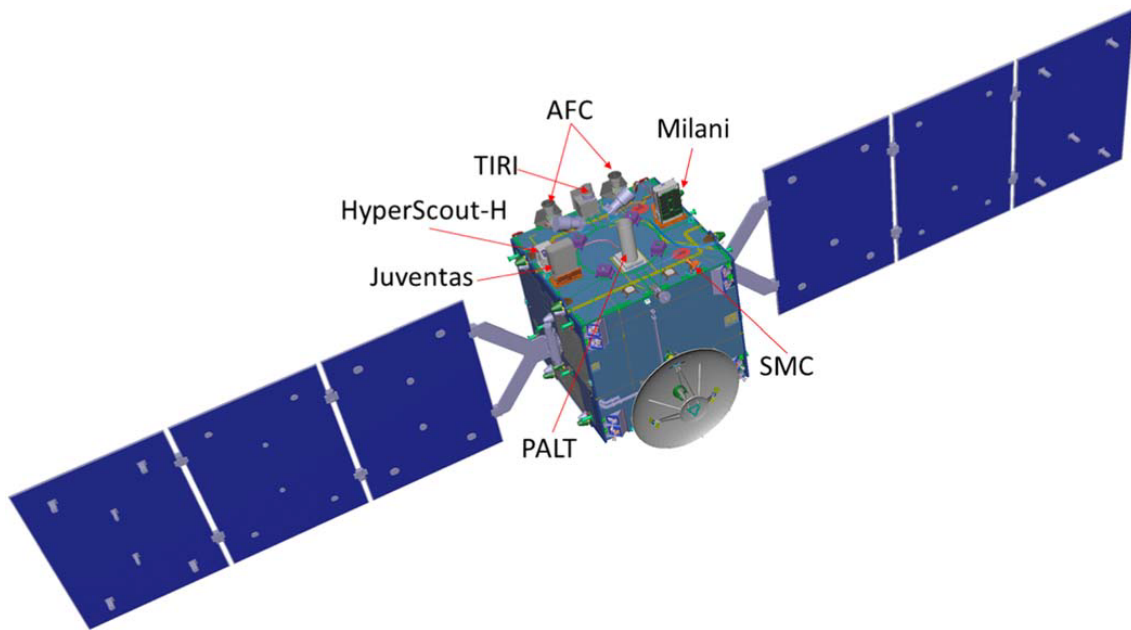
Hera è altresì incaricata di caratterizzare in modo più dettagliato la superficie e la tomografia interna di Dimorphos. Essendo il bersaglio un probabile aggregato gravitazionale, come discusso nella Sezione 3.1.2, è fondamentale mappare la reale conformazione interna per sondare la distribuzione dei vuoti e quantificare la competizione tra la debole resistenza dei materiali e il regime di microgravità [Michel et al., 2022].

**Tabella 4.1:** Matrice di tracciabilità scientifica per la missione Hera. Tabella adattata da Michel et al. [2022].

| Requisito di Missione                                        | Output scientifici                                                                                  | Strumentazione                               |
|--------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| Massa di Dimorphos e proprietà dinamiche del sistema Didymos | Stato orbitale di Dimorphos                                                                         | AFC, PALT, TIRI, RSE, GRASS, ISL             |
|                                                              | Accelerazione gravitazionale                                                                        | AFC, PALT, RSE, GRASS, ISL                   |
|                                                              | Detriti, polveri ed espulsioni                                                                      | AFC, TIRI, ISL, VISTA                        |
|                                                              | Accelerazioni non gravitazionali                                                                    | AFC, TIRI, RSE                               |
| Proprietà globali e struttura interna                        | Forma e volume (globale, cratere DART ad alta risoluzione)                                          | AFC, PALT                                    |
|                                                              | Struttura interna, distribuzione della densità e della porosità                                     | AFC, RSE, JuRa, ISL                          |
| Caratterizzazione delle proprietà superficiali               | Geomorfologia (descrizione globale della superficie)                                                | AFC, TIRI, JuRa, ASPECT                      |
|                                                              | Proprietà meccaniche (resistenza, densità, coesione, derivate da indagini locali e geomorfologiche) | AFC, PALT, TIRI, JuRa, GRASS, GNC, ASPECT    |
|                                                              | Proprietà ottiche e termiche                                                                        | AFC, PALT, TIRI, HyperScout-H, ASPECT, VISTA |
|                                                              | Composizione e <i>space weathering</i>                                                              | TIRI, HyperScout-H, JuRa, ASPECT, VISTA      |
| Output scientifici aggiuntivi                                | Mappe                                                                                               | Tutti                                        |

## 4.2 Payload e Strumentazione dell'Orbiter

L'architettura della sonda madre, illustrata nella Figura 4.1, integra una suite di strumenti per il telerilevamento ottico, termico e altimetrico, ideata per acquisire dati geofisici e geologici in modo complementare. Il carico utile principale (*payload*), che lavorerà in sinergia con due CubeSat rilasciati nello spazio profondo, include le *Asteroid Framing Cameras* (AFCs), lo spettrometro *HyperScout-H* (HS-H), l'altimetro *Planetary Altimeter* (PALT), la termocamera *Thermal Infra Red Imager* (TIRI) e l'esperimento *Radio Science Experiment* (RSE) [Michel et al., 2025; Popescu et al., 2025].



**Figura 4.1:** Rappresentazione schematica dell'architettura della sonda madre Hera. Sono indicati i posizionamenti dei principali strumenti di telerilevamento — le *Asteroid Framing Cameras* (AFCs), la termocamera *Thermal Infra Red Imager* (TIRI), l'altimetro *Planetary Altimeter* (PALT) e lo spettrometro *HyperScout-H* (HS-H) — insieme agli alloggiamenti per i due CubeSat Juventas e Milani destinati alle indagini ravvicinate. Immagine adattata da Michel et al. [2022]

### 4.2.1 Asteroid Framing Cameras (AFCs)

Le AFCs costituiscono un sistema ottico formato da due telecamere identiche dotate di un rivelatore bidimensionale [Michel et al., 2022]. Lo scopo primario di questo strumento è duplice: garantire la navigazione autonoma della sonda e supportare le attività scientifiche che richiedono l'acquisizione di immagini da molteplici posizioni e distanze [Michel et al., 2022].

Dal punto di vista tecnico, le AFCs sono equipaggiate con un sensore *CMOS Active Pixel Sensor FaintStar* da  $1020 \times 1020$  pixel. Il sistema ottico fornisce un campo di vista totale di  $5.5^\circ \times 5.5^\circ$  e un campo di vista istantaneo (equivalente alla risoluzione angolare) di  $94.1 \mu\text{rad}$  [Michel et al., 2022]. Tale configurazione è stata selezionata per

soddisfare tutti i requisiti di *imaging* della missione, permettendo risoluzioni spaziali scalari: da  $2 - 3 \text{ m pixel}^{-1}$  nella fase iniziale di caratterizzazione, a  $1 - 2 \text{ m pixel}^{-1}$  nella fase dettagliata, fino a  $0.5 - 2 \text{ m pixel}^{-1}$  durante le operazioni ravvicinate [Michel et al., 2022].

La risoluzione spaziale delle AFCs, comparabile a livello di sub-pixel a quella dello strumento spettrometro [Popescu et al., 2025], consentirà la ricostruzione topografica tridimensionale della superficie. Questo modello 3D sarà elaborato impiegando tecniche di stereofotogrammetria e affinato mediante stereofotoclinometria, supportato dalla determinazione di un'accurata funzione fotometrica della regolite [Michel et al., 2022]. L'albedo e i dati morfologici verranno successivamente validati in stretta sinergia con lo strumento HS-H [Popescu et al., 2025; Prodan et al., 2026].

### 4.2.2 HyperScout-H (HS-H)

L'HS-H è un imager iperspettrale miniaturizzato, derivato dalla piattaforma HyperScout-2, ottimizzato per le missioni planetarie al fine di garantire alta efficienza e volumi di dati ridotti [Prodan et al., 2026]. Lo strumento è caratterizzato da una massa di 5.145 kg e un volume di  $238 \times 190 \times 277 \text{ mm}^3$  [Popescu et al., 2025]. HS-H è progettato per acquisire simultaneamente immagini e dati spettrali nell'intervallo del visibile e vicino infrarosso compreso tra 0.65 e  $0.95 \mu\text{m}$ , un intervallo diagnostico per l'identificazione delle differenti classi spettrali degli asteroidi [Michel et al., 2022; Popescu et al., 2025; Prodan et al., 2026].

Il sistema ottico si basa su un telescopio in configurazione *Three-Mirror Anastigmat* con apertura di 10.3125 mm e lunghezza focale di 41.25 mm (f/4.0), capace di fornire un ampio campo visivo di circa  $15.5^\circ \times 8.3^\circ$  (o  $16^\circ \times 10^\circ$  a seconda della configurazione ottica fine) [Popescu et al., 2025; Prodan et al., 2026]. Il rivelatore è un *array CMOS* con un convertitore analogico-digitale a 12 bit, sul quale è direttamente integrato un filtro a mosaico Fabry-Pérot [Popescu et al., 2025; Prodan et al., 2026]. I pixel sono organizzati in strutture a "macropixel"  $5 \times 5$ , campionando 25 bande strette discrete caratterizzate da una *Full Width at Half Maximum* (FWHM) compresa tra 0.008 e  $0.027 \mu\text{m}$  [Popescu et al., 2025; Prodan et al., 2026]. La risoluzione angolare media del sistema è di 0.132 mrad, che da una distanza operativa di 1 km si traduce in una scala spaziale di 13.2 cm/subpixel (ovvero 66 cm/macropixel) [Popescu et al., 2025; Prodan et al., 2026].

L'obiettivo scientifico di HS-H consiste nella validazione *in situ* dei risultati spettroscopici ottenuti da terra, mappando in dettaglio la composizione mineralogica (stimando la percentuale di minerali mafici per vincolare la densità strutturale), gli effetti di *space weathering* e l'eventuale presenza di materiale esogeno [Popescu et al., 2025; Prodan et al., 2026]. Il campo visivo ampio permetterà allo strumento di monitorare l'ambiente delle polveri e la dinamica orbitale del sistema binario [Popescu et al., 2025]. Infine, la ricerca di materiale fresco esposto consentirà di mappare la ridistribuzione della polvere generata dall'impatto, differenziando il materiale alterato dalle esposizioni più profonde [Michel et al., 2022; Popescu et al., 2025].

### 4.2.3 Thermal Infrared Imager (TIRI)

Lo strumento TIRI, sviluppato dalla *Japan Aerospace eXploration Agency* (JAXA), deriva direttamente dall'imager termico TIR impiegato con successo sulla missione Hayabusa2, la quale ha evidenziato come l'elevata porosità dei massi superficiali sia una caratteristica geologica prominente in ambienti di microgravità [Michel et al., 2022]. TIRI impiega una matrice di microbolometri non raffreddati da  $1024 \times 768$  pixel, garantendo un campo di vista di  $13.3^\circ \times 10.0^\circ$  e una risoluzione angolare di  $0.013^\circ \text{ pixel}^{-1}$ . Tale configurazione consente di coprire l'intero sistema binario già da una distanza di 20 km con una risoluzione di  $5 \text{ m pixel}^{-1}$ , raggiungendo  $0.5 \text{ m pixel}^{-1}$  a 2 km di quota [Michel et al., 2022].

Lo strumento è provvisto di una ruota portafiltri a otto posizioni: un filtro a banda larga ( $7 - 14 \mu\text{m}$ ) dedicato all'*imaging* termico generale e sei filtri a banda stretta centrati a 7.8, 8.6, 9.6, 10.6, 11.65 e  $13.1 \mu\text{m}$  [Michel et al., 2022]. Questi ultimi sono specificamente calibrati per l'identificazione della firma di Christiansen e della caratteristica di Reststrahlen, essenziali per discriminare la composizione dei materiali [Michel et al., 2022]. L'indagine termofisica condotta da TIRI è fondamentale per derivare la distribuzione dimensionale del particolato e l'inerzia termica dei massi, grandezza strettamente legata alla microporosità del materiale e all'evoluzione strutturale del corpo [Michel et al., 2022].

### 4.2.4 Planetary Altimeter (PALT)

Lo strumento PALT è un sistema *Light Detection and Ranging* (LIDAR) a tempo di volto dal design compatto, con massa inferiore a 1.5 kg [Michel et al., 2022]. Il sistema si avvale di un microchip laser a basso consumo capace di emettere impulsi della durata di 2 ns con un'energia di  $100 \mu\text{J}$ , operante a una lunghezza d'onda di  $1.5 \mu\text{m}$  [Michel et al., 2022]. Con un *range* di distanza misurabile compreso tra 14 km e 500 m e un'accuratezza di 0.5 m, PALT fornirà una telemetria essenziale per la ricostruzione topografica 3D. Le misurazioni altimetriche supporteranno la determinazione della velocità di caduta gravitazionale (*fall velocity*), le oscillazioni rotazionali (*wobble*) e, sfruttando la potenza dell'impulso riflesso, la riflettività locale del bersaglio [Michel et al., 2022].

## 4.3 Radio Science Experiment (RSE)

L'esperimento RSE si prefigge di acquisire una mappatura gravimetrica ad alta fedeltà del sistema binario. La determinazione esatta delle masse e della distribuzione del campo gravitazionale è un requisito essenziale per derivare un modello realistico dell'evoluzione a lungo termine del sistema, governata da perturbazioni non gravitazionali a lungo termine, le cui basi teoriche sono state discusse nella Sezione 2.3 [Michel et al., 2022].

Il processo di determinazione orbitale risolverà simultaneamente la traiettoria del veicolo spaziale, la massa e il campo di gravità dell'asteroide, avvalendosi di un transponder in banda X. Le specifiche di tale sistema garantiscono un contributo

massimo alla deviazione standard di Allan pari a 8 su un tempo di integrazione di 60 s (e di  $2 \times 10^{-15}$  a 1000 s), traducendosi in un errore relativo sulla velocità estremamente ridotto, quantificabile in  $2.4 \mu\text{m s}^{-1}$  a 60 s [Michel et al., 2022]. Le misurazioni di distanza saranno limitate da un errore massimo di 3.4 ns (100 cm) causato dal rumore ad alta frequenza, e di ulteriori 3 ns (90 cm) per gli errori di calibrazione e deriva termica [Michel et al., 2022].

Inoltre, per la prima volta nello spazio interplanetario, l'esperimento coinvolgerà simultaneamente la sonda madre e i due CubeSat [Michel et al., 2022]. La comunicazione diretta sfrutterà un Intersatellite Link operante in modalità ad alta precisione, capace di garantire misurazioni di *range-rate* con un'accuratezza *end-to-end* di  $50 \mu\text{m s}^{-1}$  a 60 s di integrazione [Michel et al., 2022]. Questa complessa architettura sperimentale è progettata per vincolare il parametro gravitazionale standard ( $GM$ ) di Dimorphos entro lo 0.1% di incertezza e il coefficiente armonico zonale di grado 2 ( $J_2$ ) entro il 10% [Michel et al., 2022].

## 4.4 I CubeSat di Hera: Juventas e Milani

A integrazione del carico utile primario, la missione implementa due nanosatelliti CubeSat per condurre ispezioni ravvicinate. Una volta completata la procedura di separazione, Hera opererà come ponte radio per inoltrare a terra i dati raccolti dalle due piattaforme [Lodiot and Guerbuez, 2025]. Al termine della missione, è previsto che entrambi i CubeSat tentino una manovra di atterraggio su Didymos o Dimorphos. La dinamica di impatto e rimbalzo a bassa velocità fornirà informazioni inestimabili: le accelerazioni superficiali misurate dagli accelerometri a bordo di Juventas e dalle piattaforme inerziali di Milani permetteranno un'analisi diretta della risposta meccanica e dell'interazione con la regolite in un ambiente a bassissima gravità [Michel et al., 2022, 2025].

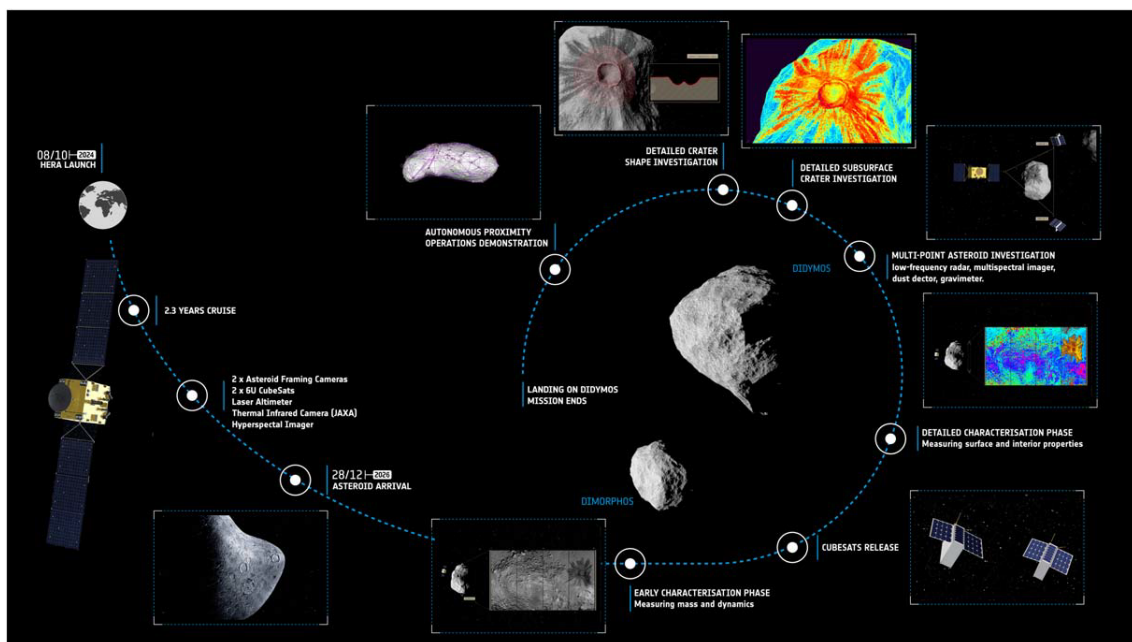
Il CubeSat Juventas è focalizzato sull'esplorazione del sottosuolo e della gravità locale [Michel et al., 2022]. La sua strumentazione primaria include il *Juventus Radar* (JuRa), un radar monostatico ad apertura sintetica a bassa frequenza, concepito per eseguire la prima tomografia interna di un asteroide binario [Michel et al., 2022]. JuRa trasmette un segnale codificato con una larghezza di banda di 20 MHz su una portante di 60 MHz e una potenza di picco di 5 W [Michel et al., 2022]. Dotato di due dipoli incrociati formati da bracci di 1.5 m, mapperà il coefficiente di *backscattering* ( $\sigma_0$ ) per sondare le eterogeneità e la distribuzione dei vuoti dell'aggregato su scale spaziali dai 20 cm ai 20 m in tutto il volume interno del corpo [Michel et al., 2022]. Affianca il radar lo strumento *Gravimeter for Small Solar System Objects* (GRASS), un gravimetro ad alta precisione destinato a misurare le variazioni temporali della gravità superficiale, attesa intorno a  $5 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-2}$  (5 mGal), con una precisione target superiore a 0.002 mGal su un'ampiezza misurabile di 0.05 mGal [Michel et al., 2022].

Il CubeSat Milani è invece finalizzato alla caratterizzazione mineralogica e all'analisi delle polveri orbitanti [Michel et al., 2022]. A bordo si trova lo strumento *Asteroid Spectral Imager* (ASPECT), uno spettrometro iperspettrale a quattro canali che

copre l'intervallo tra 0.5 e 2.5  $\mu\text{m}$  su 72 bande, destinato a operare assieme all'HS-H della sonda madre [Michel et al., 2022; Popescu et al., 2025]. Il modulo è affiancato da *Volatile In Situ Thermogravimeter Analyser* (VISTA), una microbilancia a cristalli piezoelettrici equipaggiata con elettrodo collettore e riscaldatore, in grado di rilevare impatti da micrometeoriti e particelle di polvere inferiori a 5 – 10  $\mu\text{m}$ , oltre a molecole volatili, acqua e composti organici leggeri per monitorare le contaminazioni esogene [Michel et al., 2022; Popescu et al., 2025].

## 4.5 Stato Attuale della Missione e Timeline

La complessa architettura strumentale appena descritta si inserisce in un profilo di missione, il cui schema temporale è riportato nella Figura 4.2, soggetto a rigidi vincoli di meccanica orbitale. Il trasferimento dalla Terra al sistema Didymos-Dimorphos richiede una sequenza propulsiva e di navigazione calibrata su precise finestre di lancio e manovre di assistenza gravitazionale, essenziali per minimizzare il budget di  $\Delta v$  necessario all'inserimento orbitale [Michel et al., 2022; Lodirot and Guerbuez, 2025].



**Figura 4.2:** Panoramica cronologica delle fasi principali della missione Hera. Lo schema riassume il percorso dal lancio dell'ottobre 2024, le manovre di correzione della traiettoria nello spazio profondo di ottobre e novembre 2024, il passaggio ravvicinato su Marte del 12 marzo 2025, fino all'arrivo e al successivo inserimento orbitale nel sistema binario previsto tra la fine del 2026 e l'inizio del 2027. Immagine adattata da Michel et al. [2022].

### 4.5.1 Lancio e Deep Space Cruise

La missione Hera è stata lanciata con successo e con zero giorni di ritardo rispetto alla programmazione il 7 ottobre 2024, a bordo di un lanciatore SpaceX Falcon 9 dal sito di

*Cape Canaveral* [Lodiot and Guerbuez, 2025; Michel et al., 2025; Popescu et al., 2025]. L'efficienza funzionale dei CubeSat Milani e Juventas è stata validata positivamente nelle fasi iniziali [Michel et al., 2025]. Già a tre giorni dal decollo, gli strumenti AFCs, HS-H e TIRI sono stati attivati per acquisire immagini di calibrazione del sistema Terra-Luna, operazione che ha permesso di testare e confermare in volo le funzionalità degli algoritmi di navigazione autonoma [Lodiot and Guerbuez, 2025; Prodan et al., 2026; Michel et al., 2025].

La fase di *Deep Space Cruise* ha previsto un'importante manovra nello spazio profondo organizzata in fasi: un'accensione principale dei propulsori di 100 minuti eseguita il 23 ottobre 2024 (garantendo un incremento di velocità di circa 146 m/s), seguita da una spinta secondaria di 13 minuti il 6 novembre (20 m/s) e da un'ultima correzione fine il 21 novembre [Michel et al., 2025]. La fase di *commissioning* si è formalmente conclusa nel dicembre 2024, spostando le priorità operative sulla preparazione dell'assistenza gravitazionale [Lodiot and Guerbuez, 2025].

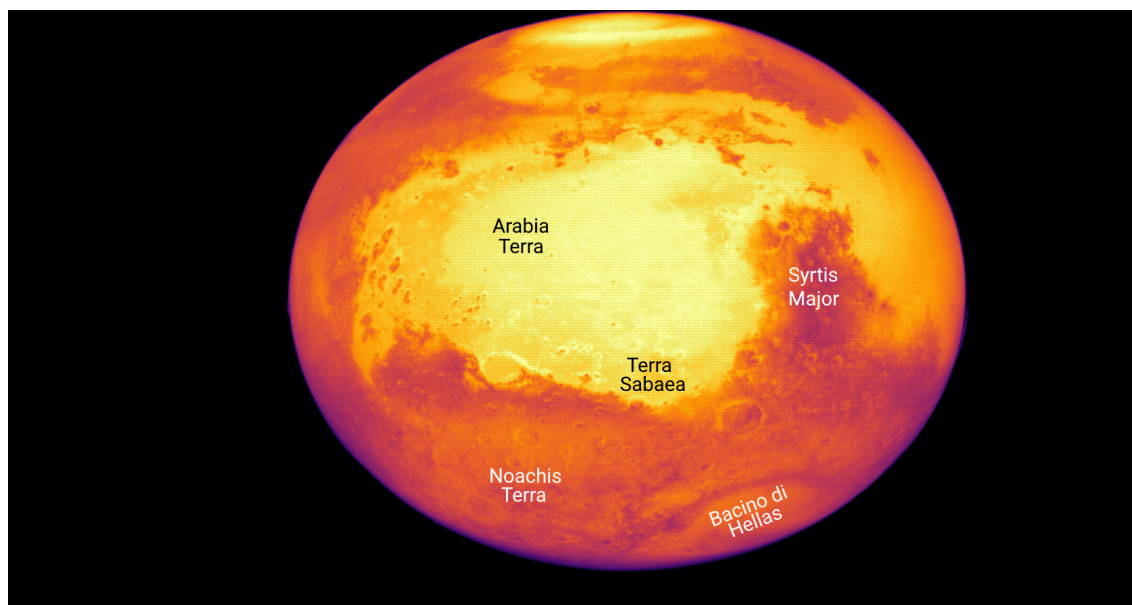
## 4.5.2 Mars Flyby e calibrazione degli strumenti

Il 12 marzo 2025 la sonda ha eseguito con successo il *Mars Swing-By* a un'altitudine minima di circa 5700 km dalla superficie marziana [Kueppers et al., 2025]. L'ottimizzazione della traiettoria per questa manovra è stata specificamente richiesta dai team scientifici per permettere di mappare ad alta risoluzione l'emisfero meno noto della luna marziana Deimos, sorvolata a una distanza di circa 1000 km [Lodiot and Guerbuez, 2025; Popescu et al., 2025; Kueppers et al., 2025]. Inoltre, l'evento ha fornito una finestra essenziale per la calibrazione assoluta degli strumenti; in particolare, le riprese in cui la superficie marziana saturava interamente il campo visivo dello strumento HS-H hanno permesso la validazione definitiva delle correzioni di *flat-field* [Popescu et al., 2025; Prodan et al., 2026].

### 4.5.2.1 Dataset HyperScout-H per il flyby marziano

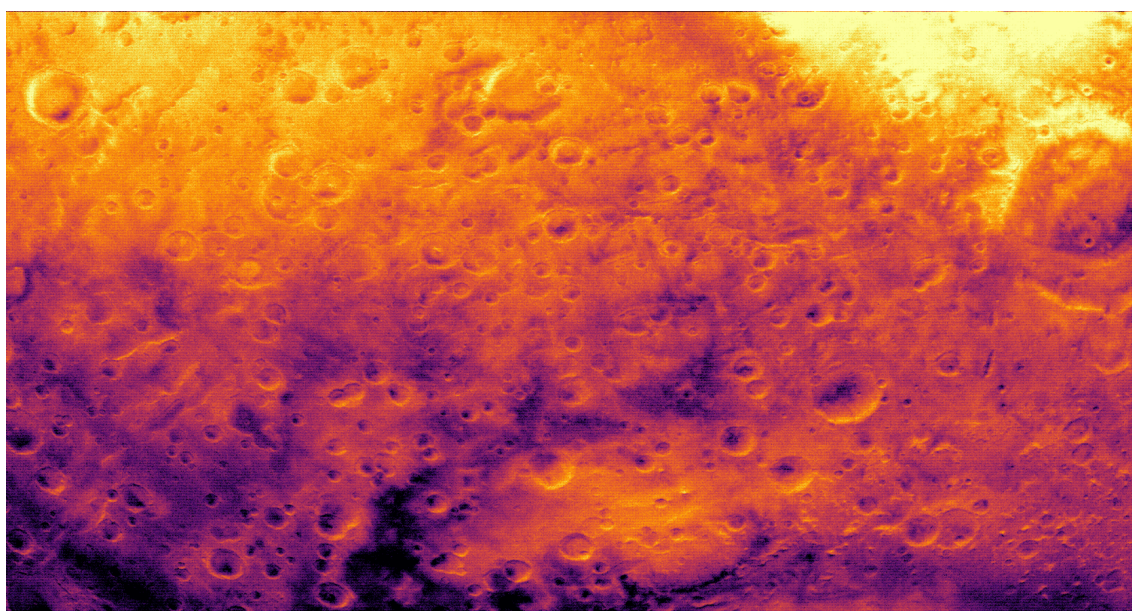
Oltre alla calibrazione strumentale, i dati acquisiti durante il *flyby* hanno permesso di condurre un'analisi spettrale della superficie marziana. Le immagini utilizzate in questo studio sono state acquisite da HS-H, le cui caratteristiche strumentali sono descritte in dettaglio nella sottosezione 4.2.2. Lo strumento opera in 25 bande spettrali nell'intervallo 0.65–0.95  $\mu\text{m}$ , una regione spettrale che consente di identificare le principali firme mineralogiche della superficie marziana.

Le immagini analizzate appartengono a due diversi *dataset*, tra loro complementari. Il primo mostra l'intero disco marziano, fornendo una visione globale della superficie che si presta a un'analisi su larga scala delle variazioni di riflettanza. Nell'immagine, riportata in Figura 4.3, sono chiaramente riconoscibili le principali province geologiche — Syrtis Major, Arabia Terra e il Bacino di Hellas — etichettate direttamente sulla figura per facilitare l'identificazione.



**Figura 4.3:** Immagine dell'intero disco marziano acquisita dallo spettrometro iperspettrale HS-H a bordo della sonda Hera durante il *flyby* del 12 marzo 2025, visualizzata con una scala di colori che enfatizza le variazioni di riflettanza. Sono evidenti le principali province geologiche — Arabia Terra (regione chiara a nord-ovest), Syrtis Major (complesso vulcanico scuro a est) e il Bacino di Hellas (grande depressione circolare a sud) — etichettate direttamente sulla figura per facilitare l'identificazione.

Il secondo *dataset*, mostrato in Figura 4.4, rappresenta una porzione più ristretta della superficie, centrata sugli altipiani meridionali di Noachis Terra e Terra Sabaea, una regione di terreni antichi e fortemente craterizzati, che consente uno studio di dettaglio su regioni specifiche e una migliore caratterizzazione delle loro proprietà spettrali.



**Figura 4.4:** Immagine di una porzione più ristretta della superficie marziana, acquisita da

HS-H durante il *flyby* del 12 marzo 2025, visualizzata con una scala di colori che enfatizza le variazioni di riflettanza. La regione è centrata sugli altipiani meridionali di Noachis Terra e Terra Sabaea, caratterizzati da terreni antichi e fortemente craterizzati. Questa visuale consente uno studio di dettaglio su regioni specifiche e una migliore caratterizzazione delle loro proprietà spettrali.

Le immagini, visualizzate con una scala di colori che enfatizza le variazioni di riflettanza, costituiscono il *dataset* di partenza per l'analisi spettrale descritta nei paragrafi successivi.

#### 4.5.2.2 Estrazione degli spettri e mappe di riflettanza

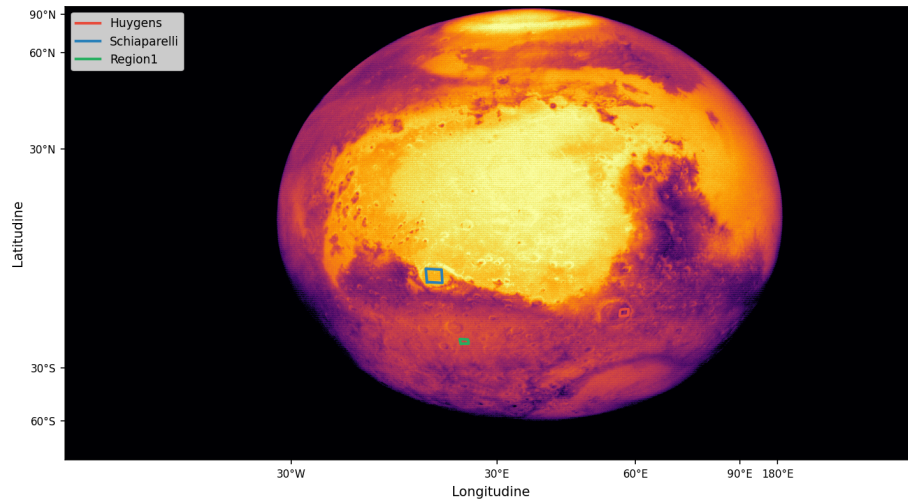
Un aspetto critico da considerare nell'analisi della riflettanza superficiale è legato alla geometria di osservazione. Nel *dataset* che mostra l'intero disco marziano, le regioni prossime al bordo del pianeta sono osservate con un angolo di incidenza significativamente diverso rispetto alle regioni centrali. Questa differenza introduce variazioni di riflettanza assoluta che non sono riconducibili a variazioni composizionali della superficie, ma sono attribuibili alla geometria di osservazione. Di conseguenza, una regione che appare visivamente più chiara può presentare una riflettanza apparente inferiore rispetto a una regione più scura, effetto che non ha significato in termini geologici ma è puramente geometrico. Per il secondo *dataset*, che copre una porzione più limitata e geometricamente più omogenea della superficie, l'effetto della curvatura è trascurabile.

Al fine di estrarre informazioni sulla mineralogia e confrontare gli spettri provenienti da diverse regioni, l'analisi è stata condotta su spettri normalizzati. La normalizzazione consente di isolare la forma spettrale — ovvero la presenza di bande di assorbimento e la pendenza — che è l'informazione veramente diagnostica per l'identificazione mineralogica, indipendentemente dall'albedo assoluto del materiale e da effetti geometrici legati all'angolo di osservazione.

Per entrambi i *dataset* sono state costruite mappe di riflettanza, sulle quali sono state individuate regioni di interesse per l'estrazione degli spettri medi. Per l'immagine dell'intero disco marziano, le regioni selezionate sono:

- **Huygens:** Lat da  $-15^\circ$  a  $-13^\circ$ , Lon da  $56.6^\circ$  a  $58.6^\circ$ ;
- **Schiaparelli:** Lat da  $-4.5^\circ$  a  $-1^\circ$ , Lon da  $14.2^\circ$  a  $17.8^\circ$ ;
- **Region1:** Lat da  $-22^\circ$  a  $-20.5^\circ$ , Lon da  $20^\circ$  a  $22^\circ$ .

Tali regioni sono evidenziate rispettivamente con riquadri rossi, blu e verdi sulle mappe di riflettanza, come mostrato in Figura 4.5.

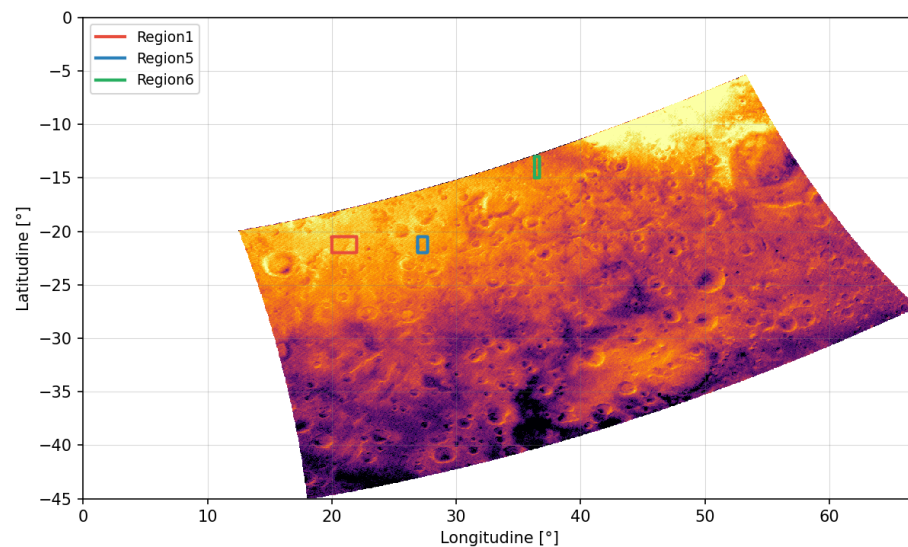


**Figura 4.5:** Mappa di riflettanza dell'intero disco marziano (*dataset 025C*), visualizzata con una scala di colori che va dal giallo (riflettanza più alta) al nero (riflettanza più bassa). Le regioni selezionate per l'estrazione degli spettri medi — Huygens (riquadro rosso), Schiaparelli (riquadro blu) e Region1 (riquadro verde) — sono evidenziate sulla mappa.

Per l'immagine della porzione più dettagliata della superficie, le regioni selezionate sono:

- **Region1:** Lat da  $-22^\circ$  a  $-20.5^\circ$ , Lon da  $20^\circ$  a  $22^\circ$ ;
- **Region5:** Lat da  $-22^\circ$  a  $-20.5^\circ$ , Lon da  $26.9^\circ$  a  $27.7^\circ$ ;
- **Region6:** Lat da  $-15^\circ$  a  $-13^\circ$ , Lon da  $36.3^\circ$  a  $36.7^\circ$ .

Anch'esse evidenziate rispettivamente con riquadri rossi, blu e verdi, come illustrato in Figura 4.6.



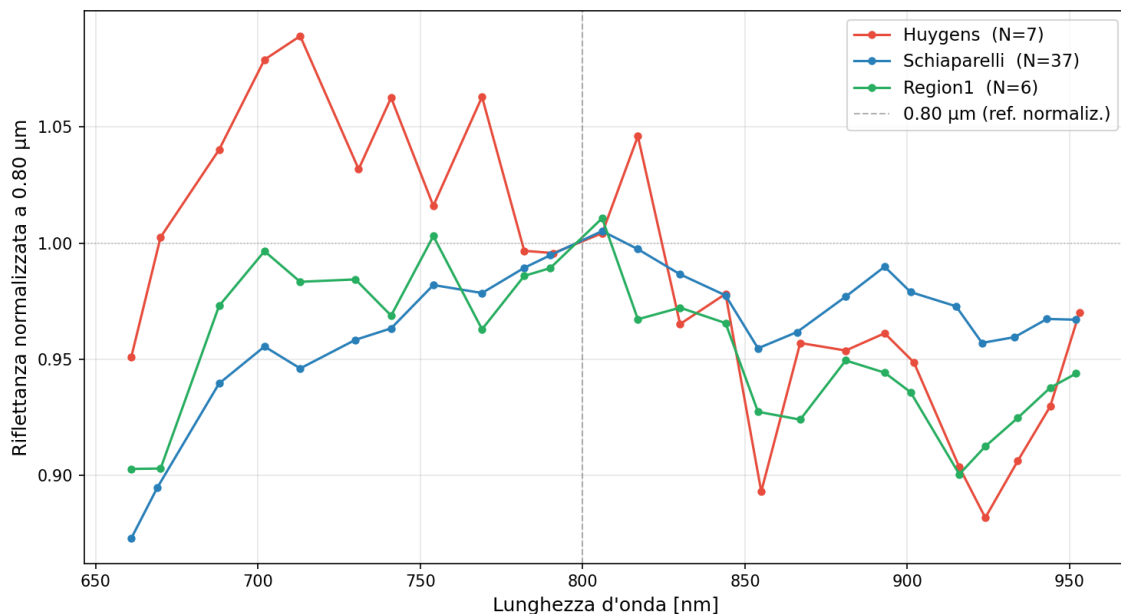
**Figura 4.6:** Mappa di riflettanza della porzione più dettagliata della superficie marziana (*dataset 025D*), visualizzata con una scala di colori che va dal giallo (riflettanza più alta) al nero (riflettanza più bassa). Le regioni selezionate per l'estrazione degli spettri medi

— Region1 (riquadro rosso), Region5 (riquadro blu) e Region6 (riquadro verde) — sono evidenziate sulla mappa.

Per ciascuna regione è stato estratto lo spettro medio a partire dai dati contenuti nel riquadro. La procedura di estrazione si basa sull'identificazione dei macropixel validi, definiti da una griglia spaziale di risoluzione  $5 \times 5$  pixel. Per ogni regione, sono stati selezionati tutti i macropixel i cui 25 pixel cadono interamente all'interno dei limiti geografici della regione stessa. Per ciascuna delle 25 bande spettrali di HS-H, è stato calcolato il valore mediano dei flussi misurati su tutti i macropixel selezionati, ottenendo così uno spettro composto da 25 punti. Il numero di macropixel utilizzati varia a seconda della dimensione della regione e della copertura del *dataset*: per il *dataset* 025C sono stati selezionati 7 macropixel per Huygens, 37 per Schiaparelli e 6 per Region1; per il *dataset* 025D, invece, 192 per Region1, 77 per Region5 e 50 per Region6.

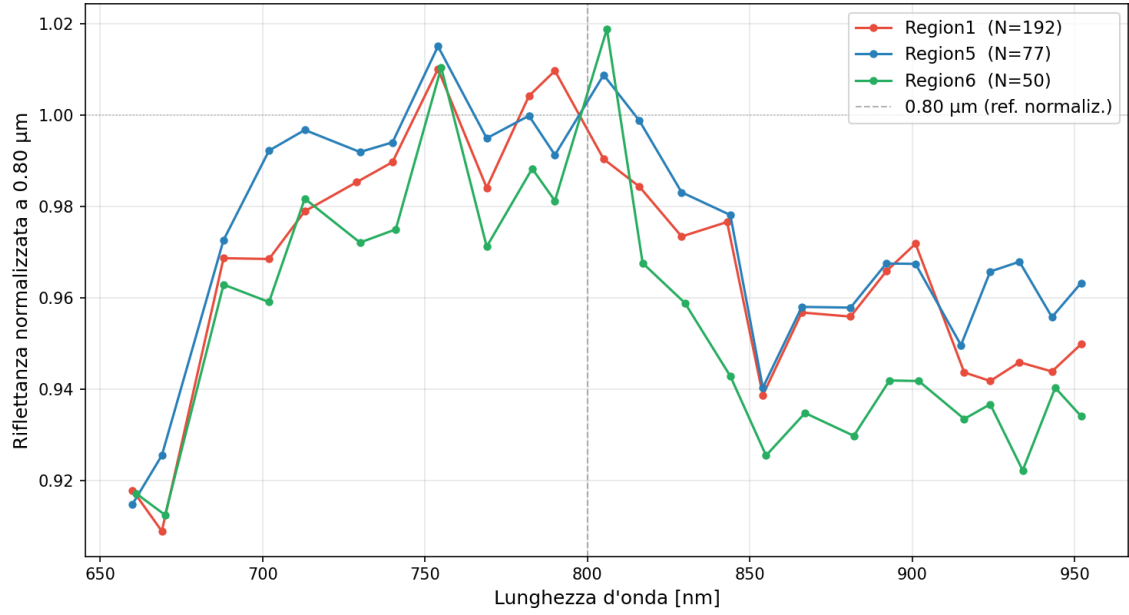
Gli spettri così ottenuti sono stati successivamente normalizzati a  $0.80 \mu\text{m}$ , dividendo ciascun valore spettrale per la mediana dei valori di riflettanza compresi tra  $0.79$  e  $0.81 \mu\text{m}$ . Questa normalizzazione consente di enfatizzare le caratteristiche di forma spettrale, rendendo gli spettri confrontabili indipendentemente dall'albedo assoluto.

Gli spettri normalizzati per l'immagine dell'intero disco marziano, con le relative curve colorate in base alla regione di provenienza, sono mostrati in Figura 4.7.



**Figura 4.7:** Spettri normalizzati delle regioni selezionate per l'immagine dell'intero disco marziano (*dataset* 025C). Le curve colorate rappresentano gli spettri medi estratti dalle regioni Huygens (rosso,  $N=7$ ), Schiaparelli (blu,  $N=37$ ) e Region1 (verde,  $N=6$ ), normalizzati a  $0.80 \mu\text{m}$ . La normalizzazione consente di enfatizzare la forma spettrale, rendendo confrontabili le diverse regioni indipendentemente dall'albedo assoluto.

Analogamente, gli spettri normalizzati per l'immagine della porzione più dettagliata della superficie sono riportati in Figura 4.8.



**Figura 4.8:** Spettri normalizzati delle regioni selezionate per la porzione più dettagliata della superficie marziana (*dataset* 025D). Le curve colorate rappresentano gli spettri medi estratti dalle regioni Region1 (rosso, N=192), Region5 (blu, N=77) e Region6 (verde, N=50), normalizzati a 0.80  $\mu\text{m}$ . La normalizzazione consente di enfatizzare la forma spettrale, rendendo confrontabili le diverse regioni indipendentemente dall'albedo assoluto.

#### 4.5.2.3 Mappe tassonomiche e interpretazione geologica

Per classificare tassonomicamente le regioni di Marte, gli spettri normalizzati sono stati confrontati con le classi spettrali della tassonomia di Mahlke [Mahlke et al., 2022]. Questa tassonomia, sviluppata a partire da un'analisi cluster di osservazioni spettroscopiche e albedo di oltre 2000 asteroidi [Mahlke et al., 2022], fornisce un linguaggio comune per descrivere le caratteristiche spettrali di riflettanza (pendenze, bande di assorbimento) indipendentemente dal corpo osservato [Mahlke et al., 2022].

Per rendere confrontabili gli spettri tassonomici con i dati HS-H, questi sono stati convolti con le *transfer function* delle 25 bande spettrali di HS-H. Per ciascuna banda, il valore convolto è stato calcolato come:

$$R_k = \frac{\int \lambda R(\lambda) T_k(\lambda) d\lambda}{\int \lambda T_k(\lambda) d\lambda}, \quad (4.1)$$

dove  $\lambda$  è la lunghezza d'onda,  $R(\lambda)$  è la riflettanza dello spettro tassonomico,  $T_k(\lambda)$  è la *transfer function* della banda  $k$ -esima e  $R_k$  è il valore dello spettro tassonomico dopo la convoluzione con la risposta strumentale di HS-H. Questa operazione è stata ripetuta per tutte le 25 bande, simulando così la risposta strumentale di HS-H. Gli

spettri così convoluti sono stati successivamente normalizzati a  $0.80 \mu\text{m}$  con la stessa procedura adottata per gli spettri marziani (mediana dei valori compresi tra  $0.79$  e  $0.81 \mu\text{m}$ ).

Per ogni regione, è stato calcolato il chi-quadro tra lo spettro normalizzato di Marte e ciascuno spettro tassonomico convoluto, secondo la relazione:

$$\chi^2 = \sum_{k=1}^N (R_{\text{Mars},k} - R_{\text{tax},k})^2, \quad (4.2)$$

dove  $R_{\text{Mars},k}$  è la riflettanza normalizzata della regione marziana nella banda  $k$ ,  $R_{\text{tax},k}$  è la riflettanza normalizzata dello spettro tassonomico nella stessa banda e  $N$  è il numero totale di bande valide utilizzate nel confronto. La classe tassonomica con il valore di chi-quadro minimo è stata assegnata a ciascuna regione. I risultati ottenuti per le regioni selezionate di entrambi i *dataset* sono riassunti nella Tabella 4.2.

**Tabella 4.2:** Risultati della classificazione tassonomica per le regioni selezionate di entrambi i *dataset*. Per ciascuna regione sono riportati il numero di macropixel utilizzati, la classe con il minimo  $\chi^2$ , il relativo valore di  $\chi^2$  e le prime tre classi con i rispettivi valori.

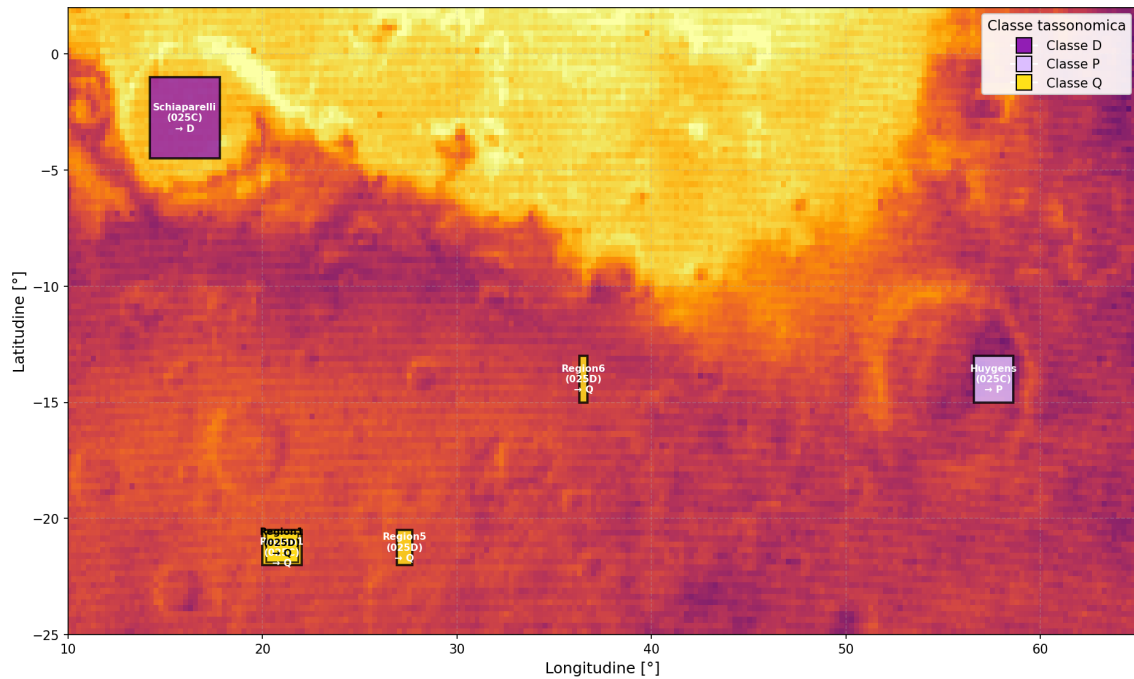
| <i>dataset</i> | Regione      | Macropixel | Classe | $\chi^2$ | Top-3 Classi ( $\chi^2$ )        |
|----------------|--------------|------------|--------|----------|----------------------------------|
| 025C           | Huygens      | 7          | P      | 0.026464 | P (0.026), Ch (0.029), Q (0.036) |
| 025C           | Schiaparelli | 9          | D      | 0.033720 | D (0.034), X (0.036), K (0.039)  |
| 025C           | Region1      | 6          | Q      | 0.049622 | Q (0.050), P (0.060), B (0.082)  |
| 025D           | Region1      | 25         | Q      | 0.015946 | Q (0.016), P (0.028), B (0.029)  |
| 025D           | Region5      | 25         | Q      | 0.018758 | Q (0.019), B (0.026), X (0.032)  |
| 025D           | Region6      | 25         | Q      | 0.090008 | Q (0.090), P (0.101), V (0.123)  |

Per il *dataset* dell'intero disco marziano (025C), il numero massimo di macropixel richiesti per l'estrazione era 9. Per Huygens e Region1, tuttavia, il numero di macropixel disponibili all'interno dei *bound* geografici è risultato inferiore (rispettivamente 7 e 6), poiché la dimensione delle regioni non consentiva di selezionare un numero maggiore di macropixel validi. Per Schiaparelli, invece, il numero di 9 macropixel ha raggiunto il massimo impostato. Per il *dataset* della porzione più dettagliata (025D), il limite era di 25 macropixel e tutte e tre le regioni hanno permesso di raggiungerlo.

Nelle sei regioni selezionate per questo studio, la classe che ricorre con maggiore frequenza è la Q, che compare in quattro campioni su sei (Region1 in entrambi i *dataset*, Region5 e Region6). Le restanti regioni sono classificate rispettivamente come D (Schiaparelli) e P (Huygens). La classe Q [Mahlke et al., 2022] è caratterizzata da spettri con bande di assorbimento attribuibili a olivina e pirosseno, minerali che dominano le rocce ignee della crosta marziana [Viviano-Beck et al., 2014; Murchie et al., 2019]. La classe D [Mahlke et al., 2022] presenta invece spettri con pendenza positiva e privi di bande di assorbimento, caratteristiche che su Marte sono tipiche di materiali carbonacei primitivi o di regioni polverose e alterate [Murchie et al., 2019]. La classe P [Mahlke et al., 2022], infine, è associata a spettri con pendenze moderate

e deboli bande di assorbimento, compatibili con materiali primitivi o carbonacei [Mahlke et al., 2022].

La distribuzione spaziale delle classi assegnate alle sei regioni selezionate è mostrata in Figura 4.9.

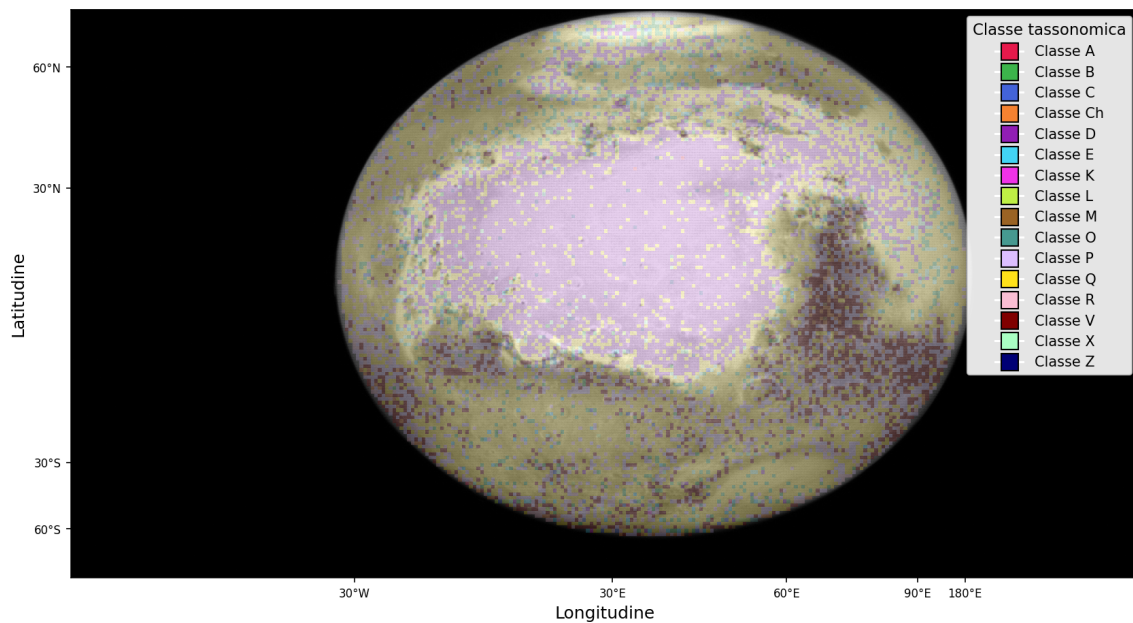


**Figura 4.9:** Mapa tassonomica delle sei regioni selezionate per l'analisi spettrale. I riquadri colorati indicano la classe tassonomica assegnata a ciascuna regione in base al minimo valore di  $\chi^2$ : Huygens (P), Schiaparelli (D), Region1 in 025C e 025D (Q), Region5 (Q) e Region6 (Q).

Successivamente, l'analisi è stata estesa all'intera superficie per entrambi i *dataset*, producendo mappe tassonomiche a colori trasparenti sovrapposte alle immagini originali di Marte. Per il *dataset* dell'intero disco (025C) sono state prodotte mappe con 5, 7 e 9 macropixel, mentre per la porzione più dettagliata (025D) sono state prodotte mappe con 20, 25 e 30 macropixel. La selezione delle versioni intermedie (7 per 025C, 25 per 025D) rappresenta un compromesso bilanciato tra due esigenze contrapposte: una riduzione del numero di macropixel aumenta il campionamento spaziale ma degrada il rapporto segnale-rumore; un aumento, invece, migliora la qualità spettrale a scapito del campionamento spaziale. Questa scelta consente di preservare un adeguato dettaglio geologico mantenendo al contempo una sufficiente affidabilità spettrale.

Le mappe tassonomiche del *dataset* 025C, mostrate in Figura 4.10, mostrano una distribuzione delle classi coerente con i modelli mineralogici globali di Murchie et al. [2019] e Viviano-Beck et al. [2014]. Le principali province geologiche sono correttamente discriminate. Arabia Terra e le pianure settentrionali, caratterizzate da alta albedo e copertura di polveri fini ossidate [Murchie et al., 2019], sono dominate dalle classi P e R, interpretabili come spettri appiattiti compatibili con materiali

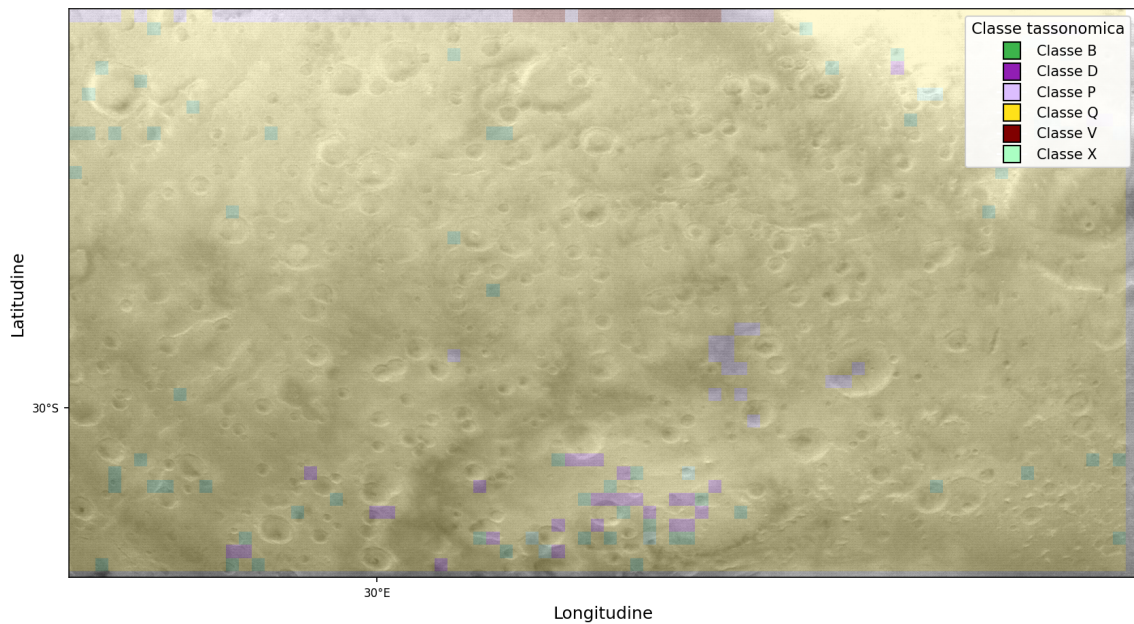
carbonacei primitivi o silicati alterati [Mahlke et al., 2022]. Syrtis Major, il complesso vulcanico scuro a est, è invece associata a classi M, O e D, tipiche di bedrock vulcanico mafico ricco in pirosseni e olivina non alterati [Murchie et al., 2019]. Terra Sabaea e il Bacino di Hellas presentano un pattern più disomogeneo, con alternanza di classi mafiche e alterate, che riflette la complessità litologica reale di queste regioni [Murchie et al., 2019; Viviano-Beck et al., 2014], sebbene nel caso di Hellas possa essere parzialmente influenzato dal *mixing* spettrale. La presenza della classe P nelle regioni ad alta albedo, pur essendo anomala per Marte [Murchie et al., 2019; Viviano-Beck et al., 2014], è interpretabile come somiglianza spettrale tra polveri ossidate e spettri carbonacei della tassonomia, un fenomeno già documentato in letteratura [Mahlke et al., 2022]. Inoltre, si osservano brusche variazioni di classe in corrispondenza di crateri in Arabia Terra, dove la classe P lascia il posto a classi mafiche (M, L, O), indicando la perforazione della coltre di polvere e l'esposizione del substrato basaltico profondo [Murchie et al., 2019].



**Figura 4.10:** Mappa tassonomica continua dell'intero disco marziano (*dataset 025C*), ottenuta con una griglia di 7 macropixel e sovrapposta all'immagine originale in scala di grigi. Le classi tassonomiche sono rappresentate con colori trasparenti, evidenziando la distribuzione spaziale delle diverse litologie: Arabia Terra e le pianure settentrionali sono dominate dalle classi P e R, mentre Syrtis Major è associata a classi mafiche (M, O, D).

Per il *dataset 025D*, che copre una porzione degli altipiani meridionali (Noachis Terra e Terra Sabaea) ed è mostrato in Figura 4.11, i risultati sono invece in forte discrepanza con le attese litologiche. La regione è quasi interamente classificata come Q (tipo S fresco), con rare occorrenze isolate di P, X e D. Questa dominanza è in netto contrasto con quanto riportato in letteratura per gli altipiani meridionali, dove sono attesi materiali mafici (classi V, O, A) associati a pirosseni e olivina [Murchie et al., 2019; Viviano-Beck et al., 2014]. L'assenza di correlazione tra la distribuzione

delle classi e le strutture morfologiche visibili (crateri, depressioni, bordi di unità geologiche) suggerisce che il risultato non sia di natura geologica, ma piuttosto un artefatto metodologico [Mahlke et al., 2022].



**Figura 4.11:** Mapa tassonomica continua della porzione più dettagliata della superficie marziana (*dataset 025D*), ottenuta con una griglia di 25 macropixel e sovrapposta all'immagine originale in scala di grigi. La regione è quasi interamente classificata come Q (tipo S fresco), con rare occorrenze isolate di P, X e D, in forte discrepanza con le attese litologiche per gli altopiani meridionali.

L'interpretazione più plausibile è che il *footprint* spaziale di 20-30 macropixel, utilizzato per 025D, sia eccessivamente ampio rispetto alla complessità litologica della regione. Ogni macropixel integra il segnale proveniente da regolite, polveri, ombre topografiche e possibili ghiacci superficiali, appiattendolo e cancellando le firme diagnostiche del substrato mafico. La classe Q, essendo spettralmente la meno vincolata e caratterizzata da assorbimenti moderati (né estremamente mafici né estremamente alterati), viene selezionata dall'algoritmo come migliore corrispondenza in assenza di caratteristiche distintive. Questo fenomeno è noto in letteratura: Mahlke et al. [2022] documentano che l'assegnazione di spettri marziani appiattiti a classi carbonacee (P) o a tipi S generici (Q) è frequente in presenza di basso rapporto segnale-rumore o forte *mixing* spettrale.

Va inoltre notato che l'analisi presentata non tiene conto degli effetti dell'atmosfera marziana. La presenza di  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$  nell'atmosfera, insieme alla diffusione da parte delle polveri e degli aerosol, può alterare la forma degli spettri e la profondità delle bande di assorbimento [Murchie et al., 2019], introducendo distorsioni che non sono state rimosse nella procedura di classificazione. In studi di telerilevamento iperspettrale, tali effetti vengono tipicamente corretti tramite modelli di trasferimento radiativo o mediante normalizzazione con spettri di regioni spettralmente "blande" (ad esempio, le regioni polverose ad alta albedo) [Viviano-Beck et al., 2014; Murchie

et al., 2019]. Poiché questa correzione non è stata applicata, i risultati ottenuti vanno interpretati come una caratterizzazione spettrale di primo ordine, utile per identificare le principali province geologiche e le loro firme spettrali, ma non come una mappatura mineralogica quantitativa definitiva.

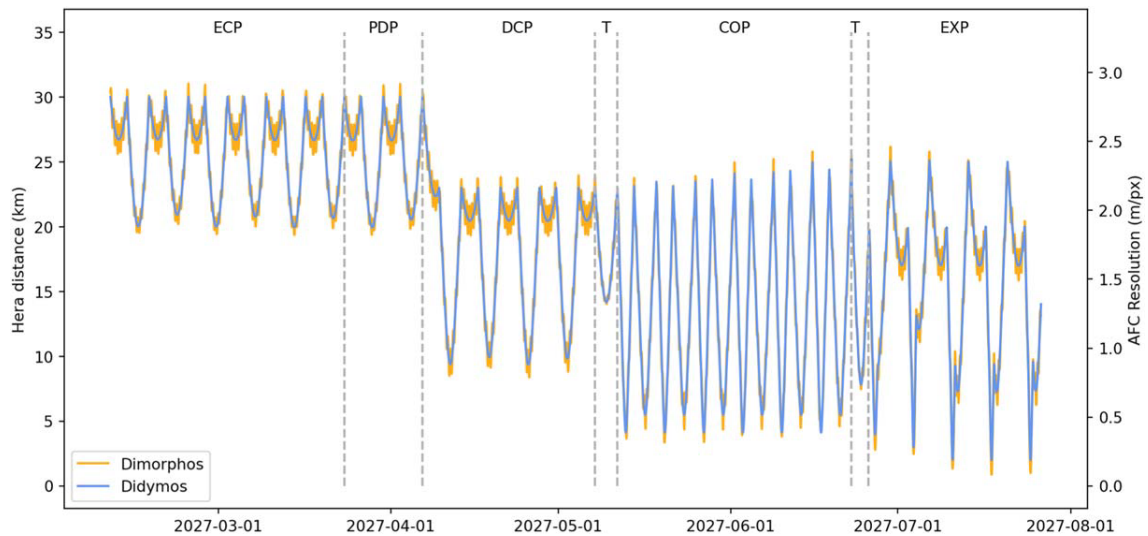
Il confronto tra i due *dataset* evidenzia, quindi, un limite metodologico fondamentale: la procedura di classificazione funziona correttamente su scala globale (5-9 macropixel), dove i forti contrasti di albedo e litologia tra province geologiche favoriscono la discriminazione spettrale, ma fallisce su scala di dettaglio (20-30 macropixel) in regioni geologicamente complesse e spettralmente omogenee. Nonostante questa limitazione, le mappe tassonomiche di 025C rappresentano un risultato scientificamente valido: la corretta identificazione delle principali province geologiche marziane (Syrtris Major come dominio mafico, Arabia Terra come dominio polveroso/alterato) conferma l'idoneità della procedura di classificazione per l'analisi su larga scala dei dati di HS-H e la sua coerenza con i modelli litologici consolidati [Murchie et al., 2019; Viviano-Beck et al., 2014]. I risultati suggeriscono che, per future applicazioni ad alta risoluzione, la dimensione del macropixel debba essere ottimizzata in funzione della scala geologica di interesse (mantenendola al di sotto di 15-20 pixel in regioni ad alta eterogeneità litologica) o che si debbano adottare tecniche di *unmixing* spettrale per deconvolvere il segnale misto.

### 4.5.3 Arrivo al sistema binario

A seguito di una seconda manovra nello spazio profondo, programmata per gennaio 2026, l'arrivo in prossimità del bersaglio è previsto per l'ultimo trimestre del 2026 [Michel et al., 2022, 2025; Popescu et al., 2025]. La sequenza di cattura prenderà avvio il 14 dicembre 2026 tramite cinque manovre successive, culminando nell'inserimento orbitale tra la fine di gennaio e l'inizio di febbraio 2027 [Michel et al., 2022].

## 4.6 Strategia Operativa e Fasi di Prossimità

A seguito dell'inserimento orbitale, le operazioni di prossimità dureranno almeno 6 mesi [Michel et al., 2025] e si articoleranno in cicli di pianificazione fissi, secondo l'articolazione delle distanze e delle risoluzioni mostrata nella Figura 4.12, riutilizzando il modello strutturale collaudato con successo durante la missione Rosetta dell'ESA [Lodiot and Guerbuez, 2025]. La gestione delle operazioni terrà conto dei rigidi vincoli di puntamento dell'antenna ad alto guadagno, che forza la sonda ad alternare il tracciamento verso la Terra per le telecomunicazioni a quello verso l'asteroide per la raccolta dati, mentre un link intersatellitare operante in modalità sporadica garantirà comunicazioni *uplink/downlink* costanti con i CubeSat [Lodiot and Guerbuez, 2025].



**Figura 4.12:** Andamento delle distanze operative e della risoluzione spaziale delle fotocamere *Asteroid Framing Cameras* (AFCs) durante le fasi di prossimità. Il grafico illustra la progressione dalla fase *Early Characterization Phase* (ECP) (40-20 km), al *Payload Deployment Phase* (PDP), fino alla *Detailed Characterization Phase* (DCP) (10 km) e alle osservazioni ravvicinate (*Close Observation Phase* (COP) e *Experimental Phase* (EXP)) condotte a quote inferiori a 1 km per il raggiungimento della massima risoluzione spaziale. Immagine adattata da Michel et al. [2022].

#### 4.6.1 Dalle prime acquisizioni alle indagini di dettaglio

La *Early Characterization Phase* (ECP) avrà una durata di 6 settimane, durante le quali la sonda percorrerà archi iperbolici mantenendosi tra 40 e 20 km di distanza dal sistema [Popescu et al., 2025; Michel et al., 2022]. Questa fase tratterà la forma globale, la massa e il campo gravitazionale con una risoluzione spaziale iniziale di  $2 - 3 \text{ m pixel}^{-1}$  [Michel et al., 2022].

Successivamente, la *Payload Deployment Phase* (PDP) costituirà una finestra di 2 settimane interamente dedicata al rilascio orbitale e al supporto operativo per i CubeSat Juventas e Milani, con l'avvio della fase di *commissioning* dei loro strumenti [Michel et al., 2022; Popescu et al., 2025].

Seguirà la *Detailed Characterization Phase* (DCP), estesa per 4 settimane a un'altitudine minima di 10 km [Popescu et al., 2025; Michel et al., 2022]. Questa fase consentirà una mappatura termica, spettrale e dell'interno a scala metrica ( $1 - 2 \text{ m pixel}^{-1}$ ). Operando con angoli di fase variabili da  $70^\circ$  a  $0^\circ$ , la strumentazione (in particolare HS-H a circa 5 m/macropixel) potrà investigare l'effetto di opposizione fotometrica [Michel et al., 2022; Popescu et al., 2025].

#### 4.6.2 Close Observation ed Experimental Phase

La *Close Observation Phase* (COP), distribuita su 6 settimane, ridurrà il pericentro a quote comprese tra i 4.5 e i 4 km [Michel et al., 2022; Popescu et al., 2025]. Durante i 12 *flyby* ravvicinati ( $0.5 - 2 \text{ m pixel}^{-1}$ ), si mapperà il sito d'impatto ad alti angoli di

fase e la sonda madre fornirà supporto ottico e logistico mentre i CubeSat eseguiranno le rispettive manovre di atterraggio [Michel et al., 2022; Popescu et al., 2025].

Infine, l'*Experimental Phase* (EXP), della durata di 6 settimane, sfrutterà tecniche di navigazione sperimentali basate su *feature tracking* e LIDAR per gestire passaggi a quote inferiori a 1 km [Michel et al., 2022; Popescu et al., 2025]. Cinque *flyby* ad altissima vicinanza permetteranno allo strumento HS-H di raggiungere risoluzioni di 0.2 m/subpixel ( $< 1$  m/macropixel), prima che la missione termini con l'atterraggio della sonda madre sulla superficie di Didymos [Michel et al., 2022; Popescu et al., 2025].

## 4.7 Risultati Attesi e Validazione dei Modelli di Difesa Planetaria

A differenza delle stime ottenute prima dell'arrivo di Hera, i dati fotogrammetrici riveleranno l'aspetto post-impatto di un nuovo ambiente geologico in cui i massi presenti nel sito colpito sono stati vaporizzati o scagliati nello spazio profondo [Michel et al., 2025]. L'utilizzo combinato delle AFCs per la determinazione accurata dei volumi, del radar JuRa per il sondaggio della macroporosità e dell'indagine RSE per la misurazione diretta della massa eliminerà le approssimazioni attualmente gravanti sulle proprietà del sistema, le cui stime sono riportate nelle Sezioni 3.1.1 e 3.1.2 [Michel et al., 2022].

Le previsioni sulla dinamica dell'impatto dipendono fortemente dalle condizioni strutturali iniziali del bersaglio [Michel et al., 2022]. Fornire ai modelli numerici di impatto la reale distribuzione della porosità interna e accertare l'effettivo grado di coesione permetterà di comprendere in modo più approfondito i meccanismi fisici di dissipazione dell'energia [Michel et al., 2022, 2025]. Questa validazione sul campo consentirà il calcolo definitivo del parametro di amplificazione, discusso in precedenza nella Sezione 3.5.4, garantendo l'extrapolazione rigorosa delle leggi di scala e delle metodologie di deflessione cinetica per la futura applicazione a minacce asteroidali reali [Michel et al., 2022; Chabot et al., 2024].

# Conclusioni

La missione DART ha dimostrato la fattibilità tecnica dell’impatto cinetico per la deflessione di un asteroide, riducendo il periodo orbitale di Dimorphos di  $33.0 \pm 1.0$  minuti [Thomas et al., 2023]. Tuttavia, l’architettura dell’esperimento — che culmina con la distruzione dell’impattatore — ha precluso la determinazione diretta della massa del bersaglio, lasciando il fattore di amplificazione  $\beta$  vincolato solo entro l’intervallo 2.2 – 4.9 [Deshapriya et al., 2023; Raducan et al., 2024]. Analogamente, l’assenza di osservazione diretta del sito d’impatto e della struttura interna di Dimorphos ha reso le stime sulla coesione ( $< 500$  Pa) e sulla porosità ( $\sim 30\%$ ) mere deduzioni indirette, non validate [Daly et al., 2023; Raducan et al., 2024].

La missione Hera dell’ESA cercherà di rispondere a queste ambiguità fornendo le grandezze mancanti. La misura diretta della massa di Dimorphos tramite radio scienza fisserà  $\beta$  con precisione, eliminando l’incertezza dominante nei modelli di deflessione [Michel et al., 2022, 2025]. La tomografia radar condotta dal CubeSat Juventas sonderà per la prima volta la struttura interna di un aggregato gravitazionale, verificando se la bassa coesione e l’elevata porosità ipotizzate si estendano all’intero volume [Michel et al., 2022]. Le immagini ad alta risoluzione delle AFCs e di HS-H discrimineranno infine tra la formazione di un cratere convenzionale e una deformazione globale del satellite, fornendo il riscontro osservativo ai modelli di impatto [Michel et al., 2025; Popescu et al., 2025].

Prima di raggiungere Didymos, HS-H ha acquisito dati durante il *flyby* di Marte del 12 marzo 2025, offrendo l’opportunità di testare le procedure di classificazione spettrale su un target noto. In questa tesi, tali dati sono stati analizzati utilizzando una procedura di classificazione basata sulla tassonomia di Muhlke, selezionando sei regioni di interesse su due dataset complementari: una visione globale dell’intero disco marziano e una porzione più dettagliata degli altopiani meridionali. La classificazione ha permesso di identificare le principali province geologiche marziane — Arabia Terra, Syrtis Major, il Bacino di Hellas, Terra Sabaea e Noachis Terra — con una distribuzione delle classi tassonomiche coerente con i modelli litologici consolidati in letteratura [Murchie et al., 2019; Viviano-Beck et al., 2014]. In particolare, Syrtis Major è risultata associata a classi mafiche (M, O, D), tipiche di *bedrock* vulcanico ricco in pirosseni e olivina, mentre Arabia Terra e le pianure settentrionali sono dominate da classi P e R, interpretabili come spettri appiattiti compatibili con coperture di polveri ossidate. L’analisi ha tuttavia evidenziato un limite metodologico fondamentale: su scala di dettaglio (20-30 macropixel), la procedura di classificazione ha mostrato una dominanza quasi esclusiva della classe Q, in forte discrepanza con le attese litologiche

per gli altopiani meridionali. Questo risultato è interpretabile come un artefatto dovuto al *mixing* spettrale indotto da un *footprint* spaziale eccessivamente ampio, che appiattisce gli spettri e favorisce la selezione della classe spettralmente meno vincolata [Mahlke et al., 2022]. Inoltre, l'assenza di correzione degli effetti atmosferici introduce ulteriori distorsioni, rendendo i risultati una caratterizzazione spettrale di primo ordine piuttosto che una mappatura mineralogica quantitativa definitiva [Murchie et al., 2019]. Nonostante queste limitazioni, lo studio ha dimostrato l'idoneità della procedura di classificazione per l'analisi su larga scala dei dati di HS-H, fornendo al contempo indicazioni utili per future applicazioni ad alta risoluzione, in particolare per quanto riguarda l'ottimizzazione del campionamento spaziale e l'adozione di tecniche di separazione spettrale.

La validazione delle procedure di classificazione su Marte costituisce un banco di prova per le osservazioni che Hera condurrà su Didymos. In questo quadro più ampio, l'insieme dei dati raccolti da DART e Hera trasformerà un singolo esperimento cinetico in un laboratorio di scala planetaria completamente caratterizzato. Le condizioni iniziali dell'impatto, quali massa, velocità e geometria dell'impattatore, sono note con precisione, mentre le condizioni finali, ovvero massa residua, struttura interna e morfologia post-impatto di Dimorphos, vengono misurate direttamente da Hera. Questa base dati permetterà di validare i codici numerici di impatto iperveloce in microgravità e di estrapolare leggi di scala affidabili per future minacce reali [Michel et al., 2022; Chabot et al., 2024]. Al di là della difesa planetaria, la caratterizzazione senza precedenti di un sistema binario giovane, con un'età superficiale di Dimorphos inferiore a 0.3 Myr, offre un vincolo empirico diretto ai modelli di formazione per *mass shedding* rotazionale [Polishook et al., 2023; Raducan et al., 2024; Chabot et al., 2024], contribuendo in modo decisivo alla comprensione dell'evoluzione collisionale dei piccoli corpi [Polishook et al., 2023; Raducan et al., 2024].

L'eredità tecnologica e operativa di Hera si proietta già verso future iniziative di difesa planetaria. In particolare, la missione *Rapid Apophis Mission for Space Safety* (RAMSES), attualmente in fase di studio presso l'ESA, intende applicare gran parte dell'architettura sviluppata per Hera — inclusa la sinergia tra sonda madre e CubeSat — allo studio ravvicinato dell'asteroide near-Earth 99942 Apophis durante il suo passaggio critico con la Terra [Okada et al., 2026; Lazzarin et al., 2025]. Esempi concreti di questa continuità tecnologica sono numerosi: il thermal infrared imager TIRI [Okada et al., 2026], la camera iperspettrale HAMLET (versione avanzata di HS-H) [Palomba et al., 2025], l'analizzatore di polveri e volatili VISTA [Dirri et al., 2025], oltre alle camere ottiche AFCs e all'esperimento di radio scienza, tutti derivati direttamente dall'architettura di Hera [Lazzarin et al., 2025]. Il successo di Hera costituisce pertanto non solo il completamento del primo test di deflessione cinetica, ma anche il fondamento tecnologico per una nuova generazione di missioni di caratterizzazione e mitigazione del rischio asteroidale.

# Bibliografia

- M. F. A'Hearn, M. J. S. Belton, W. A. Delamere, J. Kissel, K. P. Klaasen, L. A. McFadden, K. J. Meech, H. J. Melosh, P. H. Schultz, J. M. Sunshine, P. C. Thomas, J. Veverka, D. K. Yeomans, et al. Deep impact: Excavating comet tempel 1. *Science*, pages 258–264, 2005.
- M. Arakawa, T. Saiki, K. Wada, K. Ogawa, T. Kadono, K. Shirai, H. Sawada, K. Ishibashi, R. Honda, N. Sakatani, Y. Iijima, et al. An artificial impact on the asteroid (162173) ryugu formed a crater in the gravity-dominated regime. *Science*, pages 67–71, 2020.
- Ronald Ballouz, Andy Rivkin, Colby Merrill, et al. A gravity tractor mission concept to a binary asteroid. In *EPSC-DPS Joint Meeting 2025*, pages EPSC–DPS2025–645, 2025.
- Brent W. Barbee, Justin Atchison, Rylie Bull, Mary Burkey, Wendy K. Caldwell, Paul Chodas, Jessie Dotson, Davide Farnocchia, Kelly Fast, et al. Nasa analysis of space mission options for the 2025 planetary defense conference hypothetical asteroid impact threat scenario. *Acta Astronautica*, pages 249–280, 2026.
- R. P. Binzel, A. S. Rivkin, J. S. Stuart, A. W. Harris, S. J. Bus, and T. H. Burbine. Observed spectral properties of near-earth objects: results for population distribution, source regions, and space weathering processes. *Icarus*, 170(2):259–294, 2004. doi: 10.1016/j.icarus.2004.04.004.
- Richard P. Binzel, Vishnu Reddy, and Tasha Dunn. The near-earth object population: Connections to comets, main-belt asteroids, and meteorites. In Patrick Michel, Francesca E. DeMeo, and William F. Bottke, editors, *Asteroids IV*, pages 243–256. University of Arizona Press, 2015.
- Claudio Bombardelli, Hodei Urrutxua, Mario Merino, Jesús Peláez, and Eduardo Ahedo. The ion beam shepherd: A new concept for asteroid deflection. *Acta Astronautica*, 90:98–102, 2013.
- William F. Bottke, Miroslav Brož, David P. O'Brien, Adriano Campo Bagatin, Alessandro Morbidelli, and Simone Marchi. The collisional evolution of the main asteroid belt. In Patrick Michel, Francesca E. DeMeo, and William F. Bottke, editors, *Asteroids IV*, pages 701–724. University of Arizona Press, 2015.

- Nancy L. Chabot et al. Achievement of the planetary defense investigations of the double asteroid redirection test (dart) mission. *The Planetary Science Journal*, 5: 49, 2024.
- R. Terik Daly, Carolyn M. Ernst, Olivier S. Barnouin, et al. Successful kinetic impact into an asteroid for planetary defense. *Nature*, 616:443–447, 2023.
- Francesca E. DeMeo, Conel M. O’D. Alexander, Kevin J. Walsh, Clark R. Chapman, and Richard P. Binzel. The compositional structure of the asteroid belt. In Patrick Michel, Francesca E. DeMeo, and William F. Bottke, editors, *Asteroids IV*, pages 13–41. University of Arizona Press, 2015.
- J. D. P. Deshapriya et al. Characterization of the dart impact ejecta plume on dimorphos from liciacube observations. *The Planetary Science Journal*, 4:231, 2023.
- Fabrizio Dirri, Chiara Gisellu, Ernesto Palomba, Andrea Longobardo, Enrico Nardi, Emiliano Zampetti, Diego Scaccabarozzi, and Margherita Cardi. Vista payload for esa ramses mission. In *EPSC-DPS Joint Meeting 2025*, 2025. id. EPSC-DPS2025-1717.
- T. L. Dunn, T. H. Burbine, W. F. Bottke, and J. P. Clark. Mineralogies and source regions of near-earth asteroids. *Icarus*, 222(1):273–282, 2013. doi: 10.1016/j.icarus.2012.11.007.
- M. J. Gaffey, J. F. Bell, R. H. Brown, T. H. Burbine, J. L. Piatek, K. L. Reed, and D. A. Chaky. Mineralogical variations within the s-type asteroid class. *Icarus*, 106 (2):573–602, 1993.
- Kirsten Howley, Robert Managan, and Joseph Wasem. Blow-off momentum from melt and vapor in nuclear deflection scenarios. *Acta Astronautica*, pages 376–381, 2014.
- Michael Kueppers, Patrick Michel, Alan Fitzsimmons, Simon F. Green, Monica Lazzarin, Stephan Ulamec, Paul Abell, S. Sugita, Jean-Baptiste Vincent, Julia de Leon, Marcel Popescu, Tatsuaki Okada, Ian Carnelli, Paolo Martino, and the Hera Science Team. Esa’s hera mission at mars. In *8th Planetary Sciences and Solar System Exploration Congress (CPESS-8)*, 2025. abstract.
- Monica Lazzarin, Patrick Michel, Michael Kueppers, Simon Green, Paolo Tortora, Stephan Ulamec, Jean-Baptiste Vincent, Paul Abell, Seiji Sugita, and Paolo Martino. Ramses: A european rendezvous mission to study tidal effects on the near-earth asteroid apophis during its 2029 close encounter with the earth. In *EPSC-DPS Joint Meeting 2025*, 2025. id. EPSC-DPS2025-806.
- Monica Lazzarin, Fiorangela La Forgia, Andrea Farina, Alessandra Migliorini, Elisa Frattin, Paolo Ochner, et al. Spectroscopic insights into the near-earth didymos-dimorphos binary system following the double asteroid redirection test (dart) mission impact. *Nature Communications*, 17:551, 2026.

- Zhong-Yi Lin, Jean-Baptiste Vincent, and Wing-Huen Ip. Physical properties of the didymos system before and after the dart impact. *Astronomy & Astrophysics*, 676: A116, 2023.
- Sylvain Lodiot and Caglayan Guerbuez. Hera esoc/esa operations: First months in flight and asteroid phase planning concepts. *Space Science Reviews*, 221:89, 2025.
- M. Mahlke, B. Carry, C. A. L. Bailer-Jones, A. Cellino, F. E. DeMeo, E. Dotto, M. Marsset, M. Popescu, T. Santana-Ros, P. Tanga, D. Trilling, I. P. Williams, and A. Zinzi. Asteroid taxonomy from cluster analysis of spectrometry and albedo. *Astronomy & Astrophysics*, 652:A26, 2022. doi: 10.1051/0004-6361/202244106.
- Jean-Luc Margot, Petr Pravec, Patrick Taylor, Benoît Carry, and Seth Jacobson. Asteroid systems: Binaries, triples, and pairs. In Patrick Michel, Francesca E. DeMeo, and William F. Bottke, editors, *Asteroids IV*, pages 355–374. University of Arizona Press, 2015.
- Patrick Michel, Derek C. Richardson, Daniel D. Durda, Martin Jutzi, and Erik Asphaug. Collisional formation and modeling of asteroid families. In Patrick Michel, Francesca E. DeMeo, and William F. Bottke, editors, *Asteroids IV*, pages 341–354. University of Arizona Press, 2015.
- Patrick Michel, Michael Küppers, Adriano Campo Bagatin, et al. The esa hera mission: Detailed characterization of the dart impact outcome and of the binary asteroid (65803) didymos. *The Planetary Science Journal*, 3:160, 2022.
- Patrick Michel, Michael Küppers, Alan Fitzsimmons, Simon F. Green, Monica Lazzarin, et al. The hera space mission in the context of small near-earth asteroid missions in the past, present and future. *Space Science Reviews*, 221:70, 2025.
- S. L. Murchie, J.-P. Bibring, R. E. Arvidson, J. L. Bishop, J. Carter, B. L. Ehlmann, Y. Langevin, J. F. Mustard, F. Poulet, L. Riu, K. D. Seelos, and C. E. Viviano. Visible to short-wave infrared spectral analyses of Mars from orbit using CRISM and OMEGA. In J. L. Bishop, J. F. III Bell, and J. E. Moersch, editors, *Remote Compositional Analysis: Techniques for Understanding Spectroscopy, Mineralogy, and Geochemistry of Planetary Surfaces*, pages 453–483. Cambridge University Press, 2019. doi: 10.1017/9781316888872.025.
- Tatsuaki Okada, Satoshi Tanaka, Naoya Sakatani, et al. Thermal infrared imager tiri onboard hera and ramses missions. *Acta Astronautica*, 240:888–892, 2026.
- Ernesto Palomba, Marianna Angrisani, Vincenzo Della Corte, Marco Esposito, Andrea Longobardo, Fabrizio Dirri, Chiara Gisellu, Lavinia Arpaia, Marcel Popescu, and Julia De Leon. Monitoring surface evolution of apophis during its 2029 earth flyby: the role of hamlet on esa’s ramses mission. In *EPSC-DPS Joint Meeting 2025*, 2025. id. EPSC-DPS2025-1607.
- David Polishook, Francesca E. DeMeo, Brian J. Burt, Cristina A. Thomas, Andrew S. Rivkin, Juan A. Sanchez, and Vishnu Reddy. Near-ir spectral observations of the didymos system: Daily evolution before and after the dart impact indicates that dimorphos originated from didymos. *The Planetary Science Journal*, 4:229, 2023.

- Marcel M. Popescu, Julia de León, George Pantelimon Prodan, et al. Hyperscout-h: The hyperspectral imager for the esa hera mission. *Space Science Reviews*, 221: 112, 2025.
- P. Pravec and A. W. Harris. Binary asteroid population. 1. angular momentum content. *Icarus*, 190:250–259, 2007.
- G. P. Prodan, M. Popescu, J. de León, G. Kovács, M. Küppers, et al. In-flight calibration of esa hera’s hyperscout-h imager. *Icarus*, 454:117081, 2026.
- S. D. Raducan, M. Jutzi, A. F. Cheng, G. S. Collins, R. T. Daly, T. M. Davison, F. Ferrari, M. Hirabayashi, K. M. Kumamoto, P. Michel, N. Murdoch, R. Nakano, M. Pajola, A. Rossi, et al. Physical properties of asteroid dimorphos as derived from the dart impact. *Nature Astronomy*, page 445, 2024.
- D. J. Scheeres, D. Britt, B. Carry, and K. A. Holsapple. Asteroid interiors and morphology. In Patrick Michel, Francesca E. DeMeo, and William F. Bottke, editors, *Asteroids IV*, pages 745–766. University of Arizona Press, 2015.
- Nicolas Thiry and Massimiliano Vasile. Statistical multi-criteria evaluation of non-nuclear asteroid deflection methods. *Acta Astronautica*, 140:293–307, 2017.
- Cristina A. Thomas, Shantanu P. Naidu, Peter Scheirich, et al. Orbital period change of dimorphos due to the dart kinetic impact. *Nature*, 616:448–451, 2023.
- C. E. Viviano-Beck, F. P. Seelos, S. L. Murchie, E. G. Kahn, K. D. Seelos, H. W. Taylor, K. Taylor, B. L. Ehlmann, S. M. Wiseman, J. F. Mustard, and M. F. Morgan. Revised CRISM spectral parameters and summary products based on the currently detected mineral diversity on Mars. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 119(6):1403–1431, 2014. doi: 10.1002/2014JE004627.
- David Vokrouhlický, William F. Bottke, Steven R. Chesley, Daniel J. Scheeres, and Thomas S. Statler. The yarkovsky and yorp effects. In Patrick Michel, Francesca E. DeMeo, and William F. Bottke, editors, *Asteroids IV*, pages 509–531. University of Arizona Press, 2015.
- Kevin J. Walsh and Seth A. Jacobson. Formation and evolution of binary asteroids. In Patrick Michel, Francesca E. DeMeo, and William F. Bottke, editors, *Asteroids IV*, pages 375–393. University of Arizona Press, 2015.