



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA



DIPARTIMENTO
DI GEOSCIENZE

Scuola di Scienze
Dipartimento di Geoscienze

TESI DI LAUREA TRIENNALE IN SCIENZE
GEOLOGICHE

ANALISI TASSONOMICA E MINERALOGICA
DELL'ASTEROIDE BINARIO DIDYMOS DOPO
L'IMPATTO DELLA SONDA DART DELLA NASA

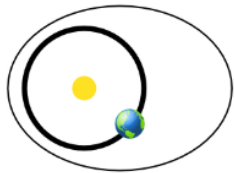
Relatore: Professoressa Monica Lazzarin
Correlatore: Professor Matteo Massironi
Correlatore: Dottorando Andrea Farina

Laureando: Nicholas De Cata
Matricola: 2080018

ANNO ACCADEMICO 2025/2026

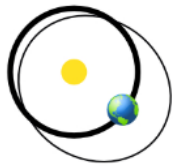
Introduzione Near Earth Objects (NEOs)

-  Piccoli corpi del Sistema Solare con distanza al perielio $q < 1.3$ AU
-  Comprendono NEAs (Near Earth Asteroids) e NECs (Near Earth Comets)
-  Suddivisi in 4 gruppi dal punto di vista dinamico, in base a parametri orbitali: Amors, Apollos, Atens e Atiras



AMORS

$a > 1.0$ AU
 $1.017 < q < 1.3$ AU



APOLLOS

$a > 1.0$ AU
 $q < 1.017$ AU



ATENS

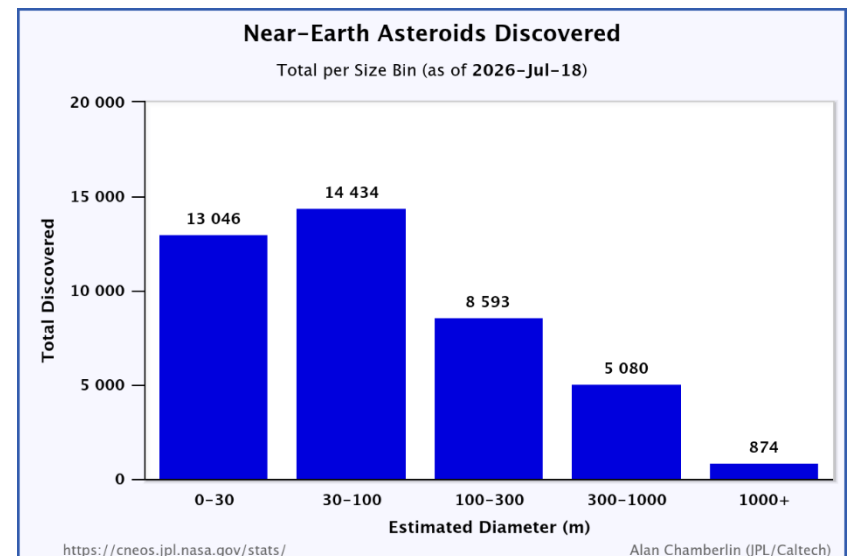
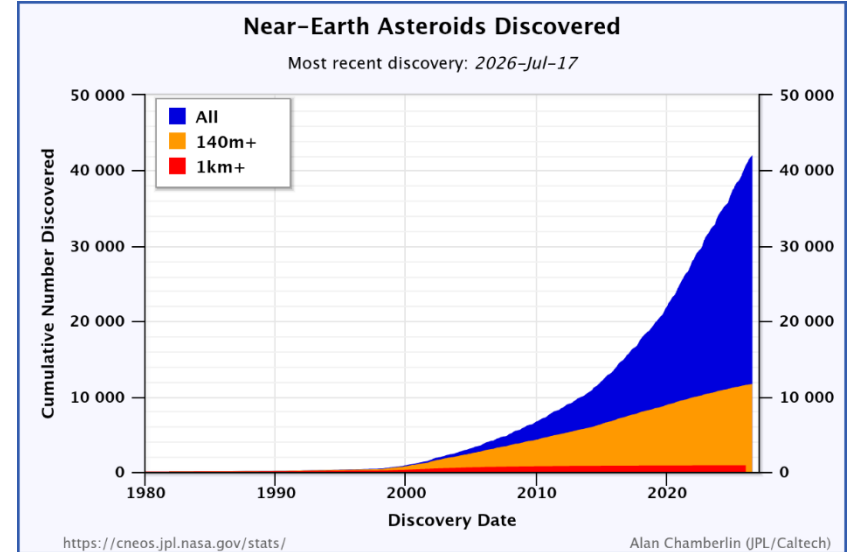
$a < 1.0$ AU
 $Q > 0.983$ AU



ATIRAS

$a < 1.0$ AU
 $Q < 0.983$ AU

(q = perielio, Q = afelio, a = semiasse maggiore)



Potentially Hazardous Asteroids (PHAs)

I PHA sono un sottogruppo dei NEAs, caratterizzato da una maggiore rilevanza in termini di rischio di impatto con la Terra

Un asteroide viene classificato come PHA se



MOID ≤ 0.05 AU

Minima distanza
interorbitale

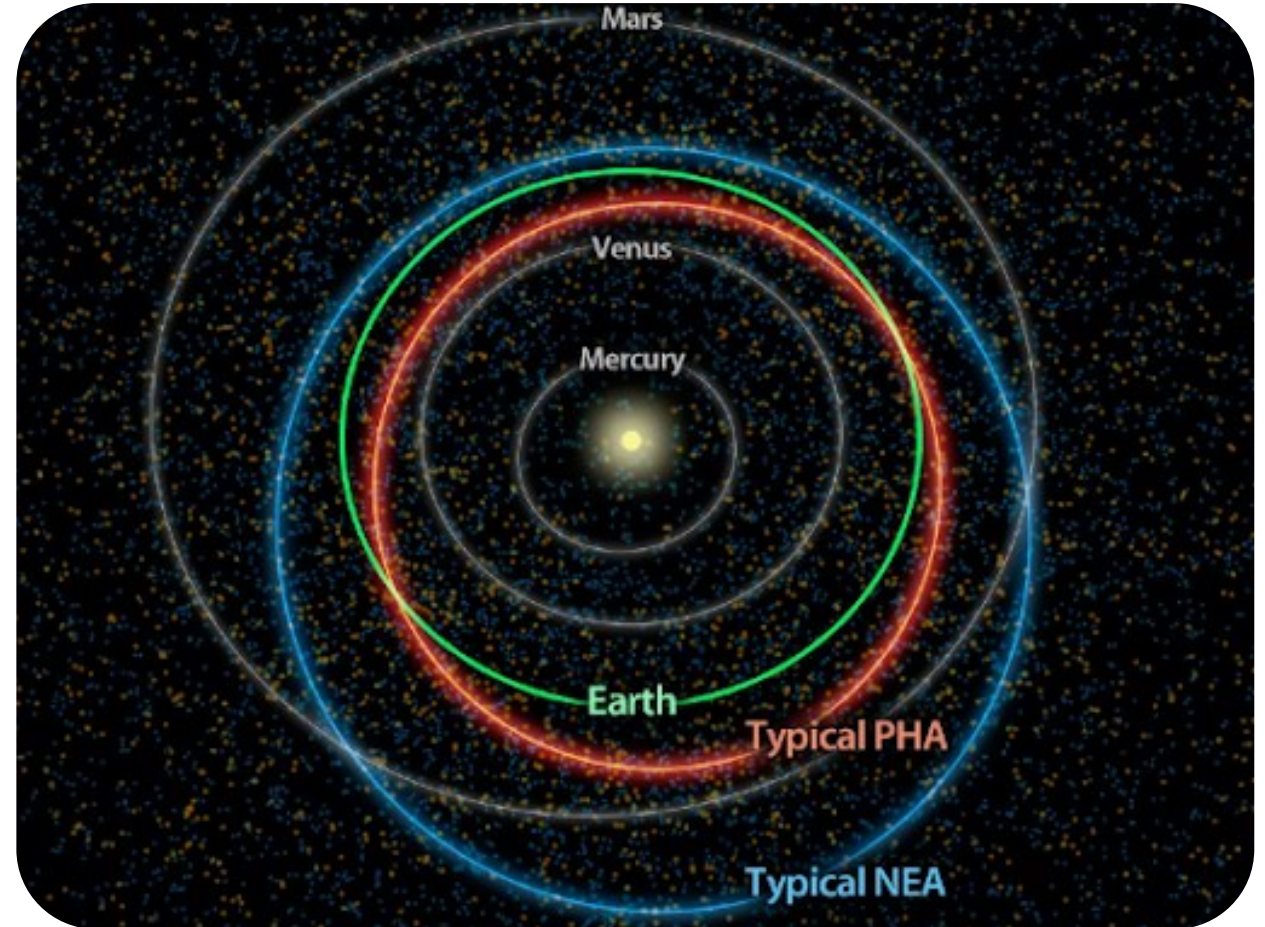


H ≤ 22 (diametro ≥ 140 m)

Magnitudine
del corpo



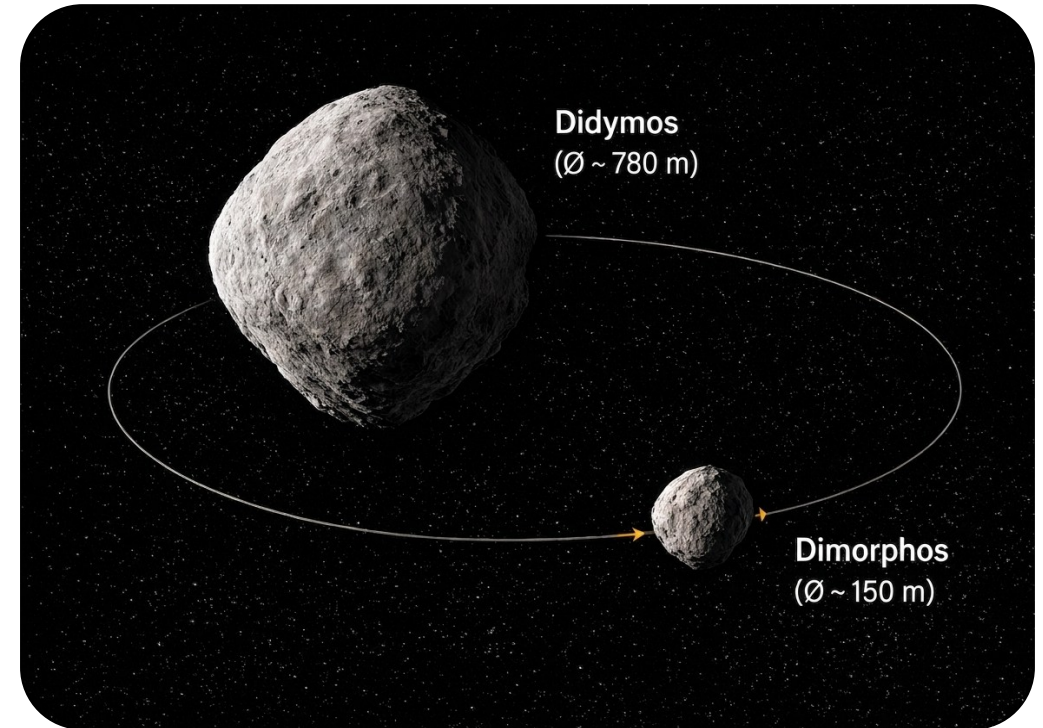
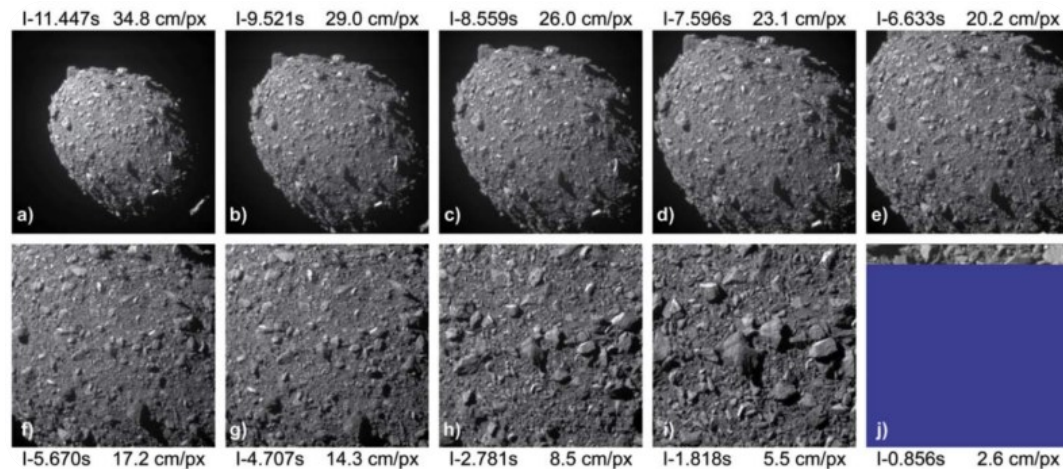
Questi asteroidi possono causare danni su scala locale o regionale, per oggetti superiori a 1 km invece, i danni possono essere globali



Missione DART – Cos'è?

🔍 Test effettuato dalla NASA per verificare la possibilità di deviare l'orbita di un asteroide tramite l'impatto con una sonda

🎯 **Target:** Sistema binario di asteroidi Didymos-Dimorphos



Missione DART - Risultati



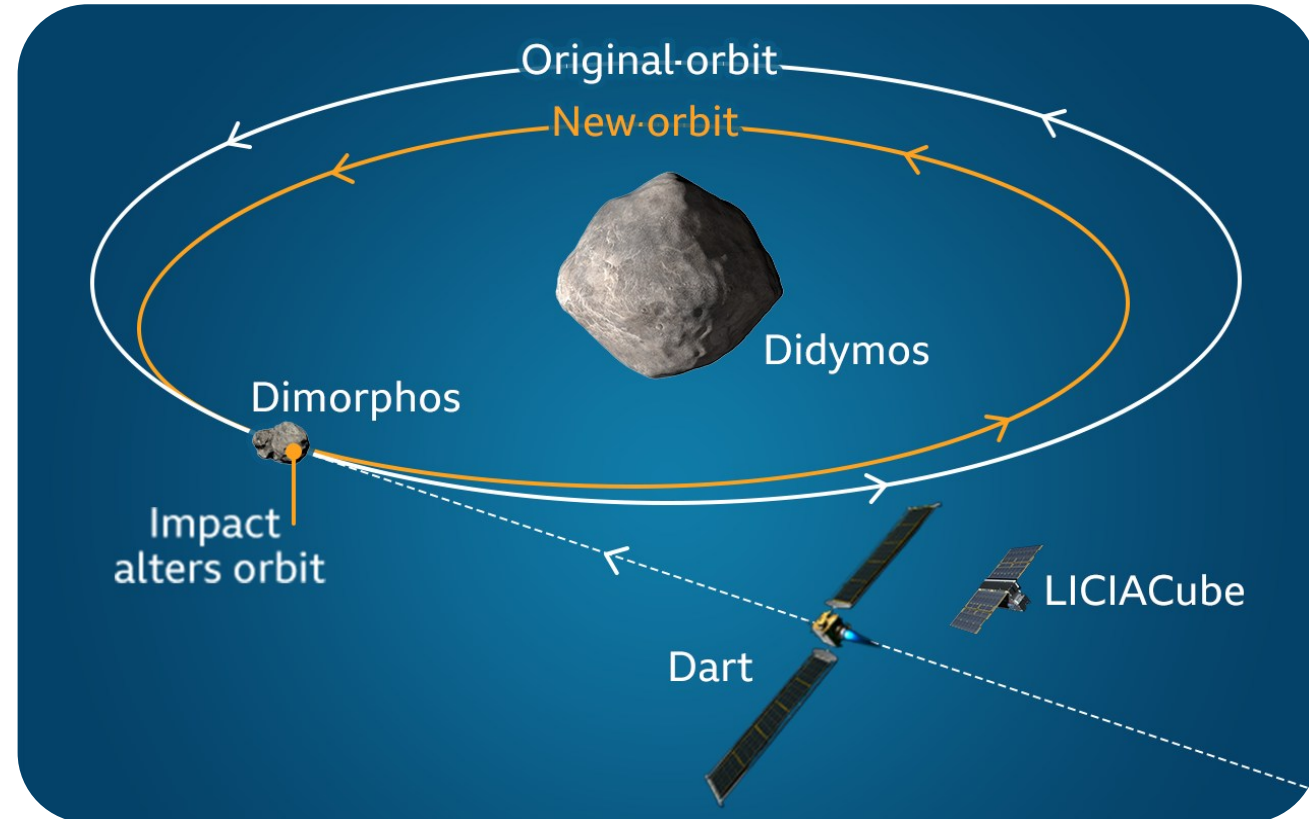
La variazione del periodo orbitale registrata è di circa 33 (± 1) minuti, dimostrando la validità della tecnica



Il materiale espulso all'impatto ha generato un effetto di rinculo, che ha amplificato l'efficacia della deviazione



I risultati suggeriscono che Dimorphos sia un corpo poco coeso, costituito da un insieme di detriti, il cosiddetto “rubble pile”



Obiettivo della Tesi e Strumentazione

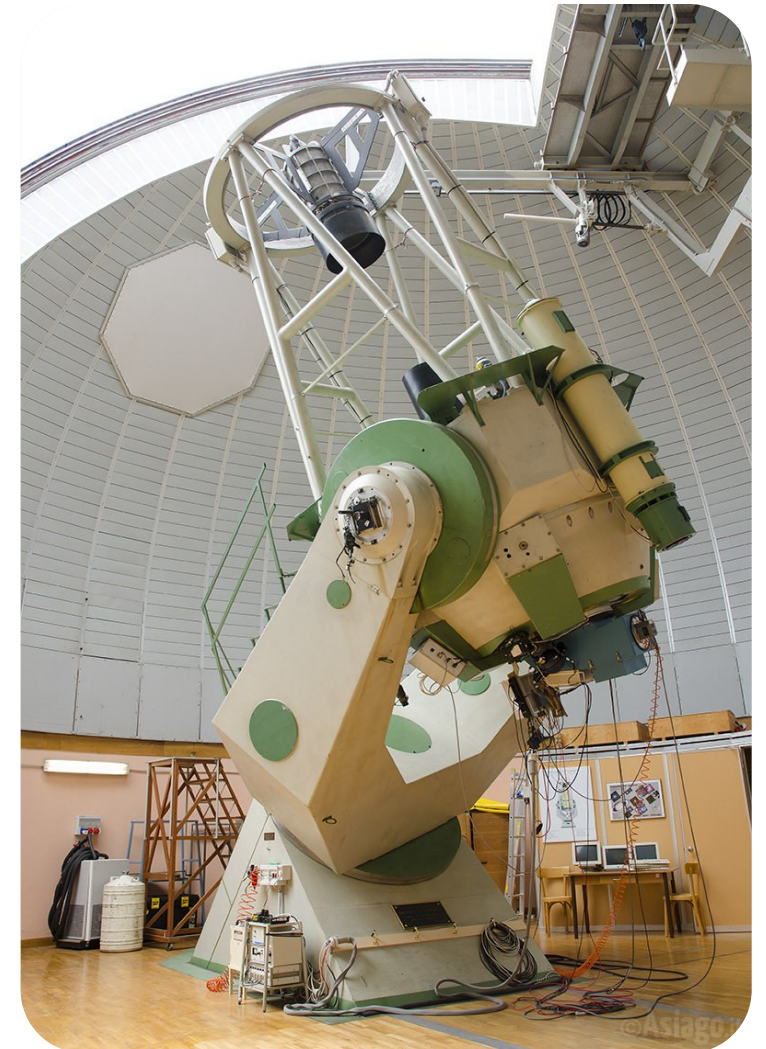


Obiettivo: studio spettroscopico e mineralogico dell'asteroide binario Didymos a seguito dell'impatto con la sonda DART (NASA)



Strumentazione: 1.82 m Telescopio Copernico

Sede	Osservatorio Astrofisico di Asiago (VI)
Strumentazione	AFOSC (spettrografo) + CCD E2V
Diametro Specchio	182 cm
Range Spettrale	4800 – 9200 Å



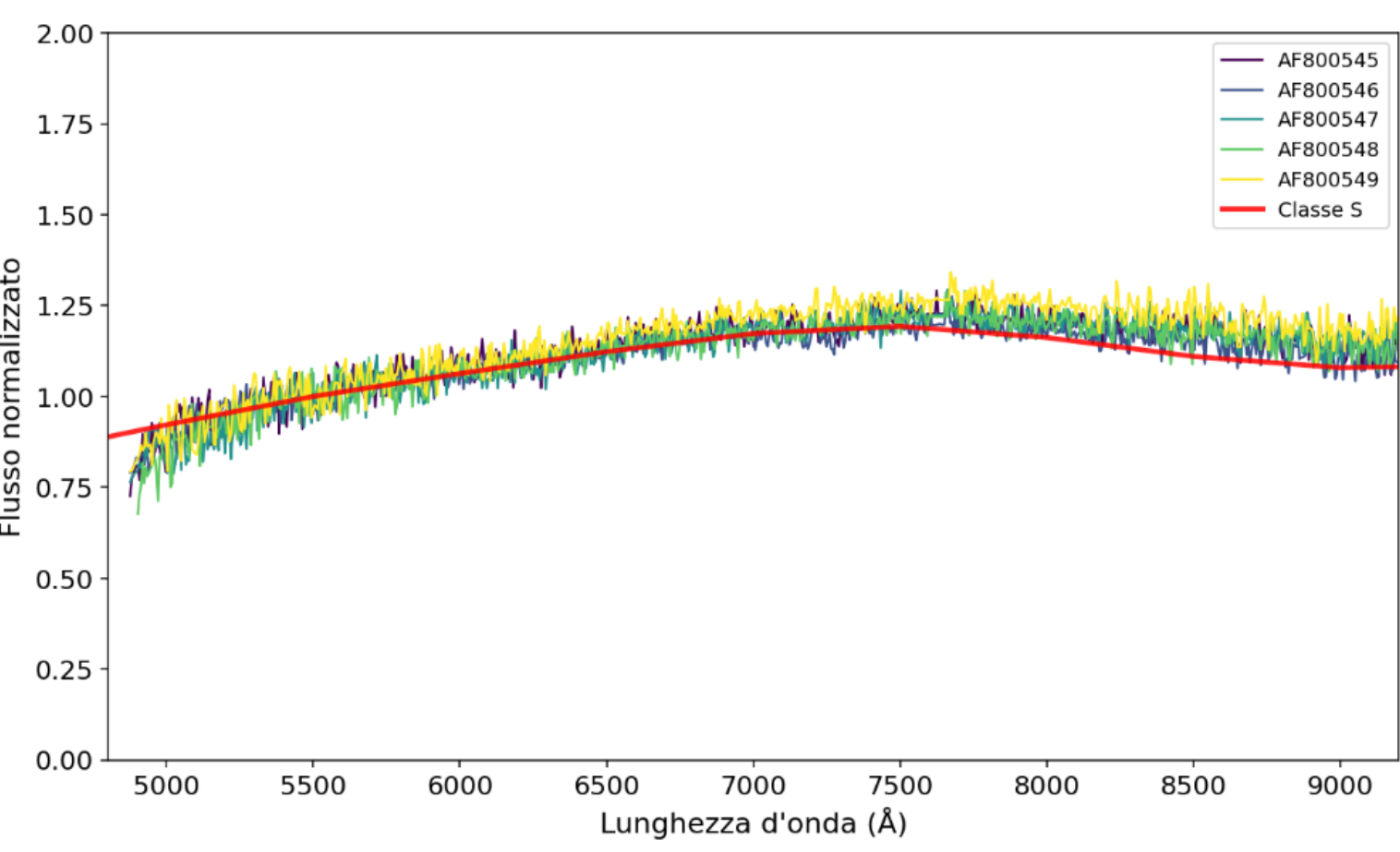
Osservazioni

Tabella dei dati osservativi

NOME	DATA	TEMPO DI ESPOSIZIONE (s)	ANALOGO SOLARE	ALTEZZA (°)	AIRMASS
AF800545	26 Dec 22:09:36.0	1200	Hyades64	54.63	1.225
AF800546	26 Dec 22:33:36.6	1500	Hyades64	58.05	1.171
AF800547	26 Dec 23:03:28.2	1800	Hyades64	62.78	1.119
AF800548	26 Dec 23:36:27.2	1800	Hyades64	67.54	1.080
AF800549	27 Dec 00:10:14.7	1800	Hyades64	71.17	1.056

Analisi Dati

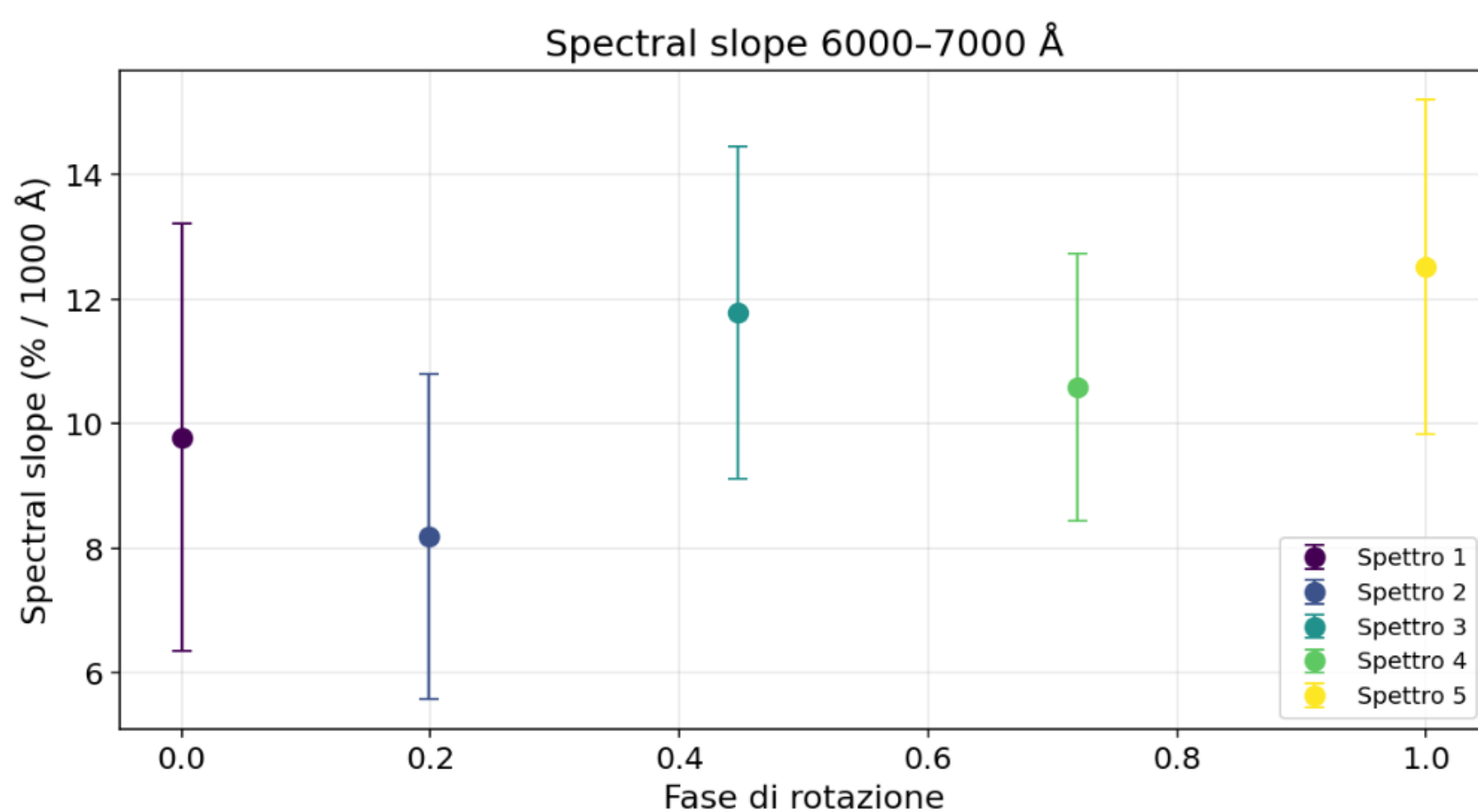
Confronto tra gli spettri di Didymos e la classe tassonomica S



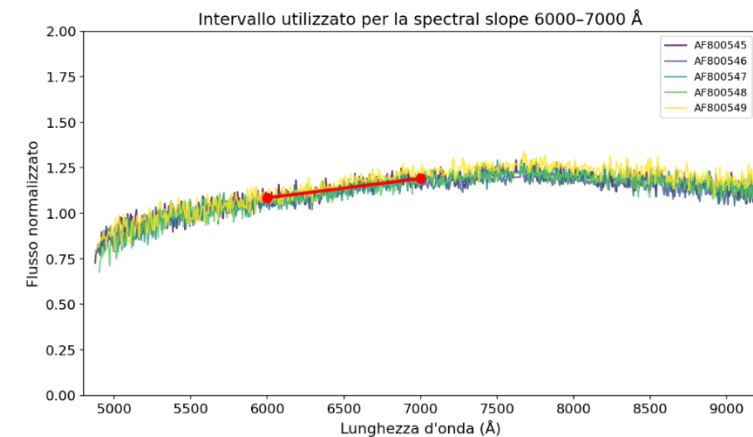
SPETTRO	CLASSE TASSONOMICA	χ^2
AF800545	S	0.002895
	A	0.003482
	Sv	0.003517
AF800546	S	0.001507
	K	0.002778
	Sv	0.003334
AF800547	S	0.003203
	A	0.003801
	Sv	0.004133
AF800548	S	0.002763
	Sv	0.003176
	L	0.004021
AF800549	Sv	0.003960
	S	0.005517
	Sr	0.011767

Analisi Dati

Calcolo della spectral slope per studiare le variazioni della superficie

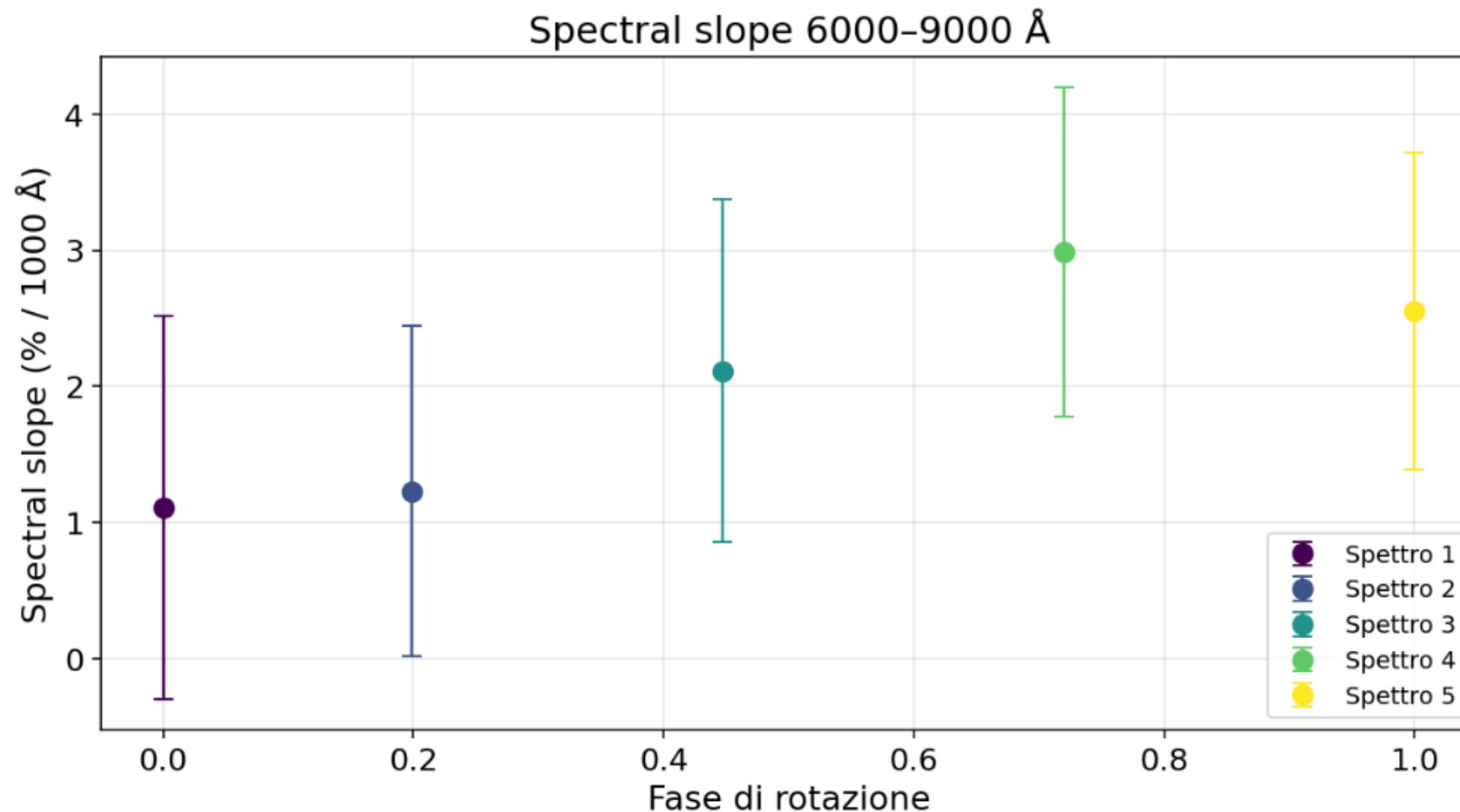


$$S = \frac{\frac{R(\lambda_2) - R(\lambda_1)}{R(\lambda_1)}}{\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{1000}} \times 100$$

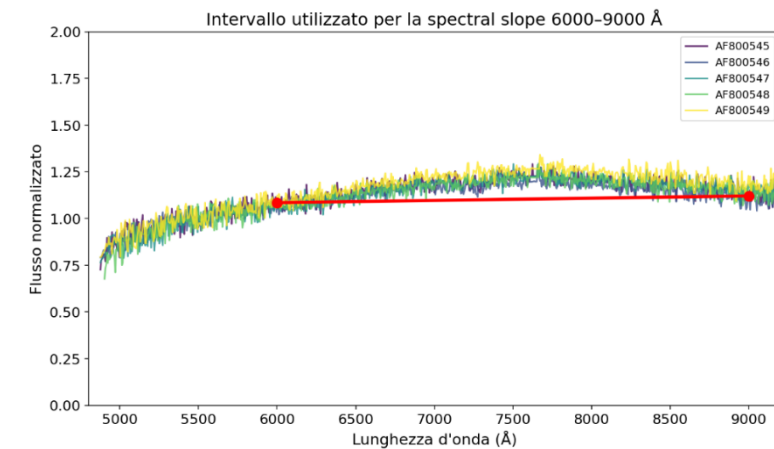


Analisi Dati

Calcolo della spectral slope per studiare le variazioni della superficie

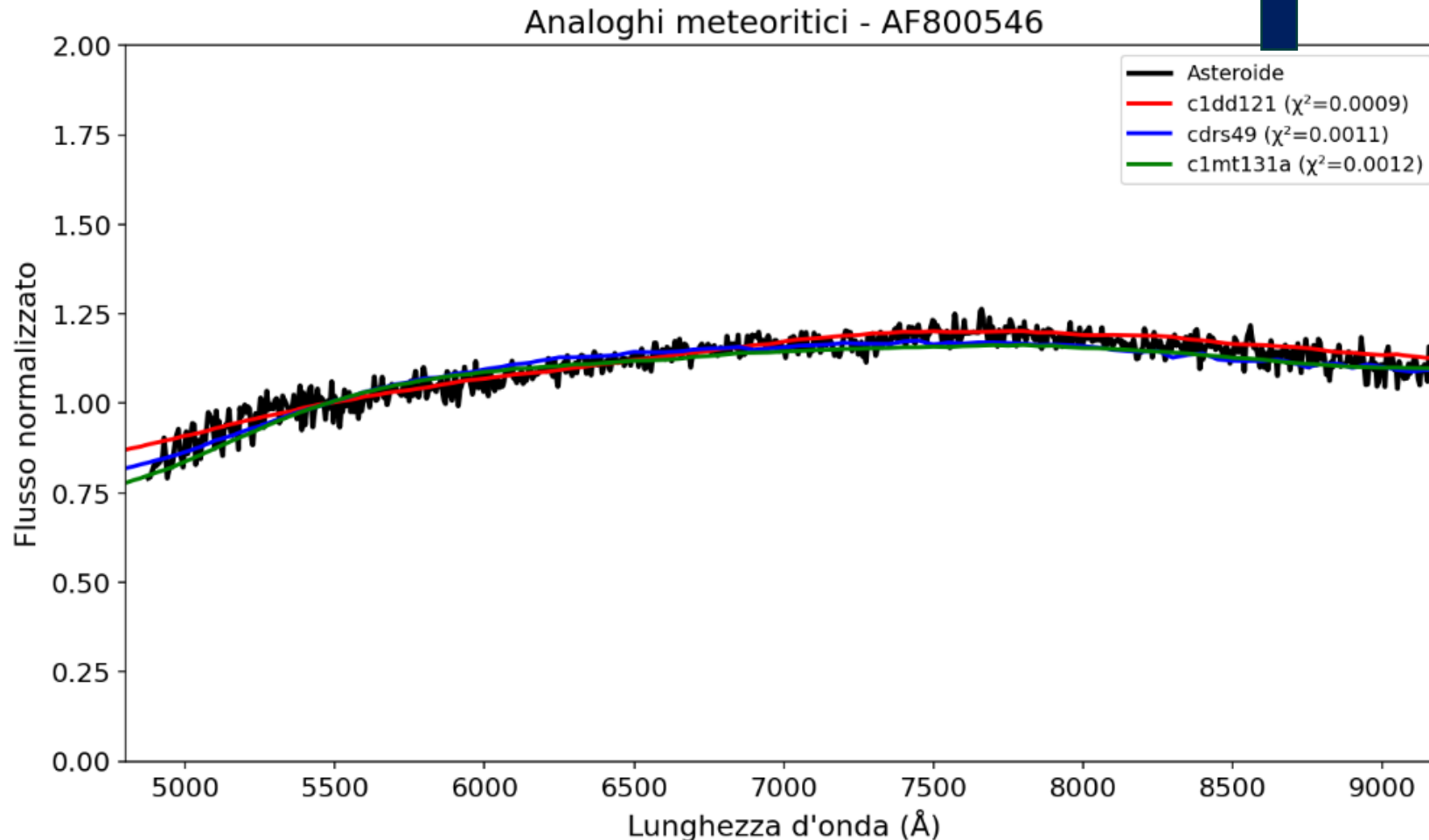


$$S = \frac{\frac{R(\lambda_2) - R(\lambda_1)}{R(\lambda_1)}}{\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{1000}} \times 100$$



Mineralogia

Confronto tra spettro di Didymos e analoghi meteorici



c1dd121 – Nesosilicato (Olivina)
cdrs49 – Condrite ordinaria H5-6
c1mt131a – Condrite ordinaria LL3.1-3.5

Grande affinità con olivina
e con meteoriti LL e H

E' ancora in discussione la
natura dell'asteroide

Missione Hera a novembre
2026 per approfondire

Mineralogia – Condriti Ordinarie

- **Prevalenza:** costituiscono circa l'80% di tutte le cadute meteoritiche e il 90% delle meteoriti rocciose.
- **Composizione:** ricche di condruoli (sferule fuse di ~0.5-1 mm), matrice sparsa (10-15%), inclusioni CAI e una quantità variabile della lega Fe-Ni.
- **Chimica:** impoverite in elementi litofili refrattari (Ca, Al, Ti, REE) e caratterizzate da elevati rapporti isotopici $^{17}\text{O}/^{16}\text{O}$ rispetto a $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ se paragonati alle rocce terrestri.

Classificazione Tripartita basata sul contenuto di ferro totale e metallico: gruppo **H** (High), **L** (Low) e **LL** (Low-Low).



Mineralogia – Condriti LL

Chimica

Contenuto minimo di ferro totale (19-22%) e metallo libero (solo 0.3-3%). La maggior parte del ferro è ossidata e legata ai silicati.

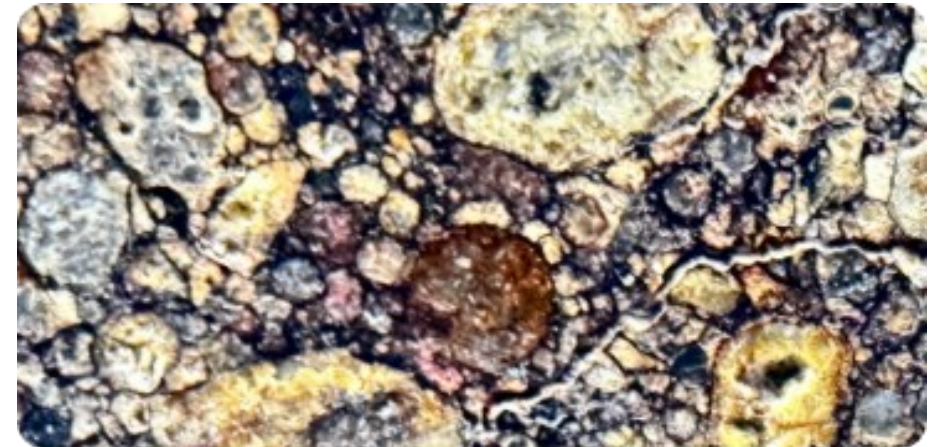
Mineralogia

Composte principalmente da olivina (ricca in fayalite) e iperstene. I condrioli sono tipicamente più grandi rispetto ai gruppi H ed L.

Metamorfismo

Classificate dal tipo 3 al 7. La maggior parte ha subito forte metamorfismo termico (tipi 5-6), rendendo i bordi dei condrioli meno distinti.

Origine: Si ritiene provengano da asteroidi della fascia principale interna. Storicamente chiamate "anfoteriti" perché considerate una fase di transizione tra condriti e acondriti.



Mineralogia – Condriti H

Chimica

Caratterizzate da un alto contenuto di ferro totale (25-31% in peso) con un'abbondante presenza di metallo libero (15-19%), che le rende magnetiche.

Mineralogia

Composte da olivina povera di ferro e ortopirosseno magnesiaco (bronzite). I condriuli sono tipicamente molto piccoli (~0.3 mm di diametro medio).

Metamorfismo

Classificate dal tipo 3 al 7. Presentano gradi di alterazione termica molto variabili, anche se circa il 40% appartiene alla classe petrologica H5.



Origine: Lo spettro di riflettanza mostra una fortissima affinità con l'asteroide di tipo S «6 Hebe» della fascia principale interna, da cui deriverebbero a seguito di storiche collisioni.

Conclusioni

1

Tipo Spettrale S

Il confronto tra gli spettri e le classi tassonomiche standard conferma la natura silicatica di Didymos.

2

Superficie Omogenea

L'andamento stabile delle spectral slope dimostra che Didymos presenta una composizione uniforme in tutta la superficie.

3

LL VS H

La complessa affinità mineralogica con condriti LL o H è in attesa di essere definita con l'arrivo della missione Hera.

Ringraziamenti

Vorrei ringraziare
la commissione per la cortese attenzione;
la mia relatrice e i miei correlatori per il costante supporto e
la disponibilità;
l'Osservatorio di Asiago per l'ospitalità e la bellissima
esperienza.

Bibliografia

Kokhirova, G. I., & Babadzhanov, P. B. (2023). Current knowledge of objects approaching the Earth.

Grav, T., Mainzer, A. K., Masiero, J. R., Dahlen, D. W., Spahr, T., Bottke, W. F., & Masci, F. J. (2023). The NEO Surveyor Near-Earth Asteroid Known Object Model.

Schelte J. Bus and Richard P. Binzel (2002). Phase II of the Small Main-Belt Asteroid Spectroscopic Survey-The Observations.

Schelte J. Bus and Richard P. Binzel (2002). Phase II of the Small Main-Belt Asteroid Spectroscopic Survey-A Feature-Based Taxonomy.

Francesca E. DeMeo, Richard P. Binzel, Stephen M. Slivan, Schelte J. Bus (2009). An extension of the Bus asteroid taxonomy into the near-infrared.

Francesca E. DeMeo, Brian J. Burt, Michaël Marsset, David Polishook, Thomas H. Burbine, Benoît Carry, Richard P. Binzel, Pierre Vernazza, Vishnu Reddy, Michelle Tang, Cristina A. Thomas, Andrew S. Rivkin, Nicholas A. Moskovitz, Stephen M. Slivan and Schelte J. Bus (2022). Connecting Asteroids and Meteorites with visible and near-infrared Spectroscopy.

Zhong-Yi Lin, Jean-Baptiste Vincent, and Wing-Huen Ip (2023). Physical properties of the Didymos system before and after the DART impact.

Cristina A. Thomas, Shantanu P. Naidu, Peter Scheirich, Nicholas A. Moskovitz, Petr Pravec, Steven R. Chesley, Andrew S. Rivkin, David J. Osip, Tim A. Lister, Lance A. M. Benner, Marina Brozović, Carlos Contreras, Nidia Morrell, Agata Rožek, Peter Kušnirák, Kamil Hornoch, Declan Mages, Patrick A. Taylor, Andrew D. Seymour, Colin Snodgrass, Uffe G. Jørgensen, Martin Dominik, Brian Skiff, Tom Polakis, Matthew M. Knight, Tony L. Farnham, Jon D. Giorgini, Brian Rush, Julie Bellerose, Pedro Salas, William P. Armentrout, Galen Watts, Michael W. Busch, Joseph Chatelain, Edward Gomez, Sarah Greenstreet, Liz Phillips, Mariangela Bonavita, Martin J. Burgdorf, Elahe Khalouei, Penélope Longa-Peña, Markus Rabus, Sedighe Sajadian, Nancy L. Chabot, Andrew F. Cheng, William H. Ryan, Eileen V. Ryan, Carrie E. Holt, Harrison F. Agrusa (2023). Orbital Period Change of Dimorphos Due to the DART Kinetic Impact.

Bibliografia

R. Terik Daly, Carolyn M. Ernst, Olivier S. Barnouin, Nancy L. Chabot, Andrew S. Rivkin, Andrew F. Cheng, Elena Y. Adams, Harrison F. Agrusa, Elisabeth D. Abel, Amy L. Alford, Erik I. Asphaug, Justin A. Atchison, Andrew R. Badger, Paul Baki, Ronald-L. Ballouz, Dmitriy L. Bekker, Julie Bellerose, Shyam Bhaskaran, Bonnie J. Buratti, Saverio Cambioni, Michelle H. Chen, Steven R. Chesley, George Chiu, Gareth S. Collins, Matthew W. Cox, Mallory E. DeCoster, Peter S. Ericksen, Raymond C. Espiritu, Alan S. Faber, Tony L. Farnham, Fabio Ferrari, Zachary J. Fletcher, Robert W. Gaskell, Dawn M. Graninger, Musad A. Haque, Patricia A. Harrington-Duff, Sarah Hefter, Isabel Herreros, Masatoshi Hirabayashi, Philip M. Huang, Syau-Yun W. Hsieh, Seth A. Jacobson, Stephen N. Jenkins, Mark A. Jensenius, Jeremy W. John, Martin Jutzi, Tomas Kohout, Timothy O. Krueger, Frank E. Laipert, Norberto R. Lopez, Robert Luther, Alice Lucchetti, Declan Mages, Simone Marchi, Anna C. Martin, Maria E. McQuaide, Patrick Michel, Nicholas A. Moskovitz, Ian W. Murphy, Naomi Murdoch, Shantanu P. Naidu, Hari Nair, Michael C. Nolan, Jens Ormö, Maurizio Pajola, Eric E. Palmer, James M. Peachey, Petr Pravec, Sabina D. Raducan, K.T. Ramesh, Joshua R. Ramirez, Edward L. Reynolds, Joshua E. Richman, Colas Q. Robin, Luis M. Rodriguez, Lew M. Roufberg, Brian P. Rush, Carolyn A. Sawyer, Daniel J. Scheeres, Petr Scheirich, Stephen R. Schwartz, Matthew P. Shannon, Brett N. Shapiro, Caitlin E. Shearer, Evan J. Smith, R. Joshua Steele, Jordan K. Steckloff, Angela M. Stickle, Jessica M. Sunshine, Emil A. Superfin, Zahi B. Tarzi, Cristina A. Thomas, Justin R. Thomas, Josep M. Trigo-Rodríguez, B. Teresa Tropic, Andrew T. Vaughan, Dianna Velez, C. Dany Waller, Daniel S. Wilson, Kristin A. Wortman, Yun Zhang (2023). Successful Kinetic Impact into an Asteroid for Planetary Defense.

J. D. P. Deshapriya, P. H. Hasselmann, I. Gai, M. Hirabayashi, E. Dotto, A. Rossi, A. Zinzi, V. Della Corte, I. Bertini, S. Ieva, E. Mazzotta Epifani, M. Dall'Ora, S. Ivanovski, D. Perna, T. L. Farnham, M. Amoroso, J. R. Brucato, A. Capannolo, S. Caporali, M. Ceresoli, Nancy L. Chabot, A. Cheng, G. Cremonese, R. T. Daly, E. G. Fahnestock, L. Gomez Casajus, E. Gramigna, G. Impresario, R. Lasagni Manghi, M. Lavagna, J.-Y. Li, M. Lombardo, A. Lucchetti, D. Modenini, M. Pajola, Eric E. Palmer, P. Palumbo, S. Pirrotta, G. Poggiali, A. S. Rivkin, P. Sanchez, G. Tancredi, P. Tortora, F. Tusberty, M. Zannoni, G. Zanotti (2023). Characterization of the DART Impact Ejecta Plume on Dimorphos from LICIACube Observations.

David Polishook, Francesca E. DeMeo, Brian J. Burt, Cristina A. Thomas, Andrew S. Rivkin, Juan A. Sanchez, Vishnu Reddy (2023). Near-IR Spectral Observations of the Didymos System: Daily Evolution Before and After the DART Impact Indicates that Dimorphos Originated from Didymos.

Bibliografia

Nancy L. Chabot, Andrew S. Rivkin, Andrew F. Cheng, Olivier S. Barnouin, Eugene G. Fahnestock, Derek C. Richardson, Angela M. Stickle, Cristina A. Thomas, Carolyn M. Ernst, R. Terik Daly, Elisabetta Dotto, Angelo Zinzi, Steven R. Chesley, Nicholas A. Moskovitz, Brent W. Barbee, Paul Abell, Harrison F. Agrusa, Michele T. Bannister, Joel Beccarelli, Dmitriy L. Bekker, Megan Bruck Syal, Bonnie J. Buratti, Michael W. Busch, Adriano Campo Bagatin, Joseph P. Chatelain, Sidney Chocron, Gareth S. Collins, Luca Conversi, Thomas M. Davison, Mallory E. DeCoster, J. D. Prasanna Deshapriya, Siegfried Eggl, Raymond C. Espiritu, Tony L. Farnham, Marin Ferrais, Fabio Ferrari, Dora Föhring, Oscar Fuentes-Muñoz, Igor Gai, Carmine Giordano, David A. Glenar, Edward Gomez, Dawn M. Graninger, Simon F. Green, Sarah Greenstreet, Pedro H. Hasselmann, Isabel Herreros, Masatoshi Hirabayashi, Marek Husárik, Simone Ieva, Stavro L. Ivanovski, Samuel L. Jackson, Emmanuel Jehin, Martin Jutzi, Ozgur Karatekin, Matthew M. Knight, Ludmilla Kolokolova, Kathryn M. Kumamoto, Michael Küppers, Fiorangela La Forgia, Monica Lazzarin, Jian-Yang Li, Tim A. Lister, Ramin Lolachi, Michael P. Lucas, Alice Lucchetti, Robert Luther, Rahil Makadia, Elena Mazzotta Epifani, Jay McMahon, Gianmario Merisio, Colby C. Merrill, Alex J. Meyer, Patrick Michel, Marco Micheli, Alessandra Migliorini, Kate Minker, Dario Modenini, Fernando Moreno, Naomi Murdoch, Brian Murphy, Shantanu P. Naidu, Hari Nair, Ryota Nakano, Cyrielle Opitom, Jens Ormö, J. Michael Owen, Maurizio Pajola, Eric E. Palmer, Pasquale Palumbo, Paolo Panicucci, Laura M. Parro, Jason M. Pearl, Antti Penttilä, Davide Perna, Elisabeta Petrescu, Petr Pravec, Sabina D. Raducan, K. T. Ramesh, Ryan Ridden-Harper, Juan L. Rizos, Alessandro Rossi, Nathan X. Roth, Agata Rožek, Benjamin Rozitis, Eileen V. Ryan, William H. Ryan, Paul Sánchez, Toni Santana-Ros, Daniel J. Scheeres, Peter Scheirich, Cem Berk Senel, Colin Snodgrass, Stefania Soldini, Damya Souami, Thomas S. Statler, Rachel Street, Timothy J. Stubbs, Jessica M. Sunshine, Nicole J. Tan, Gonzalo Tancredi, Calley L. Tinsman, Paolo Tortora, Filippo Tusberty, James D. Walker, C. Dany Waller, Kai Wünnemann, Marco Zannoni, Yun Zhang (2024). Achievement of the Planetary Defense Investigations of the Double Asteroid Redirection Test (DART) Mission.

Patrick Michel, Michael Küppers, Adriano Campo Bagatin, Benoit Carry, Sébastien Charnoz, Julia de León, Alan Fitzsimmons, Paulo Goudon, Simon E. Green, Alain Hérique, Tomaz Kocifaj, Monica Lazzarin, Naomi Murdoch, Tatsuaki Okada, Ernesto Palomba, Petr Pravec, Colin Snodgrass, Paolo Tortora, Kleomenis Tsiganis, Stephan Ulamec, Jan-Baptist Vincent, Zhuang Yuan, Sabina D. Raducan, Elisabetta Dotto, Nancy Chabot, Andy F. Cheng, Andrii Makarenko, Olivier Barnouin, Carolyn Ernst, Angela Schleicher, Richard von der Luhe, Cristina Thomas, Maryam Ali, Haris V. M., Akiko Nakamura, Seiji Sugita, Makoto Yoshikawa, Paul Abell, Erik Asphaug, Ronald-Louis Ballouz, William F. Bottke, Dan D. D. D., Samuel J. Laurretta, Kevin J. Walsh, Paolo Martino, Jan Carnelli (2022). The ESA Hera Mission: Detailed Characterization of the DART Impact Outcome and of the Binary Asteroid (65803) Didymos.

Sylvain Lodiot, Caglayan Guerbuez (2025). Hera ESOC/ESA Operations: First Months in Flight and Asteroid Phase Planning Concepts.

Bibliografia

Patrick Michel, Michael Küppers, Alan Fitzsimmons, Simon Green, Monica Lazzarin, Stephan Ulamec, Paul Abell, Seiji Sugita, Adriano Campo Bagatin, Benoit Carry, Sébastien Charnoz, Julia de León, Fabio Ferri, Alain Hérique, Martin Jutzi, Özgür Karatekin, Tomas Kohout, Naomi Murdoch, Tatsuaki Okada, Ernesto Palomba, Petr Pravec, Sabina Raducan, Colin Snodgrass, Paolo Tortora, Jean-Baptiste Vincent, Kai Wünnemann (2025). The Hera Space Mission in the Context of Small Near-Earth Asteroid Missions in the Past, Present and Future.

Sitografia

CNEOS – Center for Near Earth Object Studies (NASA/JPL). Discovery Statistics: Cumulative Totals. <https://cneos.jpl.nasa.gov/stats/totals.html>

CNEOS – Center for Near Earth Object Studies (NASA/JPL). Discovery Statistics: by Size. <https://cneos.jpl.nasa.gov/stats/size.html>

CNEOS – Center for Near Earth Object Studies (NASA/JPL). NEO Basics: NEO Groups. https://cneos.jpl.nasa.gov/about/neo_groups.html

LSA – Luxembourg Space Agency / Asteroid Foundation (2023). LEARN – What are Potentially Hazardous Asteroids?
<https://asteroidday.org/resources/asteroid-learning/learn-what-are-potentially-hazardous-asteroids/>

LotusArise IAS. *DART Mission (Double Asteroid Redirection Test)*. <https://lotusarise.com/inshorts/dart-mission-upsc/>

Murara, M. Condriti ordinarie. <https://www.astrofilitrentini.it/mat/meteor/ordchond.html>