

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale
Corso di Laurea in Ingegneria Aerospaziale

***Relazione per la prova finale
«Near-Earth Objects e difesa planetaria:
DART, HERA e il caso di 2024 YR4»***

Tutor universitaria: Prof.ssa Monica Lazzarin

Laureando: Marco Gerevini

Tutor universitario 2: Dott. Andrea Farina

Padova, 17/09/2026

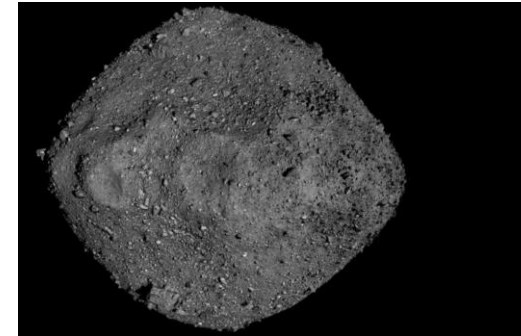
Con il termine Near-Earth Objects (NEOs) si definisce la categoria di piccoli corpi che, durante la loro orbita, presentano una traiettoria che deve passare ad 1,3 UA dal Sole e muoversi entro 0,3 UA dalla Terra.

Le comete aventi corto periodo orbitale (minore di 200 anni) Near-Earth Comets (NECs).



1P/Halley

La popolazione degli asteroidi Near-Earth Asteroids (NEAs) (42242 corpi catalogati al 09/09/26).

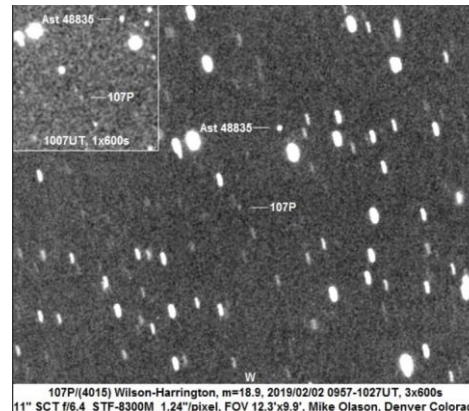


101955 Bennu



162173 Ryugu

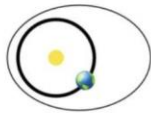
Origine degli asteroidi mediante nuclei cometari dormienti/estinti o AMCs.



Una prima classificazione dinamica dei NEAs può essere fatta in base alle caratteristiche dell'orbita.

Amors

Earth-approaching NEAs with orbits exterior to Earth's but interior to Mars' (named after asteroid (1221) Amor)



$$a > 1.0 \text{ AU} \\ 1.017 \text{ AU} < q < 1.3 \text{ AU}$$

Apollos

Earth-crossing NEAs with semi-major axes larger than Earth's (named after asteroid (1862) Apollo)



$$a > 1.0 \text{ AU} \\ q < 1.017 \text{ AU}$$

Atens

Earth-crossing NEAs with semi-major axes smaller than Earth's (named after asteroid (2062) Aten)



$$a < 1.0 \text{ AU} \\ Q > 0.983 \text{ AU}$$

Atiras

NEAs whose orbits are contained entirely within the orbit of the Earth (named after asteroid (163693) Atira)



$$a < 1.0 \text{ AU} \\ Q < 0.983 \text{ AU}$$

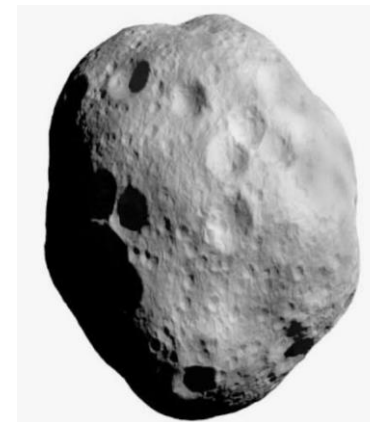
(q = perihelion distance, Q = aphelion distance, a = semi-major axis)

Una seconda classificazione può essere fatta in base alla loro tassonomia, la quale viene fatta mediante diverse tecniche: osservazione da remoto mediante dispositivi a Terra o su satelliti, mediante satelliti in maniera diretta «in situ» oppure attraverso studi in laboratorio di meteoriti ritrovati o prelevati.

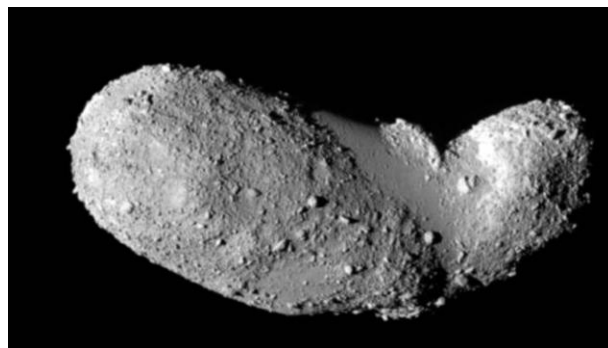
- Tipo C
- Tipo S
- Tipo M



162173 Ryugu



2016 ED85



25143 Itokawa

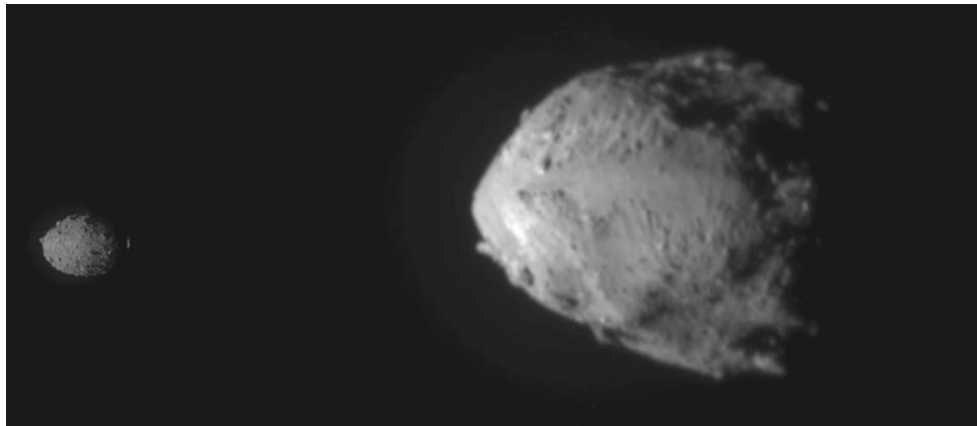
Tra gli oggetti NEAs trovano spazio anche i PHAs (Potentially Hazardous Asteroids), ovvero quegli asteroidi che durante la loro orbita possiedono una distanza minima di intersezione orbitale (MOID) $0,05 \text{ UA}$ e includono gli oggetti aventi una magnitudine assoluta $H_v \leq 22 \text{ mag}$.

Ad oggi (09/09/26) rappresentano un gruppo di 2545 corpi.



Particolare importanza è stata assunta da due classi dimensionali di PHAs: gli oggetti ritenuti di dimensioni superiori a 1 km e la popolazione compresa tra 140 m e 1 km. Gli oggetti più grandi, con diametri effettivi superiori a 1 km, hanno una bassa frequenza di impatto, ma possiedono la capacità di causare eventi di estinzione globale. Mentre quelli di dimensioni superiori a 140 m, sono in grado di causare danni significativi a livello locale o regionale.

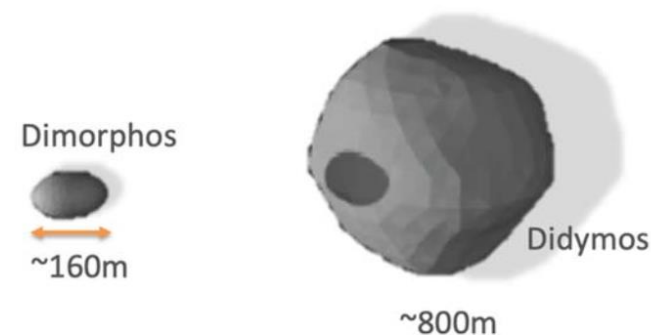
Un asteroide binario è costituito da due componenti: un asteroide primario e uno secondario, solitamente avente dimensioni più piccole rispetto al primo.
La natura binaria è piuttosto comune tra i piccoli asteroidi (di dimensioni minori di 10 km) ed infatti sono presenti sia nella MAB che come oggetti NEOs.



Tecniche di formazione dei corpi secondari dei sistemi binari:

1. collisione sub-catastrofica in cui il materiale espulso rimane legato gravitazionalmente al corpo originario e si riaccumula in un satellite;
2. collisione con un corpo più grande che espelle frammenti che diventano il corpo primario e quello secondario in un'orbita reciproca legata, mentre il residuo più grande della collisione sfugge alla forza di gravità;
3. l'asteroide primario ruota così rapidamente a causa di processi come l'accelerazione di rotazione YORP o la perdita di materia volatile, in maniera tale da disperdere massa e i frammenti risultanti si uniscono per formare il secondo corpo.

L'asteroide 65803 Didymos è stato scoperto nel 1996, mentre nel 2003 sono state effettuate osservazioni radar del sistema Didymos tramite l'impianto di Arecibo, scoprendo il corpo secondario Dimorphos e caratterizzandone forma e proprietà dei due corpi.



Le osservazioni spettroscopiche del sistema Didymos hanno rivelato che Didymos è un asteroide di classe S, correlato alle condriti ordinarie, ovvero la tipologia più comune di meteoriti rinvenute sulla Terra.

Anche l'oggetto secondario possiede la stessa composizione del primario. L'unica differenza riguarda l'età dei due corpi dato che Dimorphos si è formato in tempi più recenti, grazie ai materiali scagliati da Didymos a causa dell'effetto YORP.

La missione DART (Double Asteroid Redirection Test) nasce dall'esigenza del Planetary Defense Coordination Office (PDCO) della NASA, istituito nel 2016, con lo scopo di affrontare il rischio di impatto di asteroidi sulla Terra e pianificare le relative misure di risposta.

La missione del PDCO consiste nell'individuare i possibili rischi di impatto significativo sulla Terra da parte di oggetti naturali e nello sviluppare strategie per mitigare le conseguenze di tali impatti sul benessere umano.

DART fa parte di una missione più grande chiamata AIDA (Asteroid Impact & Deflection Assessment), frutto di una collaborazione internazionale tra NASA ed ESA. Con le rispettive missioni DART ed HERA.



OBIETTIVI DELLA MISSIONE:

dimostrare che l'impattore cinetico di DART mirato a Dimorphos può essere utilizzato anche per la difesa planetaria, dato che il corpo bersaglio, possiede un diametro di circa 160 metri. Dimensione che lo potrebbe classificare come PHA a tutti gli effetti, se fosse un singolo corpo.

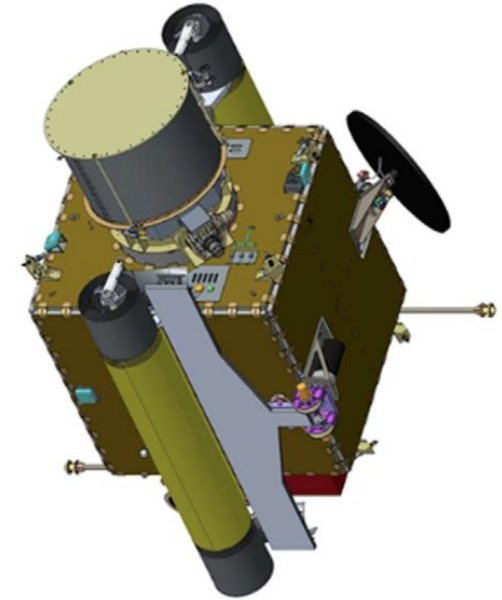
Determinare tramite le immagini dell'avvicinamento terminale, la posizione dell'impatto sull'asteroide bersaglio, la topografia locale della superficie e il contesto geologico.

Il carico utile della sonda conta solamente pochi dispositivi (indispensabili per gli obiettivi citati), dato che il fine ultimo di DART era impattare l'asteroide, distruggendosi.

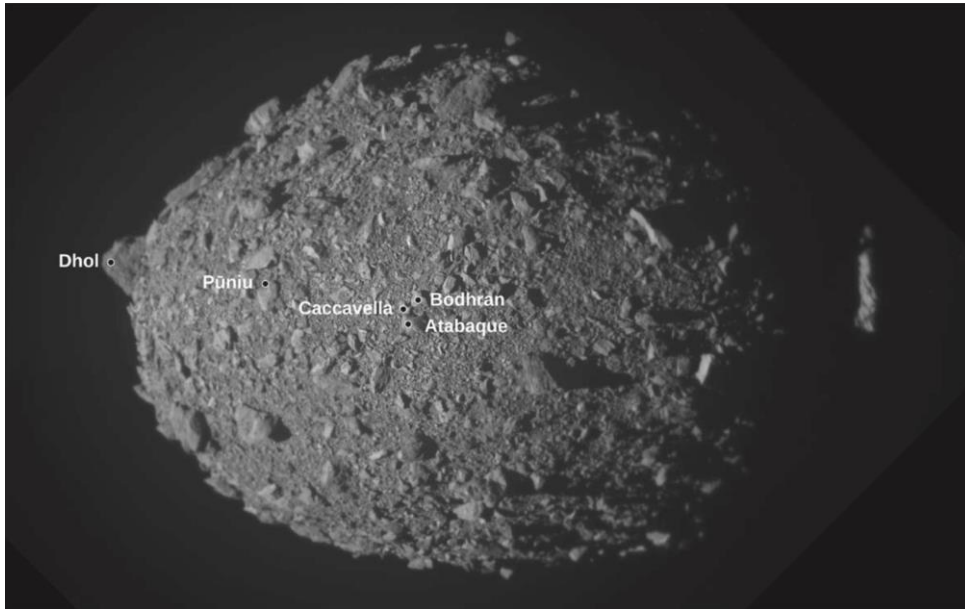
Il telescopio DRACO che presentava un design derivato dallo strumento di imaging ad alta risoluzione della missione New Horizons.

Le immagini acquisite sono state utilizzate dall'algoritmo autonomo di bordo chiamato SMART Nav (Small-body Maneuvering Autonomous Real Time Navigation), facente parte del sistema di guida, navigazione e controllo (GNC).

Il secondo dispositivo presente sulla sonda DART è il nanosatellite LICIACube realizzato con il contributo dell'Agenzia Spaziale Italiana. Nella missione DART ha rappresentato la sonda secondaria, dato che è stata rilasciata l'11 settembre 2022, ovvero 15 giorni prima dell'impatto di DART con Didymos B, per riprendere gli effetti della collisione e fornire informazioni fondamentali a supporto delle indagini di difesa planetaria correlate.



La sonda DART si è scontrata frontalmente con l'emisfero anteriore di Dimorphos per massimizzare il trasferimento di quantità di moto e ridurre il semiasse maggiore dell'orbita di Dimorphos, ottenendo così un periodo orbitale più breve.



Per determinare il periodo orbitale post-impatto è stato necessario acquisire le osservazioni radar e curve di luce del sistema Didymos, iniziando circa 11 ore dopo l'impatto e sono proseguite per 14 giorni tra il 27 settembre e il 13 ottobre. Solo successivamente si è arrivati a determinare un periodo post-impatto di $11,372 \pm 0,017$ (3σ) ore, con una variazione del periodo pari a $-33,0 \pm 1,0$ (3σ) minuti.

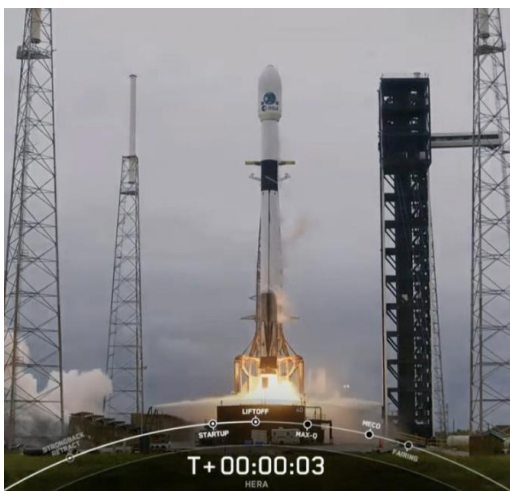
Il nuovo periodo orbitale implica che Dimorphos compia un'orbita completa aggiuntiva all'incirca ogni 9,8 giorni.

Osservazioni sul sito d'impatto.

La distribuzione dei massi suggerisce che potrebbero essersi originati da impatti, ma che siano stati successivamente modificati da altri processi, quali impatti ripetuti, frammentazione termica o fenomeni di riagggregazione.

Da un punto di vista della forma i massi su Dimorphos presentano una forma allungata, con un rapporto larghezza/lunghezza di circa 0.6, valore simile a quello misurato per i piccoli asteroidi a struttura «rubble-pile».

La missione HERA dell'ESA è stata lanciata con successo il 7 ottobre 2024 alle ore 14:52:11 UTC dalla base di Cape Canaveral, in Florida, a bordo di un razzo Falcon 9 di SpaceX, ed effettuerà il primo rendezvous con un asteroide binario nell'autunno del 2026.



OBIETTIVI DELLA MISSIONE:

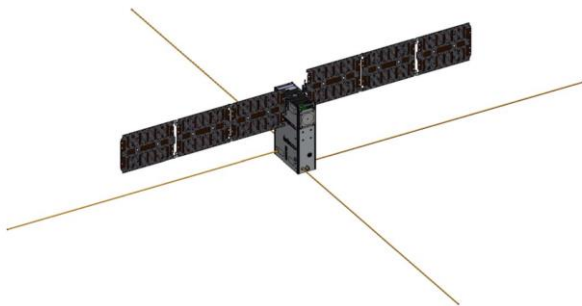
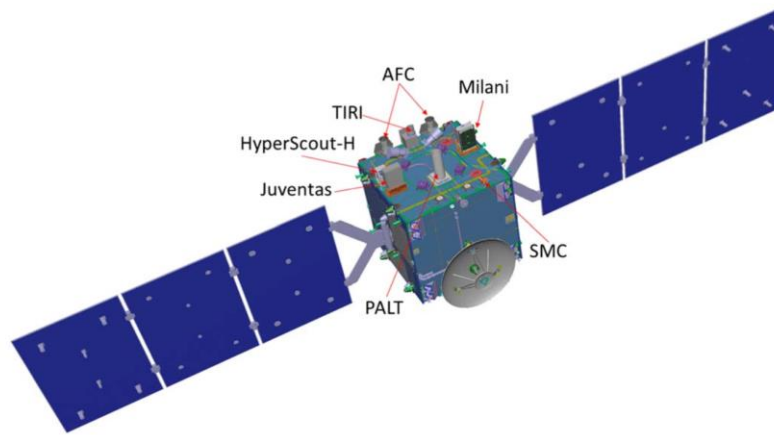
- misurare la massa di Dimorphos per determinare appieno l'efficienza del trasferimento di quantità di moto derivante dall'impatto di DART;
- studiare in dettaglio il cratere prodotto da DART per migliorare la comprensione del processo di craterizzazione e dei meccanismi con cui la formazione del cratere influenza l'efficienza del trasferimento di quantità di moto;
- osservare gli eventuali effetti dinamici come la librazione indotta dall'impatto, l'eccitazione orbitale e la rotazione di Dimorphos, che sono difficili da rilevare per gli osservatori remoti;
- caratterizzare la superficie e l'interno di Dimorphos, che hanno una grande influenza sulla risposta all'impatto.

HERA trasporta due CubeSat che verranno rilasciati in prossimità di Dimorphos e comunicheranno con la sonda madre tramite il ricetrasmittitore ISL.

Juventas

CubeSat di classe 6U, dedicato alla caratterizzazione geofisica di Dimorphos, e avente come obiettivi principali quelli di:

1. determinare il campo gravitazionale di Dimorphos;
2. determinare la sua struttura interna;
3. determinare le proprietà superficiali dell'asteroide.



Milani

CubeSat di classe 6U, avente diversi payload per poter eseguire una caratterizzazione dettagliata e indipendente di Didymos e Dimorphos a distanze comprese tra 5 e 10 km, una volta rilasciata da HERA.

I principali obiettivi di Milani sono:

1. mappare la composizione globale di Didymos e Dimorphos;
2. caratterizzare la superficie dei due corpi;
3. valutare gli effetti dell'impatto della missione DART e supportare la determinazione del campo gravitazionale;
4. descrivere le nubi di polvere attorno al sistema binario.

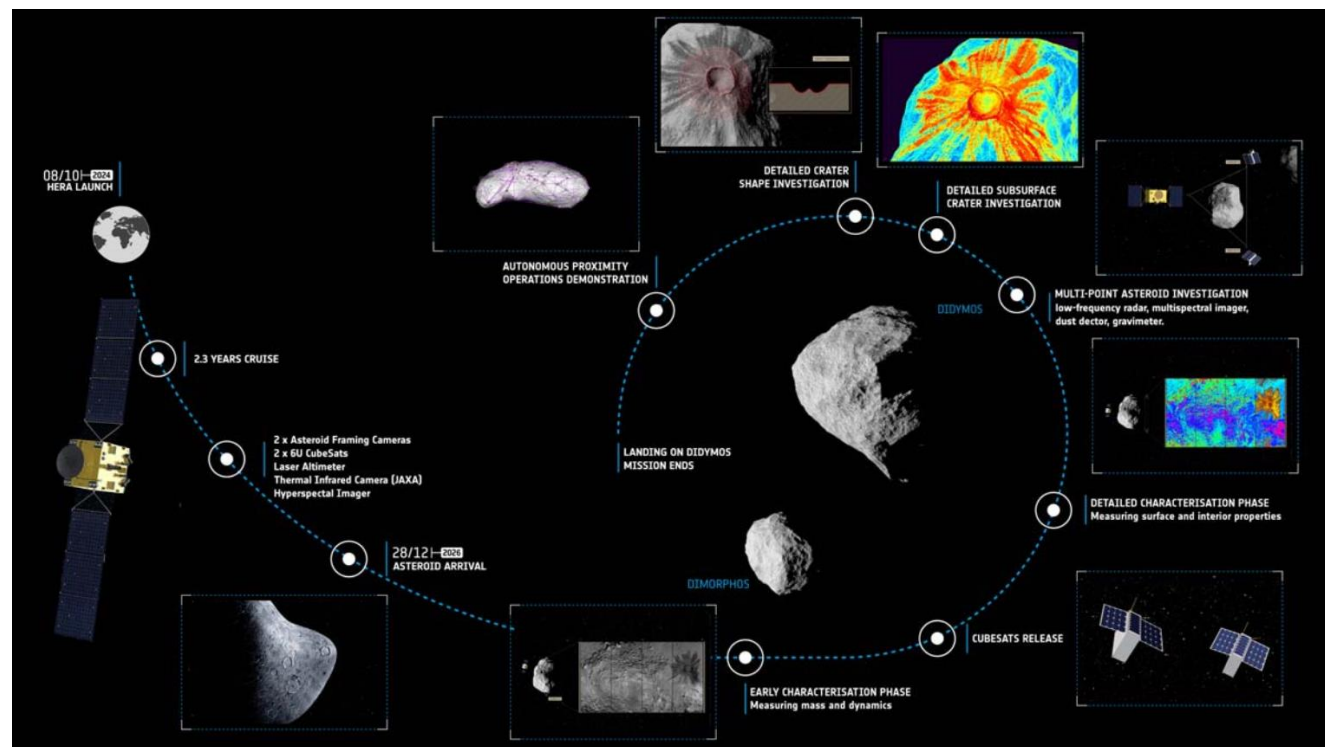
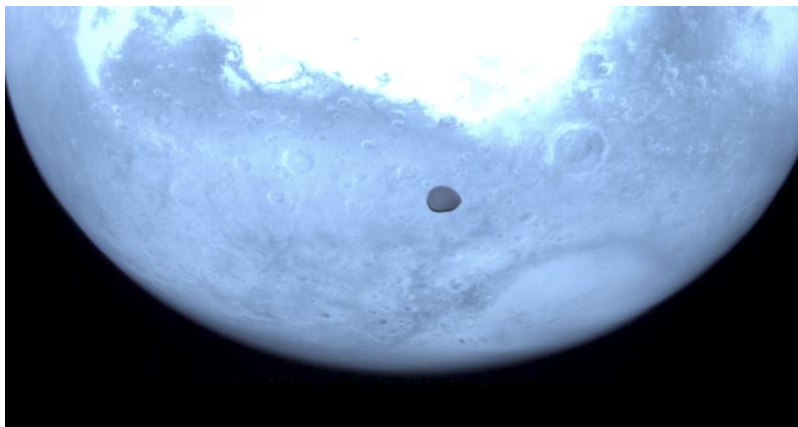


Il 12 marzo 2025 HERA ha effettuato il sorvolo di Marte ad una quota intorno ai 5.000 km e osservato la luna marziana Deimos. Dopo il sorvolo di Marte è stata fatta una manovra nello spazio profondo (DSM-2), al fine di perfezionare la traiettoria di viaggio per raggiungere con successo il sistema binario, il quale sarà raggiunto dalla sonda tra novembre e dicembre 2026.

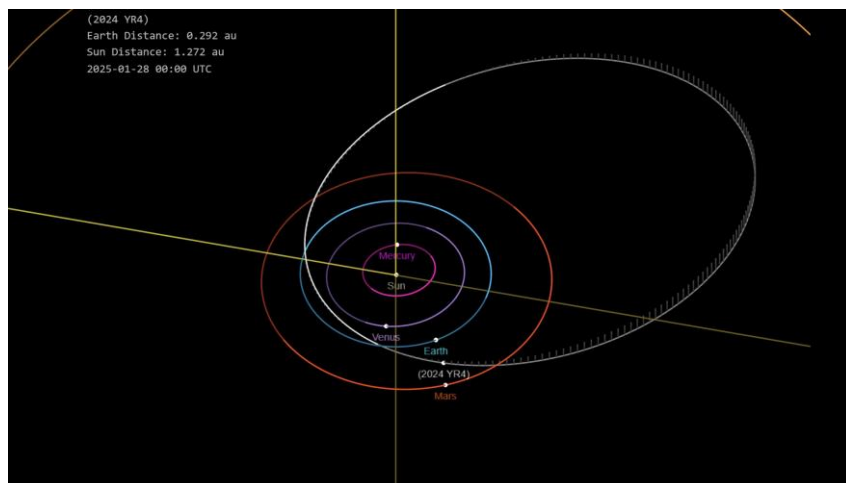
All'arrivo, la sequenza di cattura prevede cinque manovre, con un potenziale inizio il 14 dicembre 2026 e conclusione tramite l'inserimento in orbita tra la fine di gennaio e l'inizio di febbraio 2027.

Dopo l'inserimento in orbita, sono definite le seguenti fasi della missione:

1. fase di caratterizzazione iniziale (dalla durata di 6 settimane);
2. fase di rilascio del carico utile (dalla durata di 2 settimane);
3. fase di caratterizzazione dettagliata (dalla durata di 4 settimane);
4. fase di osservazione ravvicinata (dalla durata di 6 settimane);
5. fase sperimentale (dalla durata di 6 settimane).



L'asteroide NEA 2024 YR4 è stato scoperto il 27 dicembre 2024 05:42:49 UTC dalla missione ATLAS, la quale aveva come primo obiettivo di intercettare la cometa interstellare 3I/ATLAS. È stato poi grazie alla circolare (MPEC 2024-Y140) dell' IAU Minor Planet Center che 2024 YR4 è entrata a far parte degli oggetti PHAs.



L'asteroide ha un'orbita con periodo orbitale di 4 anni, infatti effettuerà avvicinamenti ravvicinati alla Terra nel 2028 e nel 2032.

Le stime iniziali hanno rivelato la possibilità di un impatto con la Terra il 22 dicembre 2032, ma man mano che venivano raccolti ulteriori dati di tracciamento sia da Terra che dallo spazio, la probabilità inizialmente è aumentata fino a raggiungere il picco del 3%, il 18 febbraio 2025, prima di scendere a zero nei giorni successivi.

Tuttavia, mentre la probabilità di impatto con la Terra è diminuita, quella di un ipotetico impatto lunare il 22 dicembre 2032, con una velocità di 13 km/s, è aumentata fino a raggiungere il 4%.

Date le potenzialità di 2024 YR4 come soggetto di studio, sono state ideate diverse attività di ricognizione rapida, riconvertendo o riassegnando una nuova missione ad un veicolo spaziale esistente, al fine di osservare lo spazio in tempi più brevi rispetto a quelli necessari affinché una sonda progettata ad hoc raggiunga l'asteroide .

OSIRIS-APEX

La missione estesa OSIRIS-APEX ha come obiettivo raggiungere l'asteroide Apophis nel giugno 2029.

È previsto che effettui tre manovre di assistenza gravitazionale terrestre prima di raggiungere Apophis; offrendo l'opportunità di reindirizzare la sonda per una ricognizione dell'asteroide 2024 YR4, dato che all'inizio del 2024, la sonda disponeva di una riserva di Δv di circa 525 m/s per le manovre.

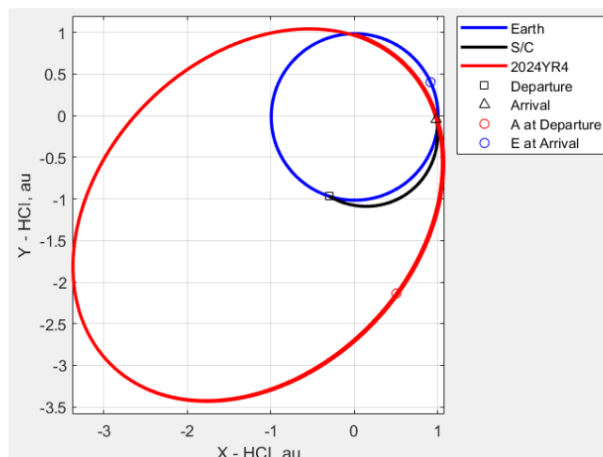
La sonda è equipaggiata con spettrometri termici ed a infrarossi, un altimetro laser e diverse fotocamere.

Inoltre, il sistema di guida, navigazione e controllo (GNC) appare ben adatto alla ricognizione in fase di rendezvous di 2024 YR4.

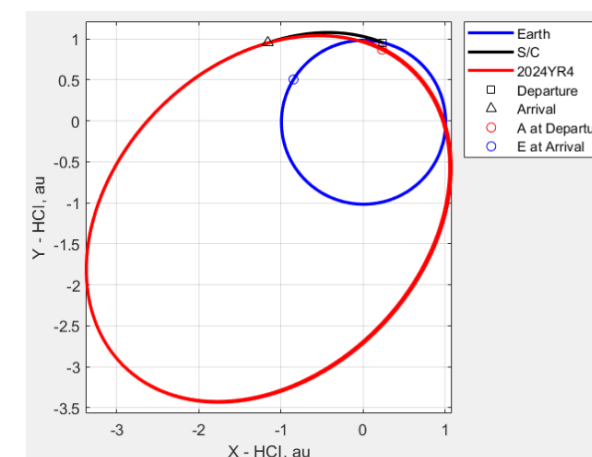
JANUS

Janus sono due piccoli veicoli spaziali, realizzati nell'ambito del programma SIMPLEX della NASA originariamente progettati per effettuare sorvoli di sistemi asteroidali binari.

Inizialmente era previsto il loro lancio insieme alla sonda Psyche, ma sono rimaste prive di un'opportunità di lancio a seguito del significativo ritardo della missione Psyche.



Traiettoria di ricognizione tramite sorvolo utilizzando Janus, con lancio nel giugno 2028.



Traiettoria di ricognizione tramite sorvolo utilizzando Janus, con lancio in dicembre 2028.

La difesa planetaria e quindi il rischio di impatto asteroidale rappresenta uno tra i più grandi problemi spaziale che affliggono l'uomo nel 21 secolo, non solamente per un potenziale rischio di impatto diretto di un asteroide sulla Terra, ma anche per un impatto su altri corpi che potrebbe portare alla perdita delle costellazioni di satelliti fondamentali al giorno d'oggi per la telecomunicazione e per tutti i servizi ad essa affini.

Per questo motivo la missione internazionale AIDA rappresenta una preziosa opportunità che ha saputo nella sua prima fase, ovvero la missione DART dimostrare le potenzialità di un impattore cinetico su un asteroide, con il fine di far variare il suo periodo orbitale.

La seconda parte di missione invece, rappresentata dalla sonda europea HERA raggiungerà il sistema binario Didymos-Dimorphos, nel dicembre 2026, raccogliendo dati che combinati con quelli ricavati dalla missione DART offriranno un notevole incremento delle conoscenze sulla difesa planetaria, sulla dinamica dell'impatto e sulla scienza planetaria in generale.

Informazioni poi che potranno essere utilizzate in futuri casi di asteroidi potenzialmente pericolosi per la Terra.

Un esempio fondamentale degli sviluppi delle tecniche per il rischio di impatto asteroidale è rappresentato proprio dal NEA 2024 YR4, per il quale mediante il metodo RADAU è stato possibile abbassare la probabilità di impatto con la Terra allo 0%, per il giorno 22 dicembre 2032, e sviluppare possibili missioni di monitoraggio e ricognizione dell'asteroide prima della sua riapparizione del 2032.

Alla fine di questo progetto vorrei ringraziare la
Professoressa Monica Lazzarin per la fiducia e
l'immediata disponibilità.

Un grande grazie al Dottor Andrea Farina per la
disponibilità, e la continua presenza durante tutte le
fasi della stesura.

- 1P/Halley: Photograph courtesy Harvard College Observatory.
- Bennu: <https://www.focus.it/scienza/spazio/bennu-2182-impatto-asteroide-terra>
- Ryugu: https://it.wikipedia.org/wiki/162173_Ryugu
- Classificazione NEAs: <https://www.uai.it/sito/news/uai-ricerca/il-primo-atira-venusiano/>
- 25143 Itokawa: <https://www.eso.org/public/italy/images/eso1405c/>
- 2016 ED85: <https://www.spacereference.org/asteroid/2016-ed85>
- Catalina Sky Survey: <https://catalina.lpl.arizona.edu/gallery/telescopes>
- Sistema binario 1999 KW4: <https://asteroidiedintorni.blog/2019/04/21/lasteroide-1999-kw4-al-flyby-con-la-terra/>
- Sistema binario Didymos: <https://iopscience.iop.org/article/10.3847/PSJ/ad16e6>
- Radiotelescopio di Arecibo: <https://ilbolive.unipd.it/it/news/scienza-ricerca/deciso-destino-radiotelescopio-arecibo>
- Sistema binario Didymos (disegno): <https://doi.org/10.3847/PSJ/ac6f52>
- Spacecraft DART: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0032063317304579?via%3Dihub>
- LICIACube: <https://iopscience.iop.org/article/10.3847/PSJ/ad16e6>
- Mosaico di Dimorphos: <https://doi.org/10.3847/PSJ/ad16e6>
- Spacecraft HERA: <https://doi.org/10.3847/PSJ/ac6f52>
- Lancio di HERA: <https://www.media.inaf.it/2024/10/07/lancio-hera/>
- Juventas: <https://doi.org/10.3847/PSJ/ac6f52>
- Milani: https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Italy/Il_CubeSat_Milani_e_pronto_per_la_missione_Hera
- Deimos: <https://www.media.inaf.it/2025/03/13/hera-flyby-marte/>
- Traiettoria sonda HERA: <https://doi.org/10.3847/PSJ/ac6f52>
- Traiettorie di Janus: <https://arxiv.org/abs/2509.12351v1>