



Università degli Studi di Padova

DIPARTIMENTO DI FISICA E ASTRONOMIA "GALILEO GALILEI"

Corso di Laurea in Astronomia

TESI DI LAUREA TRIENNALE

Caratterizzazione spettroscopica del sistema di Didymos dopo l'impatto con la sonda DART

Relatrice:

Prof.ssa Monica Lazzarin

Correlatrice:

Prof.ssa Fiorangela La Forgia

Candidato:

Gabriele Bertinelli

Anno Accademico 2021-2022

Alla mia famiglia

"Complete the motion if you stumble"
RHCP

Sommario

Qui ci sarà il riassunto della tesi.

16 novembre 2022 è la data dell'inizio di una nuova era di missione spaziali: l'era delle missioni Artemis, che si ripromettono di riportare sulla Luna l'essere umano.

Alle 07:47, ora italiana, il razzo Space Launch System di NASA ha illuminato a giorno il pad 39-B al Kennedy Space Center, dando inizio alla missione Artemis I. Scopo della missione è testare SLS nel suo complesso, razzo, capsula, sottosistemi, procedure ecc. Dopo 26 giorni di missione, l'11 dicembre, la capsula Orion rientrerà nell'Oceano Pacifico, al largo delle coste di San Diego.

Questa mattina, dopo qualche problema nei centri di controllo, il lancio è stato nominale: i booster migliorati, ereditati dalle missioni Shuttle, hanno performato bene; il core centrale di SLS (il cilindro arancione) idem; i 4 pannelli solari del Service Module, costruito dall'ESA (con grande contributo italiano) si sono aperti nel modo corretto e stanno generando la corrente elettrica necessaria. Attorno alle 09:14 è iniziata la Trans Lunar Injection Maneuver, manovra per spostarsi dall'orbita terrestre a quella lunare, durata 18 minuti (un record per il motore RL10). Tutto è andato come previsto e Orion è in rotta verso la Luna.

I prossimi step sono la separazione dell'ICPS, il 2o stadio che ha permesso le ultime due manovre, correzioni dell'orbita e il rilascio di 13 cubesat, tra cui ArgoMoon: cubesat costruito da Argotec e ASI, azienda aerospaziale italiana, con l'obiettivo di monitorare da vicino tutte le operazioni che compirà la Orion attorno alla Luna.

Nei prossimi giorni seguiranno aggiornamenti sulla missione.

Indice

1	Corpi minori del Sistema Solare	1
1.1	Distribuzione e classificazione dinamica	1
1.2	Potentially Hazardous Asteroids	4
2	Spettroscopia	7
2.1	Introduzione	7
2.2	Spettro degli asteroidi	8
2.3	Tipi tassonomici	8
2.3.1	Tassonomia di Tholen	8
2.3.2	Tassonomia di Bus	13
2.4	Space Weathering (foorse)	14
3	La missione DART	15
3.1	La difesa planetaria	16
3.1.1	Impattatore cinetico	16
3.2	Double Asteroid Redirection Test	17
3.2.1	Strumentazione	17
3.2.2	Missione primaria	19
3.3	Missioni future	19

Elenco delle tabelle

1.1	Lista e definizioni delle principali popolazioni di asteroidi . . .	2
-----	---	---

Elenco delle figure

1.1	Visualizzazione delle orbite dei PHA conosciuti.	5
2.1	Esempio di spettri di tipo Q, S e A.	9
2.2	Esempio di spettri di tipo V e R.	10
2.3	Esempio di spettri di tipo B, G e C.	11
2.4	Esempio di spettro di tipo D.	12
2.5	Esempio di spettri di tipo E e M.	12
2.6	Esempio di spettro di tipo T.	13
2.7	Spettri dei tipi tassonomici introdotti da Bus e Binzel.	14
3.1	Logo della missione DART	15
3.2	La sonda DART nella clean room.	18
3.3	Timeline della missione Hera.	20

Capitolo 1

Corpi minori del Sistema Solare

Dal 1801, quando Giuseppe Piazzi scoprì il primo corpo minore Cerere, categorizzato poi come asteroide, per sottolineare le differenze apparenti rispetto alle comete, si sono scoperti e categorizzati più di 1 milione di asteroidi¹. La maggior parte orbita tra Marte e Giove e forma quella che è chiamata Main Belt (2-3.3 AU).

Esistono numerosi gruppi di asteroidi, a diverse distanze dal Sole. Nella Tabella 1.1 sono riportati i principali gruppi e famiglie, con le loro classificazioni dinamiche.

In questo capitolo verranno descritte brevemente le principali caratteristiche. La loro definizione è spesso legata alla risonanza con Giove o Nettuno, mentre altri gruppi sono definiti dall'intersezione della loro orbita con quella di un pianeta (i.e. Near Earth Objects e Mars Crossers).

1.1 Distribuzione e classificazione dinamica

In questo capitolo verrà descritta la classificazione in gruppi e famiglie. La classificazione è riassunta nella Tabella 1.1.

I corpi minori sono divisi in gruppi e famiglie in base alle loro caratteristiche orbitali. Groups are relatively loose dynamical associations, whereas families are tighter e sono probabilmente il risultato di una distruzione catastrofica di un asteroide “genitore” (in inglese è tutto così bello “parent asteroid”).

¹<https://solarsystem.nasa.gov/asteroids-comets-and-meteors/asteroids/overview/>

Popolazione	Famiglia/Gruppo	a	q	Q	Commento
NEAs					
	Atens	< 1		≥ 0.983	Earth Crossers
	Apollos	> 1	≤ 1.017		Earth Crossers
	Amors	> 1	(1.017, 1.3)		
Mars Crossers			[1.3, 1.67]		
Popolazione	Famiglia/Gruppo	a	e	i	Risonanze
Main Belt Asteroids					
	Hungarians	[1.78, 2.06]	< 0.18	[16, 34]	[5 : 1, 4 : 1]
	Inner MB	[2.06, 2.50]		[18, 32]	[4 : 1, 3 : 1]
	Middle MB	[2.50, 2.82]			[3 : 1, 5 : 2]
	Outer MB	[2.82, 3.28]			[5 : 2, 2 : 1]
	Cybeles	[3.28, 3.70]	< 0.3	< 25	[2 : 1, 5 : 3]
	Hildas	~ 3.97	> 0.07	< 20	3 : 2
Jupiter Trojans		~ 5.20		1 : 1	
Centauri		[5.4, 30]			
Neptune Trojans		~ 30		1:1 Nep	
TNOs (o KBOs)		> 32		[4 : 5, 2 : 3] [3 : 5, 1 : 2]	

Tabella 1.1: Lista e definizioni dei principali gruppi e famiglie di asteroidi. Il semiasse maggiore a , il perielio q e l'afelio Q sono espressi in AU; l'inclinazione i in gradi. e è l'eccentricità. Le risonanze, dove non è indicato, si riferiscono all'orbita di Giove.

Per la classificazione è utile conoscere le definizioni analitiche di afelio e perielio di un'orbita:

$$\begin{cases} Q = a(1 + e) & \text{afelio} \\ q = a(1 - e) & \text{perielio} \end{cases} \quad (1.1)$$

dove a e e sono rispettivamente il semiasse maggiore e l'eccentricità dell'orbita.

Near Earth Objects I Near Earth Objects (NEOs) rappresentano un gruppo eterogeneo di asteroidi (NEAs) e nuclei cometari estinti (NECs) che hanno orbite con un perielio minore di quello di Marte: $q < 1.3$ AU. Si ritiene che i NEOs siano la principale fonte di meteoriti che arrivano sulla Terra. In base alla relazione tra la loro orbita e quella della Terra sono catalogati in diversi sotto-gruppi: *Atens* e *Apollo* sono Earth Crossers (i.e. intersecano l'orbita della Terra), mentre gli *Amors* si avvicinano alla Terra ma non intersecano mai la sua orbita. Gli *Atens* hanno un semiasse maggiore più piccolo di quello della Terra ($a < 1$ AU) mentre gli *Apollo* hanno $a > 1$ AU.

Mars Crossers Come fa intendere il nome, i *Mars Crossers* sono oggetti che intersecano l'orbita di Marte.

È stato mostrato che la popolazione dei Mars Crossers, che è circa 4 volte più grande di quella dei NEOs, è rifornita da risonanze diffusive nella Main Belt (Migliorini et al. 1998; Morbidelli & Nesvorny 1999; Michel et al. 2000; Bottke et al. 2002), dalla regione chiamata “intermediate-source Mars-crossing region” o IMC.

Main Belt Asteroids Si tratta di asteroidi situati tra le orbite di Marte e Giove. La maggior concentrazione si trova tra 2.0 e 3.3 AU.

A causa delle risonanze orbitali dovute all’influenza gravitazionale di Giove, si vengono a creare molti gruppi, sotto-gruppi e famiglie. Di seguito sono riportati i più popolosi.

Hungaria: prendono il nome da (434) Hungaria. Hanno un semiasse maggiore tra 1.78 e 2.06 AU, un’eccentricità minore di 0.18 e un’inclinazione tra 16° e 34°.

Inner Main Belt: hanno un semiasse maggiore tra 2.06 e 2.50 AU, limiti definiti dalle risonanze di moto medio 4:1 e 3:1.

Middle Main Belt: hanno un semiasse maggiore tra 2.50 e 2.82 AU. I limiti sono definiti dalle risonanze di moto medio 3:1 e 5:2.

Outer Main Belt: hanno un semiasse maggiore tra 2.82 e 3.28 AU. All’interno del gruppo troviamo le famiglie *Koronis*, *Eos* e *Themis*.

Cybele: hanno un semiasse maggiore tra 3.28 e 3.70 AU. Prendono il nome da (65) Cybele.

Hilda: hanno un semiasse maggiore medio tra 3.70 e 4.20 AU. Prendono il nome da (153) Hilda.

Jupiter Family Comets Le comete sono divise in due gruppi: comete a lungo periodo e comete a corto periodo.

Le comete a corto periodo hanno un periodo orbitale < 20 anni a basse inclinazioni. Hanno anche $2 < T_J < 3$, con T_J Invariante di Tisserand, espressa da

$$T_J = \frac{a_J}{a} + 2 \cos(i) \left[\frac{a}{a_J} (1 - e) \right]^{1/2} \quad (1.2)$$

dove a e a_J sono i semiassi maggiori dell’oggetto e di Giove rispettivamente ed e è l’eccentricità dell’oggetto.

Visto che la loro orbita è controllata da Giove sono chiamate Jupiter Family Comets (JFCs). Si pensa che le comete a corto periodo provengano dalla Kuiper Belt, una grande riserva di piccoli corpi ghiacciati che si trova oltre Nettuno. A causa di collisioni e/o perturbazioni gravitazionali alcuni oggetti

della Kuiper Belt riescono a fuggire dalla stessa e dirigersi verso il Sistema Solare interno. La successiva interazione con Giove può far sì che questi oggetti assumano parametri orbitali simili a quelli degli asteroidi.

Centaurs I Centaurs sono oggetti che orbitano tra Giove e Nettuno ($5.4 < a < 30$ AU), ma non hanno ancora una definizione dinamica univoca.

Studi dinamici delle loro orbite indicano che i centaurs sono probabilmente degli oggetti con caratteristiche orbitali intermedie tra quelli della Kuiper Belt e le JFCs.

Sono probabilmente più simili a comete che ad asteroidi, e uno di questi, Chiron, è stato osservato avere attività cometaria.

Trans Neptunian Objects Sono oggetti con $a \geq 30$ AU e sono divisi nei seguenti gruppi:

Kuiper Belt Objects: si trovano tra 41 e 47 AU. A sua volta si divide nei sotto-gruppi dei *Plutinos*, in risonanza 3:2 con Nettuno come Plutone e dei *Cubewanos*, conosciuti come i classici KBOs.

Scattered-Disk Objects (SDOs): hanno orbite molto grandi e molto elittiche, probabilmente dovute a un'interazione con Nettuno.

Oort Cloud Objects (OCOs): la Oort Cloud è una shell sferica di oggetti ghiacciati, di cui non si ha evidenza diretta perché troppo lontana e scura ma ipotizzata come luogo di origine delle comete a lungo/lunghissimo periodo. Si trova tra circa 50000 e 100000 AU.

1.2 Potentially Hazardous Asteroids

Tra i NEO esiste una categoria di oggetti che riveste un ruolo importante: sono gli asteroidi potenzialmente pericolosi, Potentially Hazardous Asteroids (PHA). Rientrano in questa categoria tutti gli oggetti la cui minima distanza all'intersezione dell'orbita terrestre (Minimum Orbit Intersection Distance - MOID) è inferiore a 0.05 AU e la cui magnitudine assoluta H è minore di 22. Sono, quindi, quegli asteroidi che se impattassero con la Terra provocherebbero danni su larga scala, anche globale. Ad oggi si conoscono più di 2500 PHA, la maggior parte dei quali sono della famiglia Apollo, e ogni giorno vengo aggiunti o rimossi oggetti sulla base di nuovi risultati sulla base dei parametri orbitali.

La determinazione dell'orbita avviene sulla base delle osservazioni disponibili ed è definita da sei parametri orbitali, influenzati da diversi fattori. Quindi non si può determinare immediatamente con sufficiente accuratezza l'orbita ma servono osservazioni costanti nel tempo.

Al momento della scoperta di un PHA si determina l'orbita per i successivi 100 anni. Si possono determinare in tal modo i passaggi ravvicinati (fly-by)

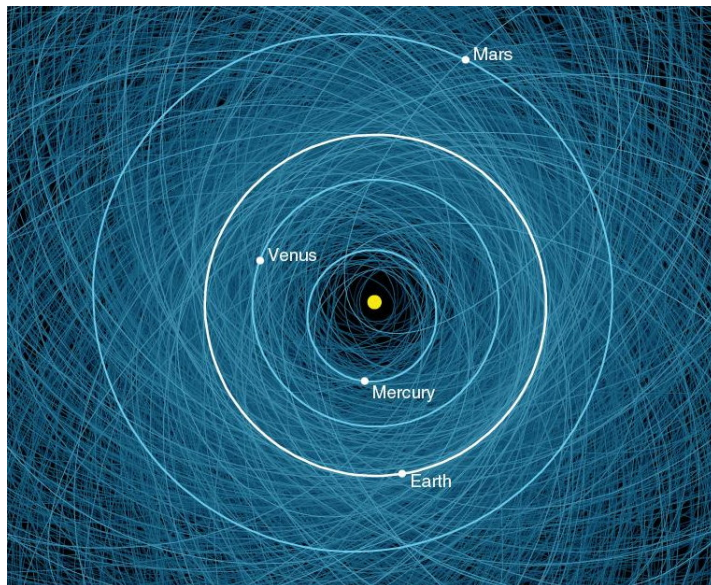


Figura 1.1: Visualizzazione delle orbite dei PHA conosciuti. Si nota come la zona intorno all'orbita terrestre sia molto popolata. (NASA/JPL-Caltech)

che l'asteroide avrà con la Terra e, conoscendo la regione di incertezza, la probabilità di collisione con la stessa.

I PHA con una probabilità non nulla di impatto con la Terra nei futuri 100 anni vengono catalogati nella Sentry Risk Table², un sistema informatico gestito dal CNEOS (Center for Near-Earth Object Studies).

Oltre alla probabilità di collisione e alcune caratteristiche dell'oggetto (magnitudine assoluta, diametro) nella Tabella 1.1 vengono riportati i valori dell'asteroide sulla Scala Torino e Scala Palermo. Queste sono due classificazioni che permettono di quantificare il pericolo associato ad ogni asteroide: la Scala Torino è stata pensata per la comunicazione al pubblico, la Scala Palermo è più tecnica e viene usata direttamente dagli astronomi.

²<https://cneos.jpl.nasa.gov/sentry/>

Capitolo 2

Spettroscopia

2.1 Introduzione

Lo studio della mineralogia superficiale di singoli asteroidi o di gruppi di asteroidi può fornire i dati per migliorare la nostra comprensione della loro origine ed evoluzione. La superficie degli asteroidi può essere studiata dall'interpretazione delle proprietà osservabili per determinare la presenza, l'abbondanza e la composizione mineralogica.

La spettroscopia di riflettanza nel visibile (VIS) e nell'infrarosso (IR) viene ampiamente usata per determinare la composizione degli asteroidi poiché può caratterizzare la composizione superficiale della maggior parte dei tipi di asteroidi. Le caratteristiche diagnostiche negli spettri, che derivano da transizioni elettroniche e vibrazionali all'interno dei minerali e delle molecole, sono riscontrabili nell'intervallo di frequenza $0.35 - 2.50 \mu m$.

I minerali più importanti presenti negli spettri degli asteroidi sono: olivine, pirosseni, metalli Ferro-Nichel, feldspati e fillosilicati idrati e composti organici.

La maggior parte degli asteroidi è composta da un mix di questi minerali. Poiché i parametri spettrali dei diversi assorbimenti (i.e. la posizione delle bande e il rapporto tra esse) sono legati a una specifica composizione del singolo minerale, l'analisi spettrale della superficie degli asteroidi è in grado, nella maggior parte dei casi, di rilevare le firme mineralogiche caratteristiche di una particolare specie.

La possibilità di rilevare una feature dipende dall'abbondanza della particolare specie, in modo che la forza della feature possa essere rilevata sopra il rumore dello spettro.

In spettri di alta qualità può essere anche determinata la composizione e le relative abbondanze di un mix di minerali.

Per questi motivi l'analisi degli spettri può fornire una varietà di dati sulla composizione della superficie degli asteroidi.

2.2 Spettro degli asteroidi

Il flusso incidente che arriva sulla superficie di un asteroide è diviso in due contributi: la parte riflessa e la parte assorbita, il cui rapporto dipende dall'albedo. La parte assorbita riscalda la superficie del corpo. Questo emette, di conseguenza, radiazione di corpo nero determinata dalla temperatura raggiunta. Quindi la Terra riceve sia il flusso "solare" riflesso dall'oggetto che la radiazione di corpo nero.

Negli spettri degli asteroidi la radiazione solare riflessa domina nel range che va dall'ultravioletto (UV) al vicino infrarosso (NIR): $0.35 - 2.50 \mu m$; mentre a lunghezze maggiori ($2.5 - 5.0 \mu m$) il contributo della radiazione di corpo nero dell'asteroide diventa rilevabile.

2.3 Tipi tassonomici

La tassonomia è la classificazione degli oggetti in categorie definite da alcuni parametri caratterizzanti. Sin dagli anni '70 diversi autori hanno creato diverse classi tassonomiche basandosi su proprietà osservabili.

La classificazione tassonomica più utilizzata è quella di Tholen (1984), basata su più di 400 spettri ricavati dalla Eight-Color Asteroid Survey (ECAS), nel range spettrale $0.3 - 1.1 \mu m$. Dagli spettri ECAS si possono distinguere undici classi spettrali (A, B, C, D, F, G, Q, R, S, T e V).

Barucci et al., nel 1987, usarono sette colori spettrofotometrici e gli albedo ricavati dalle survey IRAS per definire nove classi spettrali e per ognuna delle sottoclassi identificate dallo studio dettagliato degli spettri.

Infine, Bus e Binzel (Bus & Binzel (2002b), Bus & Binzel (2002a)) hanno derivato la loro classificazione tassonomica da dati spettrofotometrici recenti.

2.3.1 Tassonomia di Tholen

Ognuna delle tassonomie menzionate sopra separa gli asteroidi in diverse classi secondo riflettività e albedo visuali (nel visibile) simili. Sebbene non viene usato nessun criterio mineralogico nel definire le classi, la tassonomia può essere usata per derivare la caratterizzazione mineralogica di ogni asteroide nelle varie classi.

Di seguito descriveremo brevemente le principali caratteristiche di ogni classe della tassonomia di Tholen e la loro relazione con le meteoriti.

Classe A Gli asteroidi di tipo A mostrano una forte decrescita nella riflettanza attorno a $0.7 \mu m$, relativa a composti metallici, e un forte banda di assorbimento centrata attorno a $1 \mu m$ e nessun assorbimento rilevante a $2 \mu m$ (caratteristica dei pirosseni).

Sono asteroidi molto rari, situati principalmente nella Main Belt interna. Si ritiene che questi oggetti siano frammenti del mantello differenziato di corpi

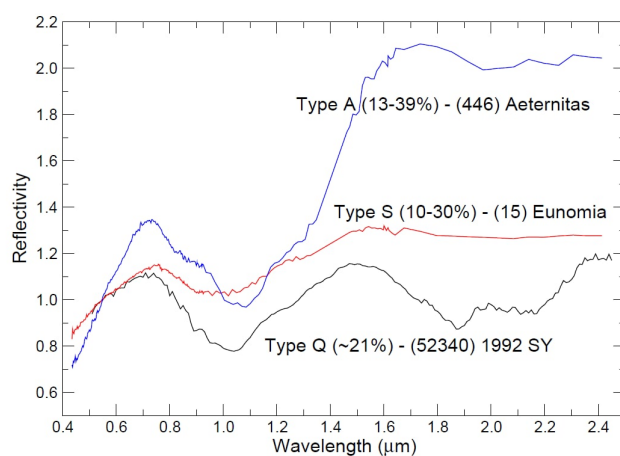


Figura 2.1: Esempio di spettri di tipo Q, S e A. Gli spettri sono normalizzati a $0.55 \mu m$. Tra parentesi è riportato il range di albedo in percentuale. (Magrin, 2006)

progenitori di dimensioni maggiori.

Le analoghe meteoriti sono le acondrite a olivina e/o pallasite.

Classe S Rappresenta la seconda classe più numerosa ed è caratterizzata da spettri con una pendenza ripida attorno a $0.7 \mu m$ e assorbimenti moderati attorno a 1 e $2 \mu m$. La loro albedo varia tra 0.1 e 0.3 . Lo spettro tipico degli asteroidi di tipo S indica la presenza di un mix di olivine, pirosseni e metalli Fe-Ni; in particolare di silicati: ciò li rende i corpi progenitori più probabili per le meteoriti rocciose.

A causa della classificazione di Tholen sono stati introdotti diversi sottogruppi definiti in base alle diverse composizioni e storie evolutive degli asteroidi. Gli asteroidi di tipo S sono situati principalmente nella Main Belt interna e diventano più rari spostandosi verso l'esterno.

Classe Q È una classe di oggetti molto scarna, i pochi corpi di questo tipo sono NEO ma nessuno appartiene alla Main Belt. Un ottimo rappresentante della classe è il NEO (1862) Apollo. Lo spettro è fortemente arrossato attorno a $0.7 \mu m$ e ha due forti assorbimenti a 1 e $2 \mu m$, caratteristiche proprie di un mix di olivine e pirosseni.

Questi spettri sono simili a quelli delle condriti ordinarie (CO), che rappresentano circa l'80% delle meteoriti trovate sulla superficie terrestre. Ciò indicherebbe che gli asteroidi di tipo Q siano i progenitori di queste meteoriti e quindi dovrebbero essere molto numerosi, in contrasto con le osservazioni.

Classe R Questa classe fu inizialmente proposta unicamente per (349) Debowska. Il suo spettro mostra forti assorbimenti a 1 e $2 \mu m$, simili a

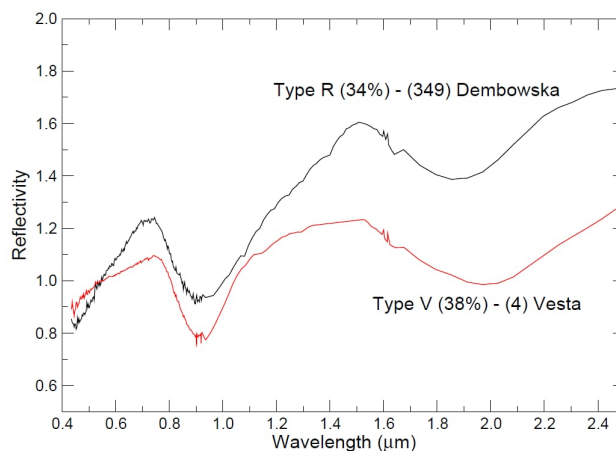


Figura 2.2: Esempio di spettri di tipo V e R. Gli spettri sono normalizzati a $0.55 \mu m$. Tra parentesi è riportato il range di albedo in percentuale. (Magrin, 2006)

quelli di Vesta. Dembowska, a differenza di Vesta, presenta caratteristiche allargate verso lunghezze d'onda maggiori, mentre l'assorbimento a $2 \mu m$ è più stretto e centrato su lunghezze d'onda minori.

Le caratteristiche spettrali indicano la presenza di olivine e pirosseni (circa in eguali quantità) e pochi o alcun metalli.

Classe V Questa classe fu proposta per (4) Vesta. Il suo spettro è caratterizzato da forti assorbimenti centrati vicino a 1 e $2 \mu m$, dovuti ai pirosseni. All'incirca il 6% degli asteroidi della Main Belt rientra all'interno di questo gruppo. La maggior parte degli asteroidi di tipo V, noti come vestoidi, orbitano nelle vicinanze di Vesta, il che suggerisce che siano dei suoi frammenti generatisi in seguito a impatti con altri corpi. Alcuni NEA sono risultati essere vestoidi: ciò dimostra l'efficacia dei meccanismi di trasporto degli asteroidi dalla Main Belt alle regioni del Sistema Solare interno.

Classe C In letteratura ci si riferisce al gruppo C come un grande gruppo di oggetti scuri e primitivi. Contiene infatti circa il 75% degli asteroidi noti. Questi oggetti dominano nelle regioni esterne della Main Belt, dove compongono l'80% di tutta la popolazione, ma diventano più rari spostandosi verso l'interno.

Gli asteroidi di tipo C non presentano alcuna caratteristica attorno a $0.4 \mu m$ ma hanno diverse intensità di assorbimento nell'UV. All'interno di questa classe sono state introdotte le sottoclassi C, B, F, G e P.

La classe P non ha assorbimenti nell'UV, la classe F ne ha uno debole, B e C leggermente più intenso e la classe G ha l'assorbimento UV più intenso di tutto il gruppo C. La classe B ha uno spettro da piatto e leggermente blu mentre la classe C da piatto a leggermente rosso. Bell et al. (1989) ha

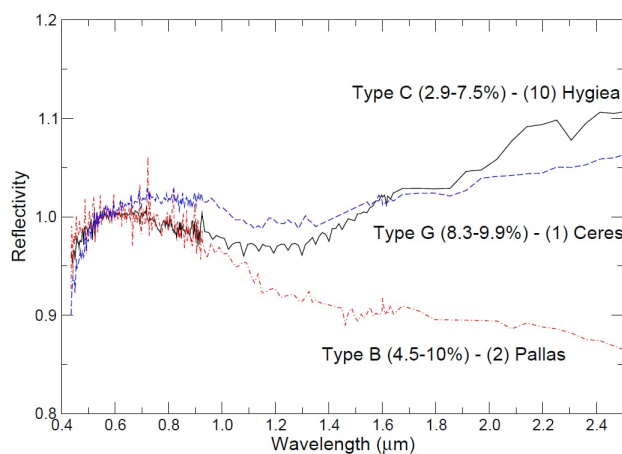


Figura 2.3: Esempio di spettri di tipo B, G e C. Gli spettri sono normalizzati a $0.55 \mu m$. La scala verticale è ampliata per rendere apprezzabili le differenze tra le classi. Tra parentesi è riportato il range di albedo in percentuale. (Magrin, 2006)

proposto un modello per interpretare le diversità nel gruppo C: le classi B, F e G sarebbero il risultato di un'alterazione metamorfica di un progenitore di classe C. La classe P, che si trova principalmente nella parte esterna della Main Belt, si pensa sia costituita da materiale primitivo contenente una gran quantità di materiale organico, e potrebbe essere una classe di transizione tra C e gli oggetti molto primitivi della classe D.

Circa due terzi degli oggetti del gruppo C appaiono idratati, dall'analisi dello spettro attorno a $3 \mu m$ e nella regione del visibile, probabilmente perché sono stati scaldati al punto che acqua liquida è entrata in contatto con il materiale circostante.

Classe D Gli spettri degli asteroidi di classe D sono generalmente senza caratteristiche particolari, con spettri tendenti leggermente verso il rosso attorno a $0.55 \mu m$ e spettri molto rossi dopo $0.55 \mu m$. Hanno, inoltre, albedo molto bassi (≤ 0.05).

Sono situati nella Main Belt esterna e tra i Troiani di Giove, di cui costituiscono il 60% della popolazione totale. È stato ipotizzato che questi asteroidi siano composti da una complessa miscela di materiale organico e di regolite¹ e che provengano dalla Kuiper Belt.

Classe E Gli asteroidi di classe E hanno uno spettro senza caratteristiche, molto simile a quello della classe M. Si differenziano da questi ultimi per via della loro elevata albedo, superiore a 0.3. La composizione superficiale

¹La regolite è uno strato di frammenti rocciosi incoerenti che forma il terreno superficiale dei vari oggetti nel Sistema Solare.

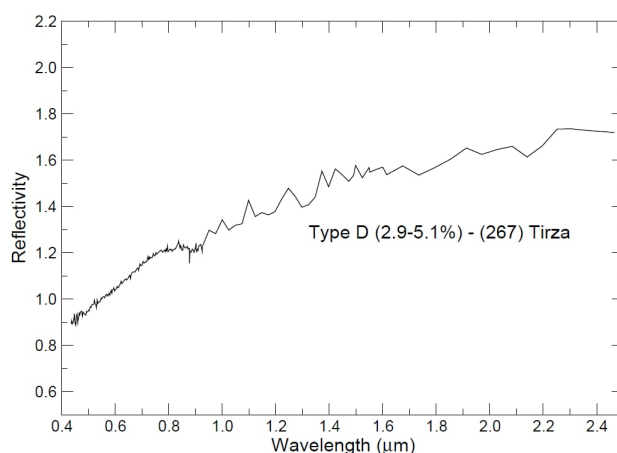


Figura 2.4: Esempio di spettro di tipo D. Lo spettro è normalizzato a $0.55 \mu m$. Tra parentesi è riportato il range di albedo in percentuale. (Magrin, 2006)

ziale dovrebbe essere costituita da silicati poveri di ferro, come enstatite e feldspato.

Il gruppo degli Hungaria contiene la metà degli asteroidi di classe E noti. Si crede che alcuni NEO di questo gruppo siano i corpi progenitori delle aubriti, una sottoclasse delle meteoriti acondriti.

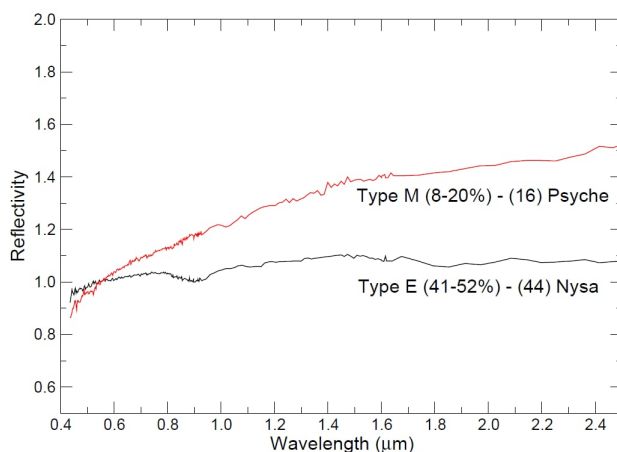


Figura 2.5: Esempio di spettri di tipo E e M. Gli spettri sono normalizzati a $0.55 \mu m$. Tra parentesi è riportato il range di albedo in percentuale. (Magrin, 2006)

Classe M Si tratta del terzo gruppo più numeroso. Gli spettri sono caratterizzati da un leggero arrossamento e senza particolari caratteristiche. Gli asteroidi di questa classe hanno albedo comprese tra 0.1 e 0.2. I dati suggeriscono che la composizione è principalmente ferro e nichel, suggerendo che questi oggetti siano i nuclei metallici differenziati di oggetti più gran-

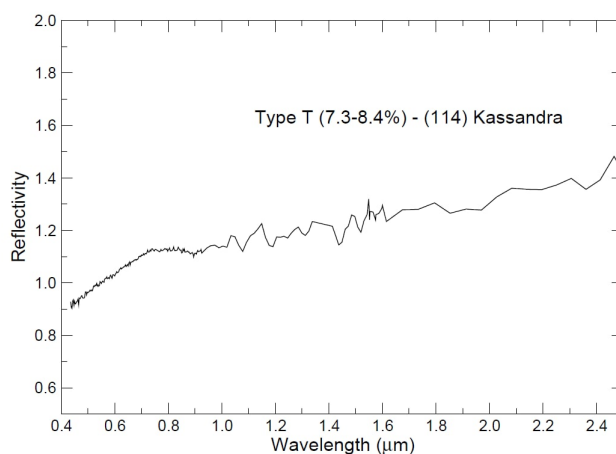


Figura 2.6: Esempio di spettro di tipo T. Lo spettro è normalizzato a $0.55 \mu\text{m}$. Tra parentesi è riportato il range di albedo in percentuale. (Magrin, 2006)

di andati distrutti. Si ritengono essere quindi i progenitori delle meteoriti metalliche.

Classe T Gli asteroidi di classe T sono molto rari e hanno albedo molto basse (≤ 0.1) con spettri leggermente rossi verso $0.85 \mu\text{m}$. Si ritiene che siano composti da materiale carbonaceo fortemente alterato (o termicamente o dall'azione dell'acqua).

2.3.2 Tassonomia di Bus

I dati della SMASSII² (Small Main-Belt Asteroid Spectroscopic Survey) hanno fornito delle nuove basi per una tassonomia. Bus & Binzel (2002b) and Bus & Binzel (2002a) hanno costruito il loro sistema di classificazione basandosi sulle tassonomie pre-esistenti. In particolare hanno definito tre gruppi principali: S-, C- e X-complex, corrispondenti alle definizioni classiche dei tipi S, C e X. Di conseguenza sono state definite 26 classi sulla base della presenza o assenza di alcune caratteristiche spettrali. Di queste 26 classi, 12 hanno una designazione a una lettera: A, B, C, D, K, O, Q, R, S, T, V e X. Una nuova classe, la L, è stata introdotta per descrivere gli oggetti con una pendenza molto ripida nell'UV, vicino a $0.75 \mu\text{m}$, ma con uno spettro piatto oltre i $0.75 \mu\text{m}$. Asteroidi con caratteristiche intermedie sono associati a classi multi-lettera: Cb, Cg, Cgh, Ch, Ld, Sa, Sk, Sl, Sq, Sr, Xc, Xe, e Xk. I membri delle classi Cgh- e Ch- hanno spettri contenenti un assorbimento a $0.7 \mu\text{m}$ legato all'idratazione.

Un nuovo asteroide può quindi venire facilmente classificato all'interno di una di queste classi solamente sulla base delle sue caratteristiche spettrali.

²<http://smass.mit.edu/smass.html>

Di seguito un riassunto delle chiavi tassonomiche della classificazione di Bus-DeMeo.

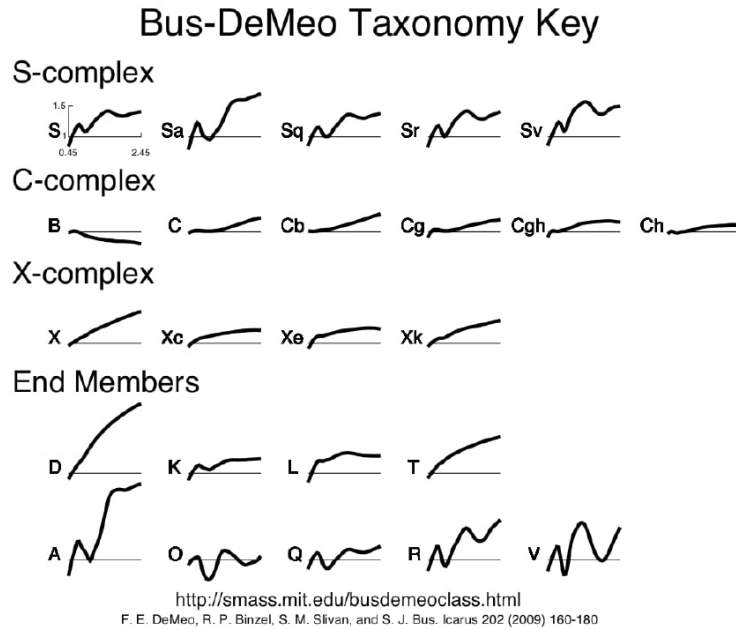


Figura 2.7: Spettri dei tipi tassonomici introdotti da Bus e Binzel. (DeMeo et al., 2009)

2.4 Space Weathering (foorse)

Capitolo 3

La missione DART

La missione Double Asteroid Redirection Test (DART) è un dimostratore tecnologico riguardante la difesa planetaria, lanciato e gestito dal Planetary Defense Coordination Office (PDCO) di NASA, in collaborazione con il Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory (APL) e l'Agenzia Spaziale Italiana (ASI).



Figura 3.1: Logo della missione DART. (NASA/JHU-APL)

L'obiettivo principale della missione è quello di dimostrare l'efficacia dello "impattatore cinetico" come metodo per la difesa planetaria dai PHA. Il target scelto per testare la tecnologia è il sistema binario di (65803) Didymos, in particolare la sua luna (65803) Didymos I Dimorphos (d'ora in avanti chiamata semplicemente Dimorphos). Il concetto alla base dell'impattatore cinetico è quello di speronare un asteroide con un oggetto massivo con una velocità sufficientemente alta da cambiare l'orbita del corpo. (Rivskin et al., 2021)

3.1 La difesa planetaria

Come si è visto nella Sezione 1.2 la regione di spazio attorno alla Terra è densamente popolata di asteroidi potenzialmente pericolosi.

Negli anni è maturata sempre più la consapevolezza scientifica che questi oggetti rocciosi possono causare enormi danni al nostro pianeta in caso di collisione, ma al giorno d'oggi non esiste nessun sistema in funzione per la difesa planetaria.

Per questi motivi la comunità scientifica ha iniziato a teorizzare e progettare diversi sistemi anti-collisione con asteroidi (Asteroid Impact Avoidance, AIA), che comprendono tutti quei metodi con cui sarebbe possibile deviare un asteroide in rotta di collisione con la Terra e che provocherebbe eventi distruttivi.

Un impatto da parte di un asteroide sufficientemente grande, a seconda del luogo d'impatto, potrebbe causare massicci tsunami, tempeste di fuoco o un "inverno da impatto", dovuto al blocco della luce solare da parte di grandi quantità di polvere e altri detriti immessi nella stratosfera. Si ritiene che una collisione avvenuta 66 milioni di anni fa tra la Terra e un oggetto di 10 chilometri di diametro abbia generato il cratere di Chicxulub e abbia innescato l'estinzione del Cretaceo-Paleogene, che la comunità scientifica ritiene abbia portato all'estinzione di tutti i dinosauri non aviari.

Più recentemente, gli eventi di Tunguska del 1908, quando una meteora di circa 65 metri esplose sopra i cieli della Siberia e devastò 2150 km² di foresta, o di Chelyabinsk del 2013, quando un oggetto di circa 20 metri esplose nei cieli russi causando danni a edifici e infrastrutture, hanno richiamato l'attenzione su tali minacce.

In letteratura sono stati descritti diversi metodi per la difesa planetaria. Tuttavia, nel marzo 2019, gli scienziati hanno riferito che gli asteroidi potrebbero essere molto più difficili da distruggere di quanto si pensasse in precedenza. (El Mir et al., 2019) In aggiunta, un asteroide può anche ricompattarsi grazie alla gravità dopo essere stato distrutto. Nel marzo 2021, al termine della Planetary Defence Conference, gli astronomi e le astronome hanno dichiarato che, per evitare un impatto, potrebbero essere necessari dai 5 ai 10 anni di preparazione preliminare¹; per questo motivo è molto importante avere a disposizione dati orbitali molto precisi.

3.1.1 Impattatore cinetico

Le varie tecniche di prevenzione dalle collisioni presentano diversi compromessi rispetto a parametri quali le prestazioni complessive, i costi, i rischi di missione, le operazioni e le disponibilità tecnologiche. (Canavan, Solomen, 1992) Esistono vari metodi per modificare l'orbita di un asteroide o cometa

¹<https://cneos.jpl.nasa.gov/pd/cs/pdc21/>

(Hall, Ross, 1997), che possono essere catalogati in base al tipo di mitigazione (deflessione o frammentazione), la fonte di energia (cinetica, elettromagnetica, gravitazionale, solare/termica o nucleare) e la strategia di approccio (intercettazione o rendezvous (Solem, 1003)).

Per lo scopo di questa tesi ci concentreremo sul metodo dell'impattatore cinetico.

Quando un asteroide è ancora lontano dalla Terra, un modo per deflettere la sua orbita è quello di alterare direttamente il suo momento facendo collidere una sonda sulla sua superficie. Delle analisi condotte da NASA nel 2007² mostrarono che "gli impattatori cinetici non nucleari sono l'approccio più maturo e potrebbero essere usati in scenari di deflessione/mitigazione che coinvolgono piccoli oggetti singoli."

Il principio di deviazione, applicato poi dalla sonda DART, si basa sulla legge di conservazione del momento

$$m_1\vec{v}_1 + M_2\vec{v}_2 = (m_1 + M_2)\vec{v}_3 \quad (3.1)$$

con \vec{v}_1 e m_1 velocità e massa della sonda \vec{v}_2 e M_2 velocità e massa dell'asteroide e \vec{v}_3 velocità finale dopo l'impatto. La velocità della sonda rispetto al NEO è nell'ordine dei 10 km/s e il momento è trasferito al NEO, causando un cambio nella sua velocità orbitale che risulta in una leggera deviazione dell'orbita.

3.2 Double Asteroid Redirection Test

DART è una missione NASA che nasce con l'intento di dimostrare la fattibilità del metodo, sopra descritto, dell'impattatore cinetico.

NASA ed ESA hanno iniziato a collaborare nel 2015 al progetto AIDA³ (Asteroid Impact and Deflection Assessment), che consiste in due sonde separate ma che lavorano in sinergia (Michel et al., 2018). Dopo varie modifiche al piano della missione si è giunti alla configurazione finale: DART, gestita da NASA, e Hera, di cui parleremo in seguito, gestita da ESA.

Il 24 novembre 2021 la sonda DART è stata lanciata a bordo di un Falcon 9, verso la sua destinazione finale: il sistema di Didymos e Dimorphos.

3.2.1 Strumentazione

Poiché l'obiettivo della sonda era quello di schiantarsi contro un asteroide, essa è stata dotata degli strumenti essenziali per la fase di crociera e di approccio, nonostante ciò aveva una massa di 610 kg .

²Near-Earth Object Survey and Deflection Analysis of Alternatives

³Pagina del progetto AIDA



Figura 3.2: La sonda DART appena installata sul payload adapter. Al centro è possibile vedere il dispenser di LICIACube. (NASA/JHU-APL)

Camera Oltre ai sensori base per la navigazione nello spazio, la sonda ospitava una camera da 20 cm di apertura chiamata DRACO (Didymos Reconnaissance and Asteroid Camera for Optical navigation). DRACO era basata sulla camera LORRI della sonda di NASA New Horizons e ha consentito la navigazione autonoma della sonda fino all'impatto al centro di Dimorphos.

La parte ottica della camera era un telescopio Ritchey-Chrétien equipaggiato con un teleobiettivo con campo di vista (FOV) di 0.29° e una lunghezza focale di 2.6208 m ($f/12.60$). La risoluzione spaziale poco prima dell'impatto è stata di circa $20\text{ cm}/px$.

Il sensore utilizzato era un CMOS con un range spettrale di $0.4 - 1\text{ }\mu\text{m}$ (dal visibile al vicino infrarosso).

LICIACube Per osservare l'impatto e l'evoluzione dei detriti da una distanza tale da poter avere un quadro generale del test, ASI e Argotec hanno progettato un cubesat da 6U ($10\text{ cm} \times 20\text{ cm} \times 30\text{ cm}$), LICIACube (Light Italian CubeSat for Imaging of Asteroids), che si è separato da DART l'11 settembre 2022 e ha seguito tutta la missione da una distanza di sicurezza di $\sim 1250\text{ km}$, effettuando un flyby di Dimorphos a 56.7 km 2 minuti e 45 secondi dopo l'impatto della sonda con la luna.

A bordo di LICIACube ci sono due camere ottiche: LEIA (LICIACube Explorer Imaging for Asteroid) e LUKE (LICIACube Unit Key Explorer).

LEIA È una camera catadriottica monocromatica con un campo di vista molto stretto (2.06°) e una risoluzione al punto di minima distanza di $1.38\text{ m}/px$.

LUKE Si tratta di una camera equipaggiata con un filtro RGB con pattern di Bayern, con un campo largo campo di vista (5°).

Durante il flyby Luke ha osservato sia l'emisfero impattato che quello non impattato di Dimorphos con una risoluzione spaziale massima di $\sim 4.3\text{ m}/px$. L'analisi spettrofotometrica dei dati ottenuti verrà usata per indagare la composizione superficiale di Dimorphos; i dati spettrofotometrici permetteranno di indagare l'eterogeneità superficiale e mappare la composizione superficiale dell'oggetto, e anche di cercare per materiali esogeni generati dalla collisione con altri asteroidi durante la storia evolutiva del sistema (Poggiali et al., 2021). I risultati forniti da LUKE, insieme a quelli di LEIA e DRACO, permetteranno di investigare la geologia del sistema di Didymos-Dimorphos (Pajola et al., 2022).

3.2.2 Missione primaria

Dopo 8 mesi di fase di crociera la camera DRACO è riuscita a rilevare Didymos a circa 32 milioni di km e DART ha così potuto iniziare a rifinire la sua traiettoria. L'11 settembre 2022, 15 giorni prima dell'impatto, LICIACube è stato rilasciato. 2 minuti e 30 secondi prima dell'impatto l'obiettivo si trovava a 920 km . La sonda DART ha impattato sulla luna Dimorphos il 27 settembre 2022 alle 01:14 ora italiana. L'impatto è avvenuto a 6.6 km/s , liberando circa 11 gigajoule di energia. 2 minuti e 45 secondi dopo l'impatto LICIACube ha effettuato il flyby di Dimorphos a 56.7 km .

ci vanno le immagini ma al momento non funziona il pacchetto

3.3 Missioni future

Come già anticipato nella Sezione 3.2, la missione DART verrà seguita dalla missione Hera⁴, in sviluppo nei centri ESA, che dovrebbe essere lanciata nell'ottobre 2024 e dovrebbe arrivare in orbita attorno al sistema nel dicembre 2026. L'obiettivo principale della missione sarà quello di valutare l'efficacia del metodo dell'impattatore cinetico sul sistema Didymos-Dimorphos. Per soddisfare questo obiettivo Hera dovrà determinare:

- quanto il trasferimento di momento dipende dalla densità, dalla porosità e dalle caratteristiche superficiali e interne dell'asteroide;
- in che percentuale l'energia cinetica è trasferita nella frammentazione e nella riorganizzazione dell'asteroide e quanta è trasformata in energia cinetica dei frammenti espulsi dall'impatto.

Hera ha anche altri obiettivi scientifici. Infatti, non dovendo schiantarsi contro l'asteroide, sarà equipaggiata con vari strumenti scientifici:

- **Hyperscout-H**: una camera iperspettrale per fornire immagini tra 665 e 975 nm , in 25 diverse bande spettrali.

⁴[Sito missione Hera](#)

- **Planetary Altimeter (PALT):** un micro-altimetro planetario con tecnologia LIDAR. L'accuratezza di misurazione in altezza è di 0.5 metri.
- **Thermal Infrared Imager (TIRI):** una camera termica a infrarossi fornita dall'Agenzia Spaziale Giapponese (JAXA). Il range spettrale è tra 7 e 14 μm ed è equipaggiata con 6 filtri. La risoluzione spaziale è di 2.3 metri a 10 chilometri di altitudine.
- **X-Band Radio Science (X-DST):** strumento radio che misurerà l'effetto Doppler dovuto ai disturbi radio e permetterà di ricavare la massa dei due asteroidi, le caratteristiche gravitazionali del sistema binario, le velocità orbitali e le orbite dei due corpi.
- Due cubesat: **Milani** e **Juventas** il cui scopo sarà quello di completare le informazioni scientifiche raccolte dalla sonda primaria.

Questi strumenti saranno necessari per raccogliere informazioni sui due asteroidi: caratteristiche superficiali, porosità e struttura interna. In particolare, Hera sarà la prima missione a mappare completamente la superficie e la struttura interna di un asteroide. L'intera luna Dimorphos verrà mappata globalmente con una risoluzione spettrale di qualche metro e il sito di impatto con una risoluzione di 10 centimetri. Verrà inoltre studiato come si è evoluta la nube di frammenti generatasi dopo l'impatto e le caratteristiche dell'ambiente circostante i due corpi (Michel et al. 2022).

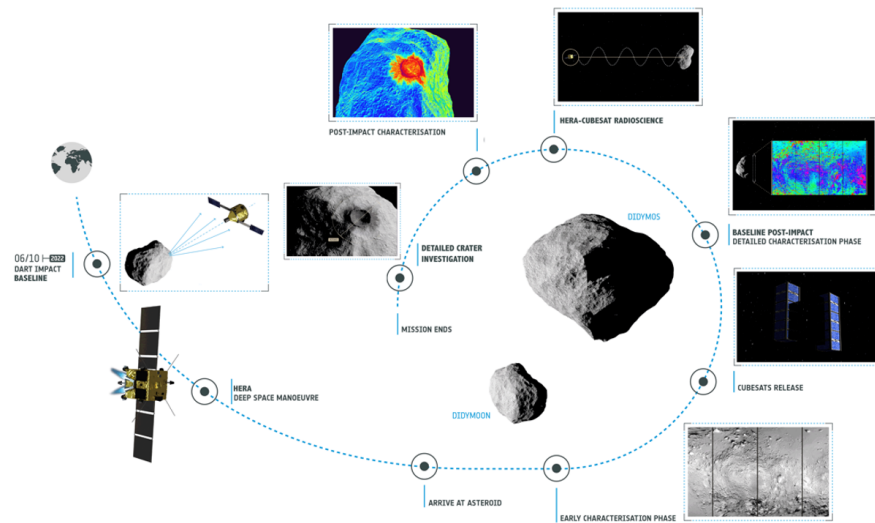


Figura 3.3: Timeline della missione Hera. (ESA)