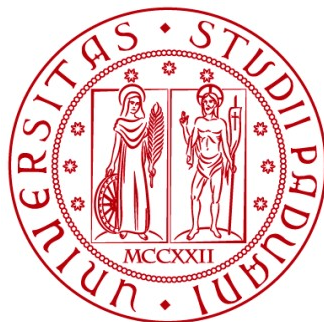


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
DIPARTIMENTO DI FISICA E ASTRONOMIA
Corso di Laurea Magistrale in Astronomia



**La difesa planetaria da asteroidi tra
comunicazione e scienza:
le missioni DART ed Hera**

Relatrice: Prof.ssa Monica Lazzarin
Dipartimento di Fisica e Astronomia

Correlatrici: Dott.ssa Rossella Spiga
Istituto Nazionale di Astrofisica

Dott.ssa Fiorangela La Forgia
Dipartimento di Fisica e Astronomia

Laureando: Fabrizio Cabras

ANNO ACCADEMICO 2021/2022

INDICE

ABSTRACT	5
COMUNICARE LA SCIENZA	7
1.1 La comunicazione della scienza	7
1.2 La comunicazione dell'astronomia	12
1.3 La comunicazione del rischio e del fallimento	18
DIFESA PLANETARIA	23
2.1 Corpi minori del sistema solare	24
2.1.1 Asteroidi	24
2.1.2 Famiglie dinamiche.....	29
2.1.3 NEO	31
2.1.4 PHA (Potentially Hazardous Asteroids).....	33
2.1.5 Rischi e conseguenze	40
2.1.6 Storie di impatti	44
PROGRAMMI DI SCOPERTA E MONITORAGGIO DI NEAR EARTH OBJECTs E PRINCIPALI MISSIONI AD ASTEROIDI.....	47
3.1 Programmi di monitoraggio e controllo da Terra	48
3.1.1 Programmi NASA.....	48
3.1.2 Programmi ESA	52
3.2 Missioni spaziali	57
3.3 Tecniche di mitigazione	65
3.3.1 Trattore gravitazionale	65
3.3.2 Esplosione nucleare.....	68
3.3.3 Impattatore cinetico	69
3.4 La missione AIDA	71
3.4.1 DART	73
3.4.1 Hera	77
COMUNICARE L'ESPLORAZIONE SPAZIALE: DUE CASI STUDIO	81
4.1 Dalla <i>space age</i> alla <i>space economy</i> : le implicazioni della comunicazione...81	
4.2 I casi studio: DART ed Hera.....	84
4.2.1 La NASA.....	85

4.2.2 L' ESA	87
4.3 Analisi comparativa delle strategie di comunicazione	91
4.3.1 La comunicazione NASA della missione DART	91
4.3.2 La comunicazione ESA della missione Hera	94
4.4 Approfondimento: intervista all'ESA	96
CONCLUSIONI	103
APPENDICE	105
BIBLIOGRAFIA	109
RINGRAZIAMENTI	

ABSTRACT

Sempre più spesso sentiamo parlare di difesa planetaria. La Terra subisce da sempre un bombardamento continuo di materiale proveniente dallo Spazio che può andare da minuscole particelle a oggetti di dimensioni non trascurabili; questi oggetti chiamati NEO (*Near Earth Objects*) sono veri e propri asteroidi o frammenti di essi e orbitano in prossimità della Terra intersecando talvolta la sua orbita diventando di fatto potenzialmente pericolosi.

I potenziali impatti sul nostro pianeta di corpi di piccole dimensioni hanno iniziato a sollevare negli ultimi tempi una crescente attenzione tra gli scienziati, i governi e cittadini di tutto il mondo; problema che, la comunità scientifica sta cercando di affrontare con un'attività di monitoraggio da Terra e attraverso alcune missioni spaziali.

In particolare, prenderemo in considerazione la missione DART della NASA che ha avuto il compito di deflettere l'orbita di un asteroide e la missione europea Hera, che dovrà studiare gli effetti conseguenti dell'impatto anche nell'ottica di verificare la riproducibilità nel caso si presentasse un evento avverso nel prossimo futuro. Il target delle due missioni è l'asteroide *Dimorphos*, sul quale è stata sperimentata la tecnica dell'impattore cinetico.

Nell'ambito di queste due missioni abbiamo analizzato l'approccio e la strategia di comunicazione delle agenzie spaziali Statunitense (NASA) ed Europea (ESA), protagoniste indiscusse nel panorama geopolitico dell'esplorazione spaziale. Abbiamo quindi messo in evidenza quanto la comunicazione sia un ponte imprescindibile tra la scienza e la società e come lo Spazio rappresenti a tutti gli effetti un campo di frontiera non solo dal punto di vista scientifico e tecnologico ma sia anche strumento di progresso culturale, economico e sociale in senso lato.

CAPITOLO 1

COMUNICARE LA SCIENZA

Come afferma il fisico e filosofo della scienza John Ziman *"Non c'è scienza senza comunicazione"*. La dimensione sociale e comunicativa è infatti da sempre uno degli elementi costitutivi della scienza moderna, sia per quanto riguarda il confronto tra gli stessi scienziati, ma, soprattutto negli ultimi anni, per cercare la legittimazione e il consenso da parte della società. Secondo il sociologo americano Robert Merton (1942), uno dei caratteri distintivi della scienza deve essere il *comunitarismo*, ovvero il mettere in comune. I risultati di studi e di ricerche non sono proprietà del singolo ricercatore ma patrimonio della comunità scientifica e della società. La comunicazione della scienza assume, quindi, un ruolo fondamentale nel tentativo di integrazione tra scienza e società, non solo a livello culturale, ma anche sociale ed economico. Oggigiorno è considerata un elemento co-essenziale della stessa democrazia¹, che vede nascere il diritto di "cittadinanza scientifica" ossia il diritto a partecipare alle scelte di politica della scienza, ciascuno nel suo ruolo e nelle sue competenze. La comprensione dei meccanismi che regolano il funzionamento (e il malfunzionamento) della comunicazione pubblica della scienza sono oggetto, come vedremo a breve, di numerosi studi e teorie.

1.1 La comunicazione della scienza

La comunicazione scientifica, intesa spesso in modo obsoleto come divulgazione, è definita come l'attività di mediazione tra il mondo scientifico e

¹ intesa come democrazia della conoscenza

il pubblico, con l'obiettivo di rendere accessibili contenuti difficilmente comprensibili ai non esperti. Essa ha una lunga tradizione e fa la sua vera comparsa quando Galileo Galilei pubblica nel 1610 il *Sidereus Nuncius*. Per la prima volta uno scienziato, nei suoi scritti mette in risalto due aspetti della "nuova filosofia naturale": da una parte l'osservazione della natura e la formulazione dei modelli di spiegazione, dall'altra la comunicazione dei risultati (del lavoro) alla comunità di esperti in modo che tutti possano conoscerli ma soprattutto verificarli, e concordare oggettivamente sul risultato finale. La scelta, poi, nel 1632 di utilizzare per la prima volta, in un' opera scientifica, il "volgare" anziché il latino, in contrasto con la letteratura scientifica dell'epoca, per la pubblicazione del *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo* spalanca definitivamente le porte della scienza a un pubblico più ampio. Galileo era stato capace di abbattere quel "paradigma della segretezza"² che aveva caratterizzato l'attività scientifica nei secoli precedenti.

Galileo anticipa quello che la *Royal Society*³, enuncerà nel suo primo manifesto (1667); si legge, tra i vari punti, che ai soci è richiesto "un modo di parlare discreto, nudo, naturale, significati chiari, una preferenza per il linguaggio degli artigiani e dei mercanti piuttosto che dei filosofi" (Rossi, 1996).

A partire dal XVIII secolo, con l'Illuminismo, accanto all'attività scientifica degli scienziati fiorisce un'intensa attività di divulgazione, assecondata dal mutato contesto sociale. Si assiste a una notevole produzione di volumi, periodici, almanacchi corredati da un apparato iconografico, i quali presentano, senza eccessive semplificazioni, ma con uno stile asciutto e accessibile, i principi e le teorie del mondo scientifico. Un rappresentante del nuovo filone è ad esempio Bernard le Bovier de Fontanelle⁴ che in *l'Entretiens sur le pluralità des mondes* mette in luce questo intento divulgativo: "Devo avvertire coloro che leggeranno questo libro e che hanno

² Paolo Rossi, storico e filosofo della scienza

³ Accademia Nazionale inglese delle scienze fondata nel 1660

⁴ scrittore francese (1657-1757)

qualche conoscenza della fisica, che non ho assolutamente la pretesa di istruirli, ma solamente divertirli presentandogli, in una maniera un po' più gradevole e più allegra (...)"

Nella seconda parte dell'800 e all'inizio del '900, con la progressiva specializzazione della scienza e dei suoi linguaggi e con la crescente astrazione dei contenuti scientifici, si determinò una separazione sempre più marcata tra scienza e società. Fino al ventesimo secolo gli studi e le ricerche venivano svolti da singoli scienziati o da piccoli gruppi che decidevano cosa studiare e con quali modalità. Questa è stata definita da John Ziman <<l'era accademica della scienza>>, un modo chiuso e autoreferenziale di fare ricerca in cui gli scienziati nella propria "torre d'avorio" non avevano l'esigenza e la necessità di comunicare con altri che non fossero i propri pari⁵.



Figura 1 Rappresentazione artistica della Torre d'avorio. Crediti: DeviantArt

Con il secondo conflitto mondiale e la fine della guerra fredda la società assume maggiore consapevolezza degli effetti che la ricerca scientifica può produrre. L'organizzazione sociale della scienza cambia fortemente: gruppi sempre più allargati di scienziati, anche di diverse nazionalità, lavorano in

⁵ John Ziman, 1987

maniera coordinata, basti pensare al progetto Manhattan⁶ o al programma Apollo⁷. In questa nuova fase la Scienza ha obiettivi legati ai finanziatori, in genere provenienti dal mondo dell'industria o della politica, non più legati alle sole aspettative della comunità scientifica ma dell'intera società (Vannevar Bush, 1945). Sintetizzando, le ricadute della scienza sulla società inducono a ritenere che abbia un impatto collettivo troppo importante per essere lasciata ai soli scienziati. In questa nuova era della scienza, che John Ziman definisce "post-accademica" il rapporto tra scienza e pubblico, alla luce di quello che abbiamo detto, diventa sempre più intrecciato e dinamico. La comunicazione della scienza fa grossi passi avanti soprattutto per quanto riguarda la comunicazione pubblica, ossia la comunicazione al pubblico di non esperti: politici, burocrati, manager delle industrie, militari, movimenti di opinione, organizzazioni non governative e società nel suo complesso⁸. Questa comunicazione non era ritenuta importante nell'era accademica, quando gli scienziati non si ponevano il problema di cosa la società pensasse di loro; ora invece la comunicazione con il pubblico non è più rinviabile, diventa una necessità, una parte del loro mestiere e di conseguenza, il comunicatore deve armarsi di quelle competenze e tecniche alla base di essa.

Per quasi tutto il secolo scorso, le correnti di pensiero sulla comunicazione pubblica si basavano sul cosiddetto *modello di deficit* che prevedeva una concezione gerarchica dei saperi e una visione della comunicazione come un processo lineare e unidirezionale di trasferimento della conoscenza. La comunicazione pubblica della scienza è immaginata come un'attività di trasmissione a senso unico, *da chi sa a chi non sa*, di un sapere scientifico descritto come vero e oggettivo, verso un pubblico passivo, afflitto da *deficit* di conoscenza, che ascolta e capisce solo parzialmente l'informazione scientifica.

⁶ programma di ricerca e sviluppo in ambito militare che portò alla realizzazione delle prime bombe atomiche durante il secondo conflitto mondiale

⁷ programma spaziale statunitense (1961-1972) che portò allo sbarco sulla Luna

⁸ Pietro Greco, 2002

Nel 1985 fu pubblicato il *The Public Understanding of Science (PUS)*, un rapporto redatto da una commissione della *Royal Society* nel quale si propone un modello di interpretazione del rapporto tra scienza e società. Esso ritiene che il pubblico sviluppi atteggiamenti antiscientifici fondamentalmente per ignoranza dovuta a una mancata informazione scientifica. I sostenitori del *PUS* ritenevano che la prosperità economica e culturale di una nazione dipendesse dalla scienza e dalla tecnologia, che stava influenzando con impatto sempre maggiore la società. Educare i cittadini alla scienza li avrebbe dotati della cultura essenziale per comprenderla e prendere decisioni consapevoli in modo da risolvere ogni controversia pubblica che avrebbe implicato la scienza.

A fine degli anni '90 del secolo scorso, dopo anni di sforzi nella comunicazione pubblica della scienza, poco era cambiato, addirittura questo modello era stato causa di incomprensioni e paure nei confronti della scienza (Science, 298, 2002:49). Nonostante le risorse e l'impegno impiegati nella comunicazione, l'approccio al problema del rapporto fra scienza e società, secondo la prospettiva di riempire il divario conoscitivo del pubblico, era fallito (Lewenstein, 2003).

In un mondo sempre più partecipato e globalizzato, le decisioni più importanti che riguardano la scienza non vengono più prese dalla sola comunità scientifica (o sono frutto di una decisione puramente politica), ma sono frutto di una trattativa tra più soggetti: scienziati, politici, e cittadini.

Nel marzo 2000 alcuni scienziati britannici del *Committee on Science and Technology* della *House of Lords* pubblicarono un nuovo rapporto intitolato *Science and Society* in cui si propone un nuovo modello, il *Public Engagement with Science and Technology (PEST)*.

I fautori del *PEST* ritengono che educare i cittadini non basta e non serve per aumentare la loro fiducia verso la scienza. Gli scienziati devono uscire dai loro laboratori ed entrare in contatto con il pubblico; questa volta non come gli unici possessori della conoscenza ma come attori alla pari nel dialogo col

pubblico. Il *PEST* quindi è un modello partecipativo che promuove il coinvolgimento del pubblico sulle tematiche della scienza, rendendolo interlocutore nelle decisioni che vedono in gioco problematiche scientifiche con ricadute sociali.

In questa nuova prospettiva, in cui si pone l'enfasi sulle attività di *public engagement*, ossia di coinvolgimento del pubblico, attraverso gli spazi informativi in cui il cittadino può non solo ricevere informazioni ma anche partecipare al dibattito⁹, ha finito per essere abbandonato anche il vecchio termine "divulgazione", frutto di una concezione top-down, tipica dell'era accademica.

L'evoluzione del rapporto tra scienziati e pubblico giunge a una fase nuova: il pubblico non rappresenta solo un soggetto *a cui comunicare* la scienza ma soggetto *con cui comunicare* la scienza e *che comunica a sua volta*. Questo cambio di paradigma è stato possibile anche grazie al ruolo cruciale che hanno avuto i nuovi media e le nuove tecnologie dell'informazione.

1.2 La comunicazione dell'astronomia

L'astronomia è la scienza che studia i corpi celesti, le loro proprietà, natura ed evoluzione. L'osservazione del cielo e il suo desiderio di conoscenza hanno avuto, nella vita e nel pensiero dell'uomo, un ruolo cruciale sia dal punto di vista pratico, pensiamo per esempio all'agricoltura e alla navigazione, e rappresentato un elemento essenziale all'interno della concezione del mondo, sia religiosa che filosofica, in grado di riflettersi sulla vita sociale. Per questa sua stessa natura svolge storicamente un ruolo importante nella comunicazione pubblica della scienza.

Oltre ad essere il primo comunicatore della scienza moderna, come abbiamo detto in precedenza, Galileo è anche il primo comunicatore dell'astronomia.

⁹ Encot Team, "Encot: The European network of science communication teachers", Public Understanding of Science, (2003), 12, pag. 167-181

Con il *Sidereus Nuncius* (1610) diffonde i risultati acquisiti durante il suo lavoro di osservazione e di studio. L'opera, contraddistinta da un linguaggio semplice e schietto, è una rassegna delle scoperte al cannocchiale avvenute negli anni padovani: il carattere scabro e irregolare della superficie lunare costellata di rilievi e avvallamenti, il gran numero di "stelle fisse" non visibili a occhio nudo che formano la via lattea, la rotazione dei quattro satelliti attorno al pianeta Giove. La prosa è accompagnata da innumerevoli illustrazioni e disegni (fig. 2), in questo modo Galileo apre a una vera e propria rivoluzione culturale¹⁰.



Figura 2 Disegni di Galileo, tratti dal *Sidereus Nuncius*, che illustrano il gioco di luci e ombre sulla superficie lunare.

Parte del successo dell'astronomia fin dall'antichità è dovuta alla sua diretta accessibilità, il cielo notturno è osservabile da chiunque e in qualsiasi parte del mondo: basti pensare ad eventi astronomici come le eclissi a cui tutti possono assistere.

I fenomeni astronomici creano un forte interesse mediatico e sono correlati da una serie di immagini di spettacolare bellezza (fig. 3) che hanno il potere di catturare l'attenzione creando coinvolgimento emotivo agli occhi del

¹⁰ P. Greco, *I nipoti di Galileo*, Dalai Editore (2011).

pubblico. Grazie al potere delle immagini l'astronomia, più di ogni altra disciplina scientifica, ha avuto nel tempo, e ha ancora oggi, lo straordinario potere di catalizzare l'attenzione del pubblico. Come osservato da Schilling¹¹ (2000): "In ogni strabiliante mente l'immagine astronomica esercita la sua magia mostrando l'invisibile [...] astronomico le fotografie ci hanno fatto conoscere il mondo più ampio in cui viviamo - un universo sconfinato di bellezza e meraviglia. L'enorme popolarità dell'astronomia tra bambini e adulti in tutto il mondo deriva in gran parte da questo richiamo visivo"; l'astronomia è letteralmente una scienza visiva. In virtù del fatto che tratta di fenomeni che appaiono distanti dalla nostra concezione, le immagini astronomiche agiscono sull'immaginario delle persone su piani lontani dalla nostra percezione comune.



Figura 3 Pilastrini della creazione, scattata dal telescopio James Webb. Crediti NASA, ESA, CSA, STScI; Joseph DePasquale (STScI), Anton M. Koekemoer (STScI), Alyssa Pagan (STScI).

¹¹ Govert Schilling, giornalista scientifico olandese

Le immagini dell'Universo sono, di per sé, affascinanti e questo è dovuto al fatto che il pubblico percepisce, complice anche la narrativa o il cinema (fig. 4), lo Spazio come una dimensione astratta.



Figura 4 Scena finale del film Guerre stellari: Episodio VI.

Un'altra caratteristica che pone l'astronomia in una posizione privilegiata rispetto alle altre scienze è quella di essere riconosciuta come una scienza dai fini non controversi, essa non ha la fama di inquinare, manipolare la natura, o di essere pericolosa per la salute degli esseri viventi.

Questa accessibilità e popolarità la rendono particolarmente adatta alla sua comunicazione e la avvicinano al pubblico più di ogni altra scienza. Sfruttare questa sua caratteristica può contribuire alla diffusione con più facilità della disciplina, ma allo stesso tempo può essere un potente catalizzatore per tutto il mondo scientifico.



Figura 5 Kepler-16b - JPL Travel Poster¹². Crediti: NASA

Nonostante la curiosità e il fascino che, abbiamo detto, suscita, è diffusa la concezione che essa non sia utile ai fini della vita quotidiana. Da parte dell'opinione pubblica si ha l'idea che essa sia fine a sé stessa senza una reale utilità pratica e senza un reale beneficio. Non molti però sanno che invenzioni pensate e ideate per la ricerca astronomica vengono utilizzate ormai da anni nella nostra vita quotidiana e sono considerate ormai indispensabili; pensiamo ad esempio al sistema GPS (*Global Position*

¹² Dalla campagna di comunicazione della NASA "Vision of the future", 2020. <https://www.jpl.nasa.gov/galleries/visions-of-the-future>

System), creato per la comunicazione con i satelliti in orbita attorno alla Terra, e che ora governa le principali reti di telecomunicazioni di tutto il mondo, banalmente necessaria per accedere ad alcuni servizi sul nostro smartphone; o, ancora per citare lo smartphone, la tecnologia che ci permette di avere sui nostri telefoni fotocamere integrate di piccole dimensioni è stata sviluppata per l'osservazione di immagini astronomiche, sono i cosiddetti sensori CMOS (*Complementary metal-oxide semiconductor*) ormai parte integrante delle nostre fotocamere, e questo, solo per citare due esempi. Essi sono percepiti principalmente come progressi tecnologici di informatica e ingegneria mobile e non come conseguenze della ricerca astronomica.

Come spesso capita per la scienza anche l'astronomia, è talvolta soggetta a una comunicazione sensazionalistica o complottistica e perciò vittima di tante "bufale" (note anche come *fake news*, in inglese), in cui la notizia clamorosa, spesso non veritiera o parzialmente veritiera, trova spazio rispetto a una più pacata e seria spiegazione del fenomeno. Questo tipo di comunicazione trova spesso la sua massima espressione in concomitanza di particolari eventi mediatici, in cui la notizia si fa spazio tra tutte le altre, guadagnando facilmente visibilità e non garantendo risultati significativi. L'informazione scientifica però non dovrebbe essere presente nei media come spot isolato ma con regolarità, questo gioverebbe alla salute sia della scienza che della comunicazione stessa.

Come abbiamo visto prima, anche se l'astronomia è una scienza che non suscita "malumori" in quanto non ha a che fare con la salute o l'incolumità dell'individuo può essere bersaglio di teorie pseudoscientifiche, una tra tutte il terrapiattismo (fig 6). Teorie e notizie che trovano terreno fertile in un mondo che vive una profonda trasformazione dei mass media, e senza intermediari tra mondo scientifico e società, con il conseguente aumento di notizie non verificate, o prodotte da fonti di dubbia provenienza, o addirittura false. L'avvento dei *social network* e la crescita del pubblico che utilizza queste

piattaforme non ha fatto che acuire ancor di più se vogliamo questo fenomeno.



Figura 6 Notizia del raduno di terrapiattisti a Milano il 24 novembre 2019 riportata sulle pagine online del Corriere della Sera. Crediti: Corriere della Sera.

In questo caso, e come vedremo a breve, comunicare l'astronomia significa porsi di fronte a questo problema in modo da poter guidare il pubblico alla corretta interpretazione della notizia.

1.3 La comunicazione del rischio e del fallimento

Tuttavia in casi particolari, come vedremo a partire dal prossimo capitolo, l'astronomia può essere legata al concetto di rischio, pensiamo all'argomento di questo lavoro di tesi: la difesa di un probabile impatto sulla terra di un oggetto celeste, a cui si uniscono i rischi legati al fallimento, due fattori che sono spesso enfatizzati dai media e comunicati in maniera spesso sommaria e non rigorosa.

Comunicare il rischio significa occuparsi di tematiche che riguardano la sicurezza e/o la salute degli individui, e di conseguenza analizzare le

conoscenze, gli atteggiamenti e i comportamenti di essi. Riteniamo, quindi, doveroso accennare al rischio e alla sua comunicazione nel contesto scientifico.

Per iniziare definiamo il concetto di rischio da non confondere con quello di pericolo, anche se nel linguaggio comune i due concetti sono spesso ritenuti sinonimi, in realtà si tratta di due concetti distinti.

Quando parliamo di pericolo ci riferiamo ad un evento (o oggetto) che causa danni a chi ne viene a contatto (incendio, terremoto, inondazione), esso rappresenta soltanto un elemento del concetto più complesso di rischio. Il rischio invece, non presuppone la certezza del danno, ma indica la probabilità che l'evento produca il danno, espresso in funzione della vulnerabilità (capacità di resistere ad un particolare evento) e dell'esposizione (valore degli elementi potenzialmente interessati all'evento) del sistema.

Il rischio è quindi legato alla probabilità, che può essere misurata oggettivamente, ed è espresso come

$$R = p \times G$$

in cui R è il rischio oggettivo da definire; p la probabilità che accada; G la gravità del danno e/o le sue conseguenze.

Tuttavia, scritto in questo modo il concetto di rischio risulta inadeguato perché non tiene conto della percezione (valutazione soggettiva) che il singolo individuo o gruppo sociale hanno di un dato pericolo (fig. 7). Oggi si tende a distinguere tra rischio reale e rischio percepito, il rischio può essere espresso come

$$R = \text{Hazard} + \text{Outrage}^{13},$$

definito come conseguenza della valutazione del pericolo (*Hazard*) ma anche delle emozioni suscitate (*Outrage*). La percezione del rischio è uno degli

¹³ *outrage*, significa letteralmente indignazione, offesa, con esso si indica un aspetto dell'esperienza emozionale percepito dal pubblico ma ignorato dai tecnici; rimanda ai concetti di paura, rabbia, preoccupazione.

aspetti più complessi e difficili da comunicare.

Può capitare che vi sia una discrepanza tra il rischio reale e il rischio percepito, dovuta ad una serie di caratteristiche legate al rischio in questione. L'obiettivo della comunicazione del rischio è quello di favorire l'informazione, la consapevolezza, la formazione e la preparazione delle persone, mettendo al corrente dei rischi a cui si è esposti e incoraggiando una serie di comportamenti da adottare in queste situazioni, attraverso la creazione di un rapporto a doppio senso tra la comunità di esperti, istituzioni e cittadini, basato sul dialogo e soprattutto sulla fiducia, senza quest'ultima nessuna comunicazione può essere efficace.



Figura 7 esempio di immagine-tipo che accompagna la notizia di un avvicinamento di asteroide sulla Terra. Crediti: MeteOne.

Se le conquiste dello Spazio, con le sue ricerche e scoperte degli ultimi anni, sono impressionanti, altrettanto, ma in senso opposto, possono esserlo i fallimenti o gli insuccessi spaziali. La gran parte di essi non suscita particolari effetti sull'opinione pubblica mentre alcuni riescono, invece, a far breccia con un forte eco, pensiamo ai satelliti disintegrati in atmosfera o persi che hanno smarrito le comunicazioni con la Terra divenendo inutilizzabili, o ai rover e le sonde non arrivati esattamente alla destinazione stabilita, oppure ancor peggio alla perdite di vite umane come nel caso del *Columbia Space*

*Shuttle*¹⁴.

Questi eventi, tuttavia, non possiedono solo una componente drammatica, sul fronte economico e tecnologico o per le implicazioni umane, ma spesso e volentieri risultano altamente spettacolari e difficili da dimenticare; basta navigare sul web per imbattersi in pagine che ne mostrano alcuni, catturando milioni di visualizzazioni (fig. 8).



Figura 8 Pochi istanti dopo il lancio Il razzo Antares della Orbital Sciences Corporation, con a bordo la navicella spaziale Cygnus, subisce un'anomalia catastrofica, essa era stata riempita con circa 5.000 libbre di rifornimenti previsti per l'Internazionale Stazione spaziale, inclusi esperimenti scientifici, hardware per esperimenti, pezzi di ricambio e provviste per l'equipaggio. Credits: NASA/Joel Kowsky

Non importa quanto successo abbia avuto il programma spaziale in questione o il lavoro necessario per portarlo avanti, la questione che verrà immediatamente sollevata non appena si verifica un caso di fallimento o insuccesso vede in primo piano una delegittimazione dell'esplorazione spaziale a seguito dei suoi costi elevati, con le inevitabili ripercussioni per il futuro dei tuoi progetti.

Questo motivo rende necessario uno sforzo maggiore nella comunicazione con un'attenzione all'approccio verso gli insuccessi, essendo una questione

¹⁴ Il 1° febbraio 2003 la navicella della NASA si disintegrò durante la fase di rientro nell'atmosfera terrestre, i sette astronauti presenti a bordo morirono.

di importanza strategica per l'autorevolezza delle scienze spaziali. Inizialmente, l'idea di ignorare il fatto o fingere che esso non esista era parso l'atteggiamento migliore da tenere, si evitava ogni tipo di comunicazione o si riprendevano le fila del discorso a distanza di tempo (mesi, se non addirittura anni) dall'evento; si sperava che la pubblicità negativa creata e il clamore sollevato da un fallimento sarebbero andati lentamente scemando con il tempo.

Questo tipo di approccio, già discutibile in passato, diventa impossibile, se non impraticabile, ai giorni nostri; in un'era in cui le notizie hanno una diffusione molto rapida e non possono essere controllate. La mancanza di una linea comunicativa e di una presa di posizione sull'accaduto può causare gravi danni in termini di credibilità di un'istituzione, con conseguenze negative sulla sua immagine e, infine, sui finanziamenti.

Pertanto, come vedremo poi nel capitolo 4, per chi svolge il ruolo di comunicatore della scienza è necessario prepararsi in anticipo su eventi che possono riguardare un'ipotetica "situazione di crisi".

CAPITOLO 2

DIFESA PLANETARIA

Il tema della **difesa planetaria** è stato per tanto tempo relegato alla finzione narrativa e cinematografica, come testimoniano numerosi film a riguardo, a partire del celebre *Armageddon* (1998); eppure una crescente e realistica consapevolezza degli effetti di un impatto sul nostro pianeta di un corpo di piccole dimensioni ha iniziato a sollevare una maggiore attenzione tra gli scienziati, i governi e cittadini di tutto il mondo.

La Terra è oggetto di un bombardamento continuo dallo spazio di materiale che può andare dalle dimensioni di particelle minuscole, che non produce nessun fenomeno visibile, fino a veri e propri 'sassi spaziali', a volte di dimensioni non trascurabili. Oltre il 99% dei cosiddetti *Near Earth Objects* (NEO), espressione inglese che indica gli oggetti, non artificiali, la cui orbita è molto prossima a quella della Terra, oggi conosciuti, sono di natura asteroidale¹⁵, vale a dire sono veri e propri asteroidi o frammenti, che talvolta sono in grado di intersecare l'orbita terrestre, diventando potenzialmente pericolosi. Sono infatti migliaia gli asteroidi che potrebbero costituire una minaccia per il nostro pianeta.

A tale scopo, le principali agenzie spaziali stanno investendo su progetti di monitoraggio e studio di asteroidi di grosse dimensioni, potenzialmente distruttivi per il nostro pianeta, al fine di mettere in atto azioni preventive. Nonostante con gli anni sia aumentata la capacità di individuare questi oggetti, rimane difficile prevedere, su scale di tempo medio-lungo, l'evoluzione futura delle loro traiettorie. Come abbiamo già scritto nel capitolo precedente, questo tema è legato ai concetti di rischio e fallimento, e quindi

¹⁵ una piccolissima parte è invece dovuta alle comete. Se vogliamo essere precisi, si parla di NEA riferendosi agli asteroidi e di NEC riferendosi alle comete.

oltre al ruolo attivo nella ricerca da parte della comunità scientifica è necessario e doveroso uno sforzo nell'azione comunicativa affinché questa sia efficace e scevra da allarmismi, spettacolarizzazione e complottismi di ogni genere.

Ora è utile fare una panoramica degli oggetti di cui abbiamo parlato, iniziando dalle loro caratteristiche fisiche e dinamiche che rende questo gruppo così peculiare.

2.1 Corpi minori del sistema solare

Oltre al Sole e agli otto pianeti (con le loro lune), il nostro Sistema Solare è costituito da corpi di piccole dimensioni, non per questo meno importanti, chiamati corpi minori. Essi comprendono principalmente *asteroidi* e *comete*¹⁶ localizzati in zone definite del Sistema Solare. Sono gli oggetti più primitivi del sistema solare e il loro studio permette di investigare le fasi primordiali della sua formazione ed evoluzione, ma soprattutto, come abbiamo accennato, rappresentano un fattore di rischio per il pianeta Terra. Da questo momento fisseremo la nostra attenzione su una popolazione particolare: gli **asteroidi**. Prima vedremo le caratteristiche generali di questi corpi minori e poi i meccanismi che portano alcuni di essi ad avvicinarsi alla Terra.

2.1.1 Asteroidi

La maggior parte degli asteroidi orbita nella regione compresa tra l'orbita di Marte e quella di Giove nota come Fascia Principale, una regione del sistema solare compresa tra circa 2.1 UA e 3.6 UA dal Sole (fig. 9).

¹⁶ Ad essi si aggiungono gli oggetti trans-nettuniani e quelli di transizione

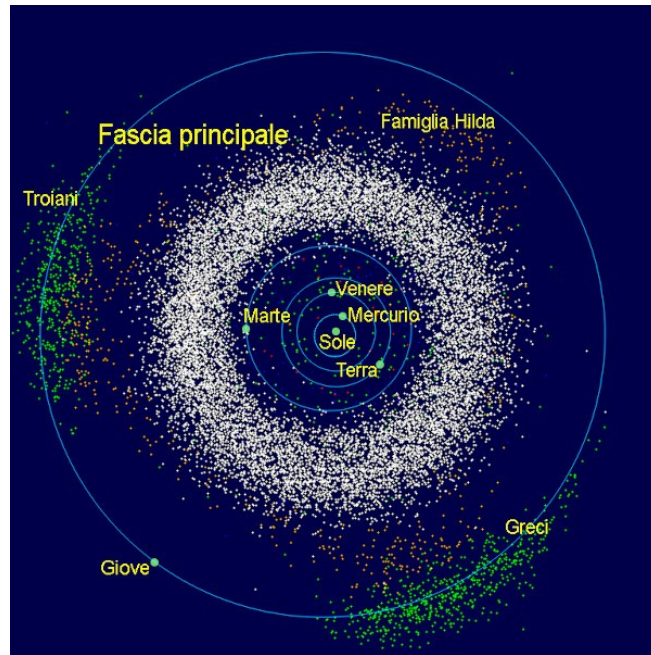


Figura 9 Rappresentazione della distribuzione degli asteroidi nel sistema solare. Crediti: INAF

La loro origine non è da attribuirsi ai resti di un pianeta esplosivo, ma all'impossibilità di formare un pianeta a causa delle perturbazioni dovute al pianeta Giove e alle forze mareali da esso provocate, come vedremo la loro distribuzione all'interno della fascia non è omogenea. Sono poi presenti diversi altri gruppi dinamici situati a diverse distanze dal Sole: essi vengono definiti in base alle risonanze orbitali con Giove e Nettuno (Troiani, Centauri e trans-nettuniani) o alla vicinanza della loro orbita con quella di altri pianeti (*Mars Crossers* e *Near Earth Objects*).

Gli asteroidi possono essere classificati in diverse categorie basandoci sulla loro classe spettrale¹⁷ e albedo¹⁸. La classificazione più recente, a cui faremo riferimento, è quella proposta da Bus e Binzel (2002), in cui gli asteroidi sono suddivisi in classi caratterizzate da proprietà spettrali simili (pendenza spettrale, bande di assorbimento). Le classi individuate, indicate da una

¹⁷ presenza o assenza di bande di assorbimento nello spettro, forma e aspetto dello spettro (pendenza, ecc..)

¹⁸ misura della luminosità complessiva di un oggetto che riflette la luce del sole e che dipende generalmente dalla sua composizione: un albedo basso indica che il corpo riflette poca luce solare e viceversa.

lettera¹⁹, sono 26 e la maggior parte di esse corrisponde alle analoghe individuate da Tholen (1984). Nella classificazione di Bus e Binzel, ad asteroidi che presentano caratteristiche spettrali intermedie tra due classi, viene assegnata una designazione multilettera²⁰. Riassumiamo in tabella 1 le classi principali²¹:

Albedo	Classe	Descrizione
Bassa (<0.1)	C	Asteroidi carbonacei con albedo di circa 0.04. Comuni nelle parti esterne della Fascia Principale (oltre 2.7 UA). Compongono il 40% di tutti gli asteroidi della Fascia. I loro spettri sono tipicamente piatti nella regione rossa del visibile; l'assorbimento di bande nell'UV indica la presenza di silicati idrati. Questa classe comprende le sottoclassi B, F e G.
	D	Presentano uno spettro arrossato (forse dovuto a materiale organico, composti di silicati, carbonio, ecc). Si trovano nella parte più esterna della Fascia. Questa classe è tipica degli asteroidi troiani in risonanza 1:1 con Giove. Un esempio è 944 Hidalgo.
	P	Spettro piatto leggermente arrossato. Le forme ricordano gli asteroidi di classe M. Assieme alla classe D costituiscono il 5-10% della fascia principale, rispetto a questi ultimi si trovano in posizione più interna.
	T	Forse correlati alle classi D o P, o probabilmente asteroidi di classe C fortemente alterati ²² . Sono rari e di composizione sconosciuta. Presentano una banda di assorbimento a 0,85 µm.

¹⁹ la divisione a seconda del valore dell'albedo si riferisce alla classificazione di Tholen con la quale condivide le principali classi.

²⁰ un asteroide che presenta, ad esempio, caratteristiche della classe S e della classe Q verrà indicato come Sq.

²¹ Il numero degli asteroidi conosciuti nelle diverse classi spettrali potrebbe non corrispondere alla distribuzione effettiva, perché alcuni tipi di asteroidi sono più facili da osservare di altri e il loro numero è inevitabilmente sovrastimato.

²² Le superfici degli asteroidi, come quelle degli altri corpi del sistema solare sono costantemente sottoposte al bombardamento di micro-meteoriti e particelle trasportate del vento solare. L'effetto combinato di questi due agenti causa il cosiddetto *space-weathering*, cioè una modifica dello spettro (di riflettanza) del corpo.

Moderata	S	Asteroidi rocciosi molto comuni nella parte interna della Fascia Principale con un albedo di circa 0.15. Compongono circa il 30% di tutti gli asteroidi della Fascia. Composti da metalli, olivina e pirosseni che conferiscono allo spettro una forte componente rossa: una caratteristica tipica sono due larghe bande a 1 e 2 μm .
	M	Asteroidi rocciosi basati su ferro-nichel con un'albedo di circa 0,15. Concentrati nella zona centrale della Fascia Principale.
	Q	Assomigliano alle meteoriti condriti ²³ ordinarie. Vi è classificato un solo asteroide: 1862 Apollo
	A	Spettro molto rosso. Classe rara.
	V	Simili ad acondriti ²⁴ basaltiche. Vi sono classificati l'asteroide 4 Vesta e gran parte degli asteroidi della famiglia; ne esistono invece degli altri che non appaiono correlati alla famiglia di Vesta come 809 Lundia e 4278 Harvey, entrambi appartenenti alla famiglia Flora.
	R	Simili alle acondriti ricche di olivina. Vi è classificato un solo asteroide: 349 Dembowska
Alta (>0.3)	E	Molto simili per composizione al tipo M. Presentano uno spettro piatto all'avvicinarsi alle lunghezze d'onda del rosso. Tali asteroidi sono relativamente piccoli (se ne conoscono solo 3 con diametro superiore a 50m). Si trovano concentrati vicino alla parte più interna della Fascia Principale.

Tabella 1 Descrizione delle principali classi spettrali di asteroidi

All'interno della fascia sono presenti zone di maggior concentrazione e altre completamente vuote. Queste zone "vuote" vengono chiamate lacune di Kirkwood, e sono dovute alle risonanze orbitali con Giove (fig.10), esse rendono instabili le orbite degli asteroidi che transitano in tali lacune facendoli deviare e, eventualmente, uscire dalla Fascia.

²³ meteoriti rocciose formate da condrule, sferule di minerali con granuli di piccole dimensioni. Non hanno subito processi di differenziazione

²⁴ meteoriti rocciose la cui caratteristica consiste nell'assenza di condrule. Sono differenziate, cioè il materiale che le compone è stato sottoposto a fusione, differenziazione e ricristallizzazione all'interno del corpo progenitore

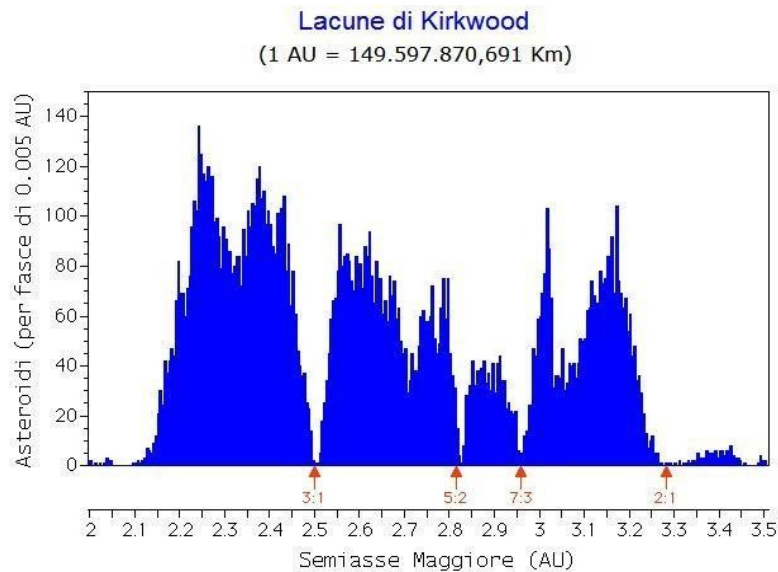


Figura 10 Nel diagramma sono rappresentati il numero di asteroidi della Fascia Principale in funzione della distanza dal Sole (o meglio in funzione del semiasse maggiore dell'orbita, espresso in UA). Sono particolarmente visibili le zone, corrispondenti a distanze particolari dal Sole, dove non si evidenzia la presenza di alcun asteroide. Si tratta delle Lacune di Kirkwood relative alle risonanze 3:1 (2,5 UA), 5:2 (2,82 UA), 7:3 (2,96 UA) e la 2:1 (3,28 UA).

Cosa spinge gli asteroidi a migrare verso queste lacune? Ciò avviene principalmente a causa di collisioni con altri corpi, lenta diffusione dovuta all'effetto Yarkovsky (processo generato dalla rotazione dell'asteroide e dalla differenza della diversa quantità di radiazione che riceve dal Sole tra lato esposto e non) o dell'effetto Yorp (leggero contraccolpo effetto del rilascio di calore accumulato dalla superficie dell'asteroide quando direttamente esposto alla luce del Sole).

In prima approssimazione, trascurando le interazioni con altri corpi e considerando solo quella del Sole, i moti risultano regolari, tuttavia le attrazioni gravitazionali che vengono esercitate sull'asteroide dai pianeti, dalla Luna e dagli asteroidi più massicci²⁵ non sono ininfluenti, e portano a quello che in meccanica celeste si definisce "moto caotico". Capire quindi la dinamica di questi oggetti e avere la capacità di prevedere il moto futuro resta indispensabile. Più avanti analizzeremo queste situazioni che possono coinvolgere gli asteroidi e destare preoccupazione.

²⁵ <https://cneos.jpl.nasa.gov/sentry/intro.html>

2.1.2 Famiglie dinamiche

Prima di addentrarci nella trattazione dei NEO è doveroso accennare a quelle che vengono chiamate famiglie dinamiche. Si possono identificare, attraverso analisi dinamiche, vere e proprie famiglie di asteroidi (o frammenti di essi) che sono riconducibili a una origine comune. L'ipotesi di fondo è che questi oggetti possano essere riconosciuti grazie al fatto di presentare caratteristiche molto simili tra loro, per il fatto di aver avuto un luogo di formazione comune.

Tale ipotesi fu in qualche modo verificata da Hirayama (1918), il quale, diagrammando le caratteristiche orbitali (semiasse maggiore²⁶, eccentricità orbitale²⁷ e inclinazione²⁸) degli asteroidi, notò l'esistenza di ben definiti addensamenti di oggetti e zone quasi completamente spopolate²⁹; le concentrazioni furono chiamate inizialmente tutte famiglie (fig. 11). Successivamente sono state chiamate famiglie solo quei gruppi di asteroidi che oltre ad avere parametri orbitali simili risulta abbiano avuto origine da un asteroide primordiale (come si evince anche dallo studio degli spettri) che ha dato il nome alla famiglia, e che si è spezzato in decine o centinaia di grossi frammenti, forse a causa di una collisione. Gli asteroidi che presentano invece solo analoghi parametri orbitali, sono denominati gruppi di asteroidi.

²⁶ in un'ellisse è la metà dell'asse maggiore, ossia il segmento che dal centro, attraverso uno dei due fuochi, arriva al bordo dell'ellisse.

²⁷ è la misura che tiene conto di quanto un'orbita sia deviata da un cerchio, per orbite ellittiche il suo valore è compreso tra 0 e 1 (escludendo i valori estremi).

²⁸ nel sistema solare, l'inclinazione dell'orbita di un pianeta o di un corpo minore è definita come l'angolo tra il piano dell'orbita del pianeta (o del corpo minore) e l'eclittica.

²⁹ Lacune di Kirkwood

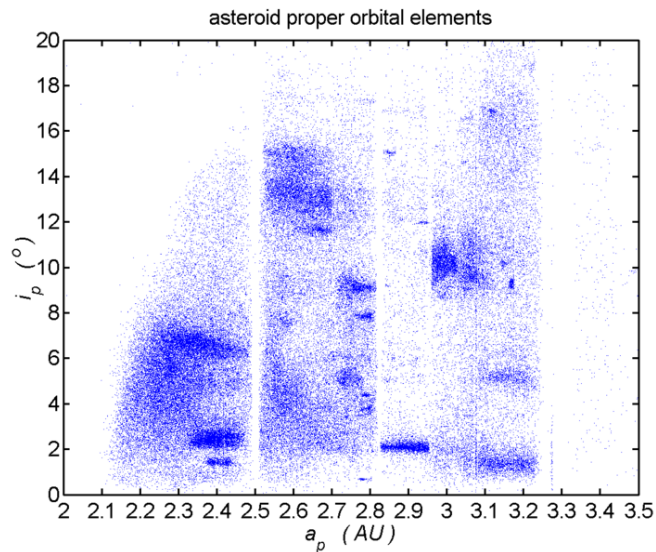


Figura 11 Il grafico confronta l'inclinazione e il semiasse maggiore proprio degli asteroidi dotati di numero; le famiglie asteroidali sono gli evidenti raggruppamenti.

Lo studio delle famiglie consente di ricavare le velocità di eiezione dei frammenti formati dopo le collisioni e permette di analizzare i fenomeni che portano i frammenti ad essere espulsi da queste regioni che ne causano la migrazione verso le zone più interne del sistema solare, in modo da rifornire costantemente le popolazioni di NEO.

Grazie agli studi sulla craterizzazione lunare, gli scienziati hanno potuto stabilire che la popolazione di NEO è rimasta pressoché costante nel corso degli ultimi due miliardi di anni. Dato che un NEO ha una vita media di cento milioni di anni questo implica che debbano esistere dei meccanismi di approvvigionamento continuo di essi verso il sistema solare interno. La sorgente primaria dei NEO è la Fascia principale, in particolare le regioni nei pressi della risonanza orbitale 3:1 con Giove e della risonanza secolare v_6 con Saturno. Come abbiamo già avuto modo di dire, la distribuzione degli asteroidi nella Fascia Principale è regolata da un gran numero di risonanze. Queste vengono divise in due categorie:

- Risonanze di moto medio: quando il periodo di rivoluzione dell'asteroide è una frazione intera (piccola) del periodo di rivoluzione del pianeta. Nelle regioni interne del sistema solare sono legate a Giove, mentre nelle regioni esterne a Nettuno.

- Risonanze secolari: quando due corpi hanno sincronizzate le loro precessioni del perielio o le loro precessioni del nodo ascendente. Nella Fascia Principale si possono individuare tre importanti risonanze secolari:
 - ν_5 , quando la precessione al perielio dell'oggetto è simile a quella di Giove;
 - ν_6 , quando la precessione al perielio dell'oggetto è simile a quella di Saturno;
 - ν_{16} , quando la precessione della longitudine del nodo ascendente dell'oggetto è simile a quella di Giove.

Gli asteroidi che si trovano nei pressi di risonanze di moto medio risentono maggiormente dell'influenza gravitazionale di Giove, che fornisce una potenziale via di uscita dalla Fascia Principale in direzione del Sistema Solare interno. Gli oggetti che si trovano invece nei pressi della risonanza secolare ν_6 subiscono un graduale aumento dell'eccentricità dell'orbita che li porta a diventare dei *Mars Crossers*. Dopo un passaggio ravvicinato nei pressi di Marte, gli asteroidi vengono generalmente espulsi dalla Fascia Principale e inviati nel Sistema Solare interno.

Vi sono poi altre sorgenti in grado di rifornire la popolazione di NEO come la Fascia di Kuiper e la Nube di Oort, da cui provengono principalmente le comete, corpi ricchi di ghiacci, che dopo numerosi passaggi al perielio perdono gli elementi volatili³⁰.

2.1.3 NEO

Come abbiamo già detto, con il termine NEO è indicata la popolazione di oggetti che orbita intorno al Sole su traiettorie molto prossime alla Terra, in certi casi incrociandone l'orbita.

Le orbite sono frutto di un'evoluzione dinamica, possono cioè subire una serie di perturbazioni che sono in grado di modificare l'orbita stessa, come

³⁰ Queste comete sono chiamate estinte

processi "fisici" e "dinamici", che possono far variare la traiettoria dell'oggetto in questione.

Vengono classificati come NEO tutti gli asteroidi e le comete con perielio inferiore a 1.3 UA. La gran parte dei NEO sono asteroidi (*Near Earth Asteroids*, NEA) che vengono ulteriormente suddivisi in quattro famiglie (*Atira*, *Aten*, *Apollo* e *Amor*) sulla base del loro perielio q , afelio Q e semiasse maggiore a .

I sottogruppi sono definiti come segue³¹:

- Atira: presentano un semiasse maggiore più piccolo di quello terrestre ($a < 1.0$ UA) e un afelio³² minore del perielio³³ terrestre ($Q < 0.983$) La loro orbita è contenuta interamente nell'orbita della Terra. Sono noti solo una ventina di questi oggetti, di cui solamente uno con orbita totalmente interna anche a quella di Venere.
- Aten: presentano un semiasse maggiore più piccolo di quello terrestre ($a < 1.0$ UA) e un afelio maggiore del perielio terrestre ($Q > 0.983$ UA). Sono asteroidi Earth Crossing.
- Apollo: presentano un semiasse maggiore più grande di quello terrestre ($a > 1.0$ UA) e perielio inferiore all'afelio terrestre ($q < 1.017$ UA). Sono asteroidi Earth Crossing. La maggior parte dei NEO conosciuti rientra in questo gruppo.
- Amor: presentano un semiasse maggiore più grande di quello terrestre ($a > 1.0$ UA) e un perielio compreso tra $1.017 \text{ UA} < q < 1.3 \text{ UA}$. Non sono asteroidi Earth Crossing; la loro orbita è interamente compresa tra quella della Terra e quella di Marte.

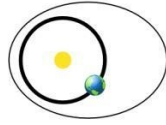
³¹ https://cneos.jpl.nasa.gov/about/neo_groups.html

³² il punto dell'orbita in cui viene a trovarsi alla massima distanza dal Sole

³³ il punto dell'orbita in cui viene a trovarsi alla minima distanza dal Sole

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)

Figura 12 Classificazione degli asteroidi NEA in funzione dei parametri orbitali. Crediti: NASA/CNEOS

Le potenziali minacce per il nostro pianeta sono quindi costituite prevalentemente dagli asteroidi delle famiglie Aten e Apollo. La maggior parte degli asteroidi Amor infatti interseca l'orbita marziana ma non quella terrestre.

A oggi di 1119400³⁴ asteroidi conosciuti che appartengono al Sistema Solare, 29209³⁵ vengono classificati come NEA.

2.1.4 PHA (Potentially Hazardous Asteroids)

Tra i NEA meritano trattazione particolare gli asteroidi potenzialmente pericolosi (*Potentially Hazardous Asteroids*, PHA). In questa categoria rientrano tutti quegli oggetti la cui minima distanza all'intersezione dell'orbita terrestre (*Earth MOID*) è inferiore a 0.05 UA e il diametro è maggiore di 150 metri; in caso di impatto con la Terra, i danni provocati da questi asteroidi si estenderebbero su scala globale. Per MOID intendiamo la distanza tra i due

³⁴ dato al 16 luglio 2022

³⁵ ibidem

punti più vicini delle orbite osculanti³⁶ dei due corpi in esame, essa è generalmente calcolata per un corpo minore rispetto a un pianeta (nel nostro caso la Terra) come la minima distanza all'intersezione dell'orbita del pianeta. È facilmente intuibile come, in astronomia, rappresenti un indicatore quantitativo per valutare potenziali rischi di impatto, come vedremo nel prossimo capitolo.

A oggi³⁷ sono noti 2291 PHA, la maggior parte dei quali sono asteroidi Apollo.

Determinare l'orbita di un asteroide, è senza dubbio il primo passo da compiere, dal momento in cui avviene la sua scoperta, essa risulterà la più accurata possibile tanto più saranno le osservazioni effettuate. Attraverso programmi di calcolo computazionale, con l'integrazione dei parametri in gioco si cerca di stabilire la futura orbita dell'oggetto.

Il risultato è una regione di incertezza, più o meno ampia, all'interno della quale si trova la vera orbita dell'asteroide, essa sarà tanto più stretta all'aumentare del numero delle osservazioni dell'oggetto. Come è facilmente intuibile, asteroidi noti da molto tempo, con più osservazioni al seguito, si muoveranno su orbite meglio conosciute, rispetto ad asteroidi appena scoperti e in ogni caso, **l'orbita di un asteroide non sarà mai perfettamente nota**. Come dicevamo nel paragrafo precedente saranno sempre presenti degli aspetti che rendono imprevedibile l'evoluzione dell'orbita:

- moto caotico; ossia un moto in cui piccole variazioni delle condizioni iniziali del sistema (posizione e velocità) influenzano il risultato finale della traiettoria, tali da rendere impossibile una previsione accurata su tempi scala medio-lunghi. Questo porta, secondo i modelli matematici, a un'amplificazione esponenziale dell'incertezza iniziale.
- risonanze; gli asteroidi risentono degli effetti di Giove su alcune zone che diventano dinamicamente instabili, come abbiamo avuto modo di dire quando abbiamo parlato delle lacune di Kirkwood. In questo caso

³⁶ in meccanica celeste, l'orbita osculatrice è l'orbita che seguirebbe un corpo celeste attorno a un corpo di massa maggiore se non subisse perturbazioni gravitazionali e non.

³⁷ <https://cneos.jpl.nasa.gov/stats/totals.html> pagina consultata il 7 ottobre 2022

le interazioni gravitazionali non sono casuali, ma si ripetono ciclicamente in maniera definita: una risonanza comporta, infatti, una ripetizione periodica delle stesse configurazioni reciproche; tuttavia con il tempo una parte delle perturbazioni gravitazionali non si compensa ma si accumula gradualmente, dando origine a effetti su eccentricità e inclinazione dell'orbita dell'asteroide. In alcuni casi, il caos legato ad una risonanza, può manifestarsi come una lenta deriva dall'orbita oppure, nel caso in cui la variazione di eccentricità porti l'asteroide a incrociare l'orbita di un pianeta, a causare delle perturbazioni gravitazionali che modificano la traiettoria dell'asteroide. L'entità della perturbazione dipende in particolar modo dalla posizione reciproca dei due corpi e quindi dalla loro traiettoria di avvicinamento.

- Forze non-gravitazionali, ossia forze non riconducibili a quelle gravitazionali in grado di variare le caratteristiche orbitali dell'asteroidi. Per gli asteroidi più piccoli esse sono dovute principalmente alla pressione di radiazione solare con i già citati, effetti Yarkovsky e YORP. Sostanzialmente un oggetto celeste investito dalla radiazione solare si riscalda e riemette radiazione sotto forma di fotoni, per il fatto che ruota attorno al proprio asse e orbita attorno al Sole e tale emissione agisce come "effetto razzo" che spinge il corpo in direzione opposta e farà variare il valore del semiasse. L'entità e i tempi scala di queste variazioni dipendono dalle dimensioni del corpo in questione.

Al momento della scoperta di un PHA sulla base delle osservazioni disponibili si determina la sua orbita per i successivi 100 anni. Si definiscono in tal modo gli incontri ravvicinati che l'asteroide avrà con la Terra e, conoscendo la regione di incertezza e se ne calcolano le probabilità di collisione con il nostro pianeta.

Gran parte dei PHA conosciuti, almeno nei prossimi cento anni, ha una possibilità nulla di impatto con la Terra, tuttavia questo rischio potrebbe mutare in futuro con le osservazioni. I PHA invece che presentano una

possibilità non nulla di collisione con il nostro pianeta sono catalogati nella *Sentry Risk Table*³⁸, un sistema informatico automatico gestito dal CNEOS (Center for NEO Studies).

L'inserimento di un NEA, all'interno della *Sentry Risk Table*, avviene al momento della sua scoperta, quando non si è ancora in grado di conoscere con precisione l'orbita. L'oggetto viene poi rimosso una volta nota l'orbita, se è tale da non essere ritenuta pericolosa.

Assieme ad alcune caratteristiche dell'oggetto, per ognuno di essi vengono riportati i valori sulla Scala Torino e Scala Palermo, che ci permettono di quantificare il pericolo associato ad ogni asteroide.

La Scala Torino è utilizzata nella comunicazione al pubblico mentre la Scala Palermo è utilizzata dalla comunità degli astronomi.

SCALA DI TORINO

La Scala Torino, ideata nel 1995 da Binzel e perfezionata negli anni successivi, permette di stabilire la pericolosità di un PHA sulla base della sua probabilità di impatto con la Terra e dell'energia cinetica liberata nel caso di impatto.

Un PHA può assumere valori interi che vanno da 0 a 10, dove lo 0 indica una probabilità nulla di impatto o dimensioni troppo piccole per causare danni (meteore) e il 10 una collisione certa con conseguenze catastrofiche a livello globale.

La scala Torino può essere visualizzata in un grafico energia cinetica-probabilità di impatto (fig. 13), in cui i diversi colori indicano i gradi di pericolosità dell'asteroide

- bianco: nessun rischio. Si applica a meteore o piccoli corpi che bruciano nell'atmosfera e che difficilmente impattano sulla superficie terrestre (valore 0);
- verde: rischio normale. Anche in questo caso, seppur il rischio sia più elevato, le probabilità di collisione restano molto basse oppure

³⁸ <https://cneos.jpl.nasa.gov/sentry/>

l'energia rilasciata in caso di impatto è molto bassa, e quindi per nulla preoccupanti per la popolazione (valore 1-2);

- giallo: oggetti meritevoli di attenzione. Oggetti che hanno probabilità di collisione più alte di quelle che tipicamente può sperimentare la Terra su un arco temporale di alcuni decenni e per i quali è prioritaria l'accurata determinazione dell'orbita (valore 3-4-5);
- arancione: eventi preoccupanti. Fanno parte di questa categoria tutti quegli impatti in grado di determinare devastazioni regionali o globali e che possono avere frequenza secolare (valore 6-7-8);
- rosso: collisioni certe. Fanno parte oggetti da cui l'atmosfera non può proteggerci, con conseguente catastrofe climatica globale. Simili eventi avvengono ogni 1.000-100.000 anni (valore 9-10).

Il livello 4, valore più alto mai raggiunto su questa scala, spetta all'asteroide 99942 *Apophis* al momento della sua scoperta nel 2004. Osservazioni successive nel tempo hanno permesso di determinare più accuratamente la sua orbita e di riportarlo a livello 0.

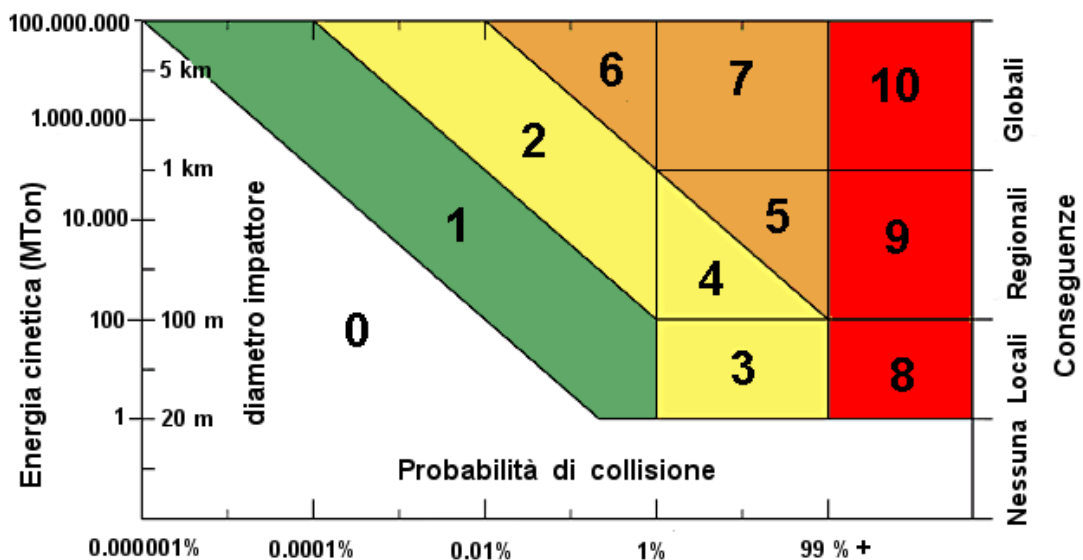


Figura 13 Probabilità di impatto in funzione dell'energia cinetica.

SCALA DI PALERMO

La scala di Palermo, a differenza della precedente, è un sistema di misurazione riservato agli addetti ai lavori perché dà la possibilità di assegnare un grado di priorità agli eventi che nella Scala Torino erano classificati allo stesso livello. Si quantifica più in dettaglio il livello di preoccupazione connesso alla possibilità di un potenziale impatto futuro. È proprio attraverso la classificazione nella scala Palermo che si stabilisce con quale priorità procedere nell'osservazione e nell'analisi degli oggetti da monitorare.

La Scala Palermo³⁹ è una scala logaritmica in base 10 che combina in un singolo valore sia la probabilità di impatto sia l'energia cinetica che verrebbe rilasciata in tal caso. Esprime il rapporto tra la probabilità che avvenga un evento specifico e la probabilità media che un oggetto di uguali dimensioni possa colpire la Terra negli anni che ci separano dall'evento considerato, il cosiddetto *background risk*.

Essendo la scala logaritmica, il valore zero indica un livello di rischio uguale al *background risk*, definito come il rischio che un altro oggetto di dimensioni simili o maggiori di quello considerato possa impattare con la Terra nello stesso lasso di tempo. Questo significa che a un indice -2 corrisponde un evento solamente l'1% (1/100) più probabile di un impatto casuale della stessa gravità nel corso degli anni che ci separano da quell'evento. Valori inferiori a -2 indicano oggetti con conseguenze trascurabili, valori tra -2 e 0 sono assunti invece da asteroidi che meritano un attento monitoraggio.

Viceversa un indice +2 significa che quell'evento è 100 volte più probabile del *background risk*.

I valori della Scala Palermo non sono discreti come quelli della Scala Torino, ma continui (sono consentiti sia valori positivi che negativi) ed inoltre dipendono strettamente dal numero di anni che ci separa dal potenziale impatto nonché dall'energia ad esso associabile. È dunque evidente che non è possibile una trasformazione diretta da una scala all'altra.

³⁹ https://cneos.jpl.nasa.gov/sentry/palermo_scale.html

Il valore di un evento nella scala di Palermo (PS) è dato da:

$$PS = \frac{P_i}{f_b \Delta t}$$

$$\text{in cui } R = \frac{P_i}{f_b \Delta t}$$

con R rischio relativo

In questa espressione P_i indica le probabilità di impatto dell'oggetto considerato, Δt il tempo (in anni) che ci separa dal potenziale impatto e con il termine f_b , infine, la frequenza d'impatto annuale di background.

Quest'ultima grandezza esprime la probabilità che nell'anno si verifichi un impatto con energia E (espressa in Mton⁴⁰) almeno equivalente a quella dell'evento considerato e si calcola attraverso la seguente relazione:

$$f_b = 0.03 \cdot E^{-\frac{4}{5}}$$

È fondamentale che nella formulazione della Scala Palermo compaia il riferimento alla frequenza di background perché ci permette di valutare quando la pericolosità di un evento emerge al di sopra del rischio al quale la Terra è costantemente esposta. Qualora dovesse verificarsi tale circostanza (valore nella Scala Palermo maggiore di zero) significherebbe che siamo di fronte ad un evento fuori del comune che merita assolutamente la nostra attenzione.

Dei 24 oggetti che sono attualmente⁴¹ riportati nella *Sentry Risk Table* di fig. 14 solo uno rientra in quest'ultima categoria. I livelli di rischio riportati sono tutti al di sotto del *background risk*.

⁴⁰ Il megatone (Mt) è un'unità di misura che non appartiene al Sistema internazionale di unità di misura (SI). Esso serve per indicare l'energia emanata da una esplosione ed è frequentemente utilizzata per indicare l'energia liberata dall'esplosione di ordigni nucleari. Un'esplosione da 1 Mt sprigiona un'energia equivalente a quella liberata dall'esplosione di un milione di tonnellate di tritolo. Il megatone rappresenta un'unità di misura della sola forza meccanica dell'esplosione, e non comprende gli altri effetti collaterali, come ad esempio l'emissione di radiazioni. Un megatone equivale a 1.000 kT, ovvero a $4,184 \times 10^{15}$ J.

⁴¹ al 22 luglio 2022

Object Designation	Year Range	Potential Impacts	Impact Probability (cumulative)	V _{infinity} (km/s)	H (mag)	Estimated Diameter (km)	Palermo Scale (cum.)	Palermo Scale (max.)	Torino Scale (max.)
101955 Benu (1999 RQ36)	2178-2290	157	5.7e-4	5.99	20.6	0.490	-1.41	-1.59	
29075 (1950 DA)	2880-2880	1	2.9e-5	14.10	17.9	1.300	-2.05	-2.05	
(2000 SG344)	2069-2121	330	2.8e-3	1.36	24.8	0.037	-2.79	-3.14	0
(2021 EU)	2024-2093	9	7.5e-5	21.40	25.4	0.028	-3.00	-3.04	0
(2021 QM1)	2050-2116	5	1.3e-4	20.92	24.3	0.047	-3.06	-3.08	0
(2008 JL3)	2027-2122	43	1.6e-4	8.42	25.3	0.029	-3.09	-3.09	0
(2005 ED224)	2023-2064	3	2.6e-6	24.97	24.0	0.054	-3.17	-3.17	0
(2010 RF12)	2095-2121	144	4.7e-2	5.10	28.4	0.007	-3.31	-3.32	0
(2022 EK4)	2057-2115	152	3.4e-3	7.98	26.4	0.018	-3.34	-3.59	0
(2005 CK76)	2030-2059	6	7.2e-5	19.67	25.2	0.031	-3.35	-3.48	0
(2021 GX9)	2032-2052	2	8.1e-5	16.79	25.3	0.029	-3.41	-3.41	0
(2020 FA5)	2110-2110	2	2.7e-6	27.53	21.1	0.210	-3.53	-3.62	0
(2022 KK5)	2043-2061	2	1.6e-4	8.72	25.1	0.033	-3.56	-3.56	0
(2015 JJ)	2111-2111	1	2.1e-5	10.70	22.1	0.130	-3.57	-3.57	0
(2008 UB7)	2044-2101	52	3.3e-5	18.53	23.8	0.058	-3.66	-4.28	0
(2007 DX40)	2035-2121	97	8.0e-5	15.53	24.6	0.040	-3.68	-4.08	0
(2000 SB45)	2067-2118	202	1.6e-4	7.53	24.3	0.046	-3.73	-4.22	0
(2012 QD8)	2047-2120	16	6.1e-6	20.76	23.1	0.081	-3.76	-3.84	0
(2008 EX5)	2056-2090	25	5.3e-5	9.92	23.8	0.059	-3.80	-4.08	0
(2020 VV)	2074-2094	16	7.0e-3	9.69	28.3	0.007	-3.84	-4.13	0
(2017 WT28)	2083-2121	118	1.2e-2	4.47	28.1	0.008	-3.85	-3.87	0
(2020 VV)	2044-2120	447	2.3e-3	2.58	27.3	0.012	-3.86	-4.35	0
(2013 VV13)	2063-2095	15	4.4e-4	16.35	26.2	0.019	-3.89	-4.06	0
(2012 HG2)	2052-2121	721	1.8e-3	3.32	27.0	0.014	-3.90	-4.35	0

Figura 14 Schermata che mostra gli oggetti presenti nella *Sentry Risk Table*, in totale 24.

Il valore più elevato mai raggiunto sulla scala Palermo è attribuito a *Apophis*, che, nel 2004, raggiunse il valore 1.12, calcolando un incontro ravvicinato con la terra nel 2029. La probabilità di impatto era 12.6 volte quella del rischio di fondo.

Solo altri due asteroidi hanno avuto valori positivi: (89959) 2002 NT7 e (29075) 1950 DA, che nel 2002 hanno raggiunto rispettivamente i valori +0.06 e +0.17.

2.1.5 Rischi e conseguenze

Per capire i rischi che corriamo ragioneremo in termini probabilistici, considerando la probabilità di un singolo oggetto per il numero di oggetti di simili dimensioni, in questo modo possiamo conoscere la probabilità d'impatto in funzione dell'oggetto impattante.

Statisticamente vediamo che il loro numero cresce esponenzialmente al decrescere del diametro. Questo implica che l'impatto di oggetti di qualche centinaia di metri sia (per fortuna) più probabile di oggetti il cui diametro è qualche chilometro. Per semplificare la trattazione consideriamo come unico parametro il diametro dell'asteroide, con valori medi di densità e velocità, in

realtà per una trattazione rigorosa dovremmo considerare l'energia cinetica dell'oggetto.

Sappiamo che l'aspetto più importante di un possibile impatto è l'energia che può essere rilasciata. Possiamo esprimere l'energia cinetica del corpo impattante

$$E_K = \frac{1}{2}mv^2$$

dove m rappresenta la massa e v la velocità del corpo.

Considerando che la velocità media di un oggetto che interseca l'orbita terrestre si attesta sui 20 Km/s con una densità media di 2,5 g/cm³ (che varia in base alla composizione), il valore qui preso in considerazione è quello tipico della classe S), riportiamo in tabella 2 alcuni ordini di grandezza delle energie in gioco (essa dipende infatti da molti fattori quali composizione, dimensioni, velocità e angolo d'impatto) e la frequenza di impatto con la Terra per farci un'idea della pericolosità che pongono gli asteroidi.

Diametro (Km)	Energia (Mt)	Diametro cratere (Km)	Media impatto con Terra	Conseguenze
0.004	0.004	-	1 ogni anno	-
0.007	0.016	-	1 ogni 6 anni	-
0.075	10-10 ²	1.5	1 ogni 1000 anni	Gli asteroidi di tipo M impattano col suolo mentre i tipo S esplodono nell'atmosfera. Eventuali impatti possono distruggere aree grandi quanto grandi città.
0.16	10 ² -10 ³	3	1 ogni 5000 anni	Gli asteroidi di tipi S e M causano crateri. L'impatto col suolo distrugge un'area grande come New York o Tokyo. Tsunami investono le coste.

0.35	10^3-10^4	6	1 ogni 15000 anni	L'impatto col suolo distrugge un'area grande come due volte il Lussemburgo. Tsunami originati da impatti col mare possono raggiungere i 20 m di altezza.
0.7	10^4-10^5	12	1 ogni 60000 anni	L'impatto col suolo distrugge un'area grande come Taiwan. Tsunami possono distruggere vaste aree.
1.7	10^5-10^6	30	1 ogni 600000 anni	Cambiamenti climatici causati dalle polveri nell'alta atmosfera alzate dall'impatto. Un'area grande quanto la Francia viene distrutta. Distruzione causata da tsunami raggiungono dimensioni globali. Distruzione globale dello strato di ozono.
3.0	10^6-10^7	60	-	Cambiamenti climatici globali. Il rientro di detriti dell'impatto causano incendi forestali globali. Una regione grande quanto l'India viene distrutta direttamente.
7.0	10^7-10^8	125	1 ogni 10^6 anni	Cambiamenti climatici su larga scala e possibili estinzioni di massa. Distruzione diretta di aree grandi quanto gli USA o l'Australia.
16.0	10^8-10^9	250	-	Ci si aspettano estinzioni di massa su larga scala.
>16.0	$>10^9$	>250	-	Minaccia per tutte le forme di vita.

Tabella 2 Conseguenze di un impatto in funzione del diametro dell'oggetto.

A seconda delle dimensioni dell'oggetto quando esso entra in atmosfera possiamo avere diversi scenari: se le dimensioni sono piccole esso si disintegra in atmosfera producendo una scia luminosa, se invece l'azione

frenante e disgregante dell'atmosfera non riesce a frantumare completamente l'oggetto riuscirà a giungere al suolo formando un cratere da impatto e generando effetti a catena.

La probabilità che eventi particolarmente catastrofici possano avvenire su tempi scala umani è molto bassa ma non è nulla, tuttavia anche piccoli frammenti che entrano in collisione con la Terra, possono impattare con un'energia impressionante, causando danni importanti per le zone interessate. Nel prossimo paragrafo vedremo alcune delle collisioni passate per mostrare la minaccia che gli asteroidi pongono.

Nel 1994, due planetologi americani Clark Chapman e David Morrison pubblicarono sulla rivista *Nature* uno studio dal titolo *Impact on the Earth by asteroids and comets: assessing the hazard*, che rappresenta il primo sforzo in assoluto di valutazione di quale ricaduta potesse avere l'impatto di un oggetto cosmico sul nostro pianeta. I due ricercatori hanno preso in considerazione un evento che provoca, direttamente o indirettamente, la morte di un quarto della popolazione mondiale (valore arbitrario ma indispensabile ai fini della valutazione) e in aggiunta, attraverso le statistiche degli impatti censiti, hanno cercato di stabilire la possibile frequenza di una catastrofe simile, nel lavoro si ipotizza che uno scenario del genere possa avvenire ogni 500 000 anni. La probabilità di essere colpiti da un asteroide è piuttosto bassa se paragonata ad altri pericoli che corriamo durante il corso della vita.

La tabella 3 mostra le probabilità di morire negli U.S.A. per diverse cause. un'eventualità molto remota se messa a confronto con le possibilità di morire in un incidente d'auto (una su 90) o in un incendio (una su 250), ma anche di perire a causa di un tornado (una su 60mila) o di un fulmine (una su 135mila). molto più alte delle probabilità di vincere la lotteria *Powerball*.

Evento	Probabilità
Incidente automobilistico	1 su 90
Omicidio	1 su 185
Incendio	1 su 250
Incidente con arma da fuoco	1 su 2500
Annegamento	1 su 9000
Inondazione	1 su 27000
Incidente aereo	1 su 30000
Tornado	1 su 60.000
IMPATTO CON ASTEROIDE O COMETA (impatto globale)	1 su 75.000
Terremoto	1 su 130.000
Fulmine	1 su 135.000
IMPATTO CON ASTEROIDE O COMETA (impatto regionale)	1 su 1.600.000
Avvelenamento da cibo con botulino	1 su 3000000
Attacco di uno squalo	1 su 8000000
Vincita alla lotteria (PowerBall)	1 su 195 249 054

Tabella 3 Probabilità di morte negli USA. Dati da Clark R. Chapman (2007) <http://www.boulder.swri.edu/clark/binhaz07.ppt>

2.1.6 Storie di impatti

Ora parliamo di alcuni impatti rappresentativi, più o meno catastrofici.

L'evento sicuramente più famoso è quello che ha portato all'estinzione di massa dei dinosauri, circa 66 milioni di anni fa. Un asteroide, di circa 10 Km di diametro, si abbatté sulla penisola dello Yucatan (attuale Messico) con conseguenze su scala globale. L'energia rilasciata è stata stimata attorno ai

100 Mton, con conseguenti effetti derivanti: terremoti, incendi, tsunami e piogge di milioni di detriti sollevati nell'atmosfera che arrestarono la radiazione solare causando la morte della maggior parte delle specie animali e vegetali e una significativa caduta delle temperature globali.

Un altro impatto, sicuramente meno drammatico del precedente, è quello avvenuto il 30 giugno 1908 a Tunguska (Russia). L'esplosione di questo asteroide (o cometa) è avvenuto in atmosfera ad una distanza molto prossima al suolo (tra i 6 e 12 Km di altitudine) rilasciando un'energia stimata tra i 10 e 15 Mton. Le stime del diametro suggeriscono un oggetto del diametro tra i 50 e gli 80 metri. Per avere un'idea dei danni che provocò, basti pensare che abbatté la vegetazione (fig. 15) di un'area di circa 2000 Km², a circa 170 Km dall'epicentro i *Chums* (tipiche casette) persero la copertura e a 400 Km dall'epicentro i racconti parlano di vetri e finestre rotte. Per il fatto di essere una zona scarsamente popolata il numero delle vittime fu esiguo (si stima 3 deceduti per cause dirette).



Figura 15 Alberi abbattuti a causa dell'impatto di oggetto del diametro di 50-80 metri a Tunguska (Russia) il 30 giugno 1908. Crediti: the Leonid Kulik Expedition.

Ricordiamo infine l'evento più recente avvenuto sempre in Russia, il 15 febbraio 2013 nello stato federale Čeljabinsk, nel sud degli Urali. Un

asteroide di circa 20m esplose a un'altitudine di 25-45 Km (fig. 16) rilasciando un'energia pari a 500 Kton causando un violento spostamento d'aria tale da provocare danni ai vetri delle finestre nella zona. Sfortunatamente ciò avvenne in un'area densamente popolata ma, fortunatamente, non fu registrata alcuna vittima, anche se si riporta che oltre 1600 persone chiesero assistenza medica negli ospedali locali a seguito delle ferite provocate sia dall'onda d'urto sia dagli effetti della radiazione termica.



Figura 16 Scia di nuvole di vapore rilasciata dall'asteroide di Chelyabinsk. Foto di M. Ahmetvaleev scattata il 15 febbraio 2013. Crediti ESA.

Sulla base di quanto abbiamo detto, e senza nessun intento allarmista, il punto cruciale non è tanto capire "se" la terra verrà colpita da un oggetto celeste ma "quando" questo accadrà.

CAPITOLO 3

PROGRAMMI DI SCOPERTA E MONITORAGGIO DI *NEAR EARTH* *OBJECTs* E PRINCIPALI MISSIONI AD ASTEROIDI

Alla luce di quanto detto nel capitolo precedente sorge spontanea una domanda: "Cosa sta facendo la comunità scientifica per evitare che un asteroide possa impattare contro la Terra? Quali azioni preventive si stanno mettendo in campo?"

Sicuramente è un problema che la comunità scientifica non sta sottovalutando, prova del fatto che negli anni è stata messa in piedi una capillare attività di monitoraggio svolta da terra con l'intento di acquisire costantemente dati utili a studiare, come vedremo, l'evoluzione delle orbite di questi oggetti e a calcolare la probabilità di collisione.

Poter scoprire con largo anticipo un oggetto potenzialmente pericoloso, infatti, consentirebbe di tenerlo "sotto stretta sorveglianza" e scongiurare i possibili effetti disastrosi. A tale scopo esistono una serie di programmi che hanno il preciso compito di monitorare il cielo alla ricerca di nuovi oggetti e di seguire l'evoluzione delle orbite di quelli già noti.

Accanto a questo monitoraggio, un ampio contributo alla comprensione degli asteroidi è giunto, e continuerà a giungere, dagli incontri ravvicinati che alcune sonde spaziali hanno avuto con alcuni asteroidi consentendoci di ottenere informazioni non acquisibili dalle sole osservazioni terrestri.

Esamineremo quindi nei prossimi paragrafi i vari programmi e le missioni che le principali agenzie spaziali mondiali (NASA, ESA e JAXA⁴²) hanno messo in pratica, o che implementeranno nell'imminente futuro, per il monitoraggio e lo studio dei *NEO* e dei *PHA*.

Successivamente focalizzeremo la nostra attenzione sulla missione spaziale AIDA (missione congiunta tra la NASA e l'ESA): prima missione con lo scopo di deflettere l'orbita di un asteroide in modo da impedire possibili impatti distruttivi con la Terra.

3.1 Programmi di monitoraggio e controllo da Terra

Il primo progetto che fece da apripista, riguardo una crescente consapevolezza del rischio di possibili impatti sulla terra, fu nel 1980 *Spacewatch*, messo a punto da un gruppo di scienziati dell'Università dell'Arizona. Su questa scia, prima la NASA e poi l'ESA iniziarono a sviluppare progetti di osservazione e monitoraggio dei NEO, anche mediante una sinergia globale per l'avvistamento, il riconoscimento e la sorveglianza.

3.1.1 Programmi NASA

Nel 1998, la NASA, spinta anche dal governo statunitense, si pose l'obiettivo di individuare oltre il 90% dei NEO con diametro superiore al chilometro entro dieci anni (*Spaceguard Goal*); il programma, visto il grande successo, venne poi esteso nel 2005 con lo scopo di cercare di rilevare il 90% dei NEO con dimensione superiore a 140 metri.

Merito anche degli sviluppi tecnologici⁴³ il tasso di scoperta dei NEO (e di conseguenze dei PHA) crebbe in maniera esponenziale. All'inizio del 1999 i

⁴² rispettivamente agenzia spaziale statunitense, europea e giapponese.

⁴³ in primis dovuto al passaggio dalla lastra fotografica all'utilizzo dei CCD

PHA noti erano solo 166 mentre in figura 17 possiamo vedere come a giugno 2022 siano 1974 (di cui 155 con diametro maggiore di un chilometro).

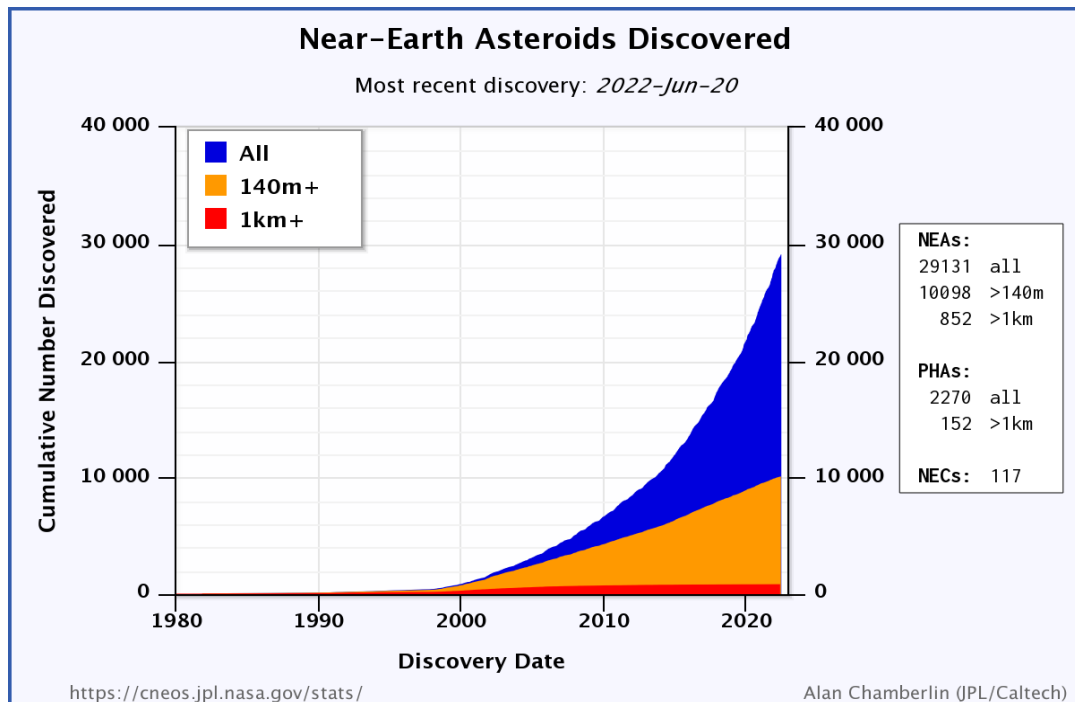


Figura 17 Numero di NEO suddivisi in NEA, PHA e NEC scoperti tra il 1980 e il 2022. In rosso sono mostrati gli oggetti con diametro maggiore di 1Km, in arancione quelli maggiori di 140m e in blu il numero complessivo. L'etichetta a destra mostra i numeri degli oggetto scoperti. I dati sono aggiornati al 20 giugno 2022.

Per arrivare a questo obiettivo sono stati impiegati nel tempo diversi programmi, frutto di collaborazioni di gruppi di ricerca che fanno convergere i propri dati allo scopo di creare una grande rete.

I principali gruppi sono: Spacewatch, già visto precedentemente, il Lincoln Near-Earth Asteroid Research (LINEAR), il Catalina Sky Survey (CSS), il Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System (Pans-STARSS), il Near-Earth Asteroid Tracking (NEAT), il Lowell Observatory Near-Earth Object Search (LONEOS), infine il Near-Earth Object Wide-field Infrared Survey Explorer (NEOWISE) e altri progetti minori.

L'identificazione di un oggetto comporta l'inizio della fase di *follow-up*, ossia una serie di osservazioni astrometriche utili a determinare con precisione i parametri orbitali dell'oggetto e seguirlo nei giorni e nelle settimane

successive; essa si prefigura come attività indispensabile per poter inserire l'oggetto tra i NEO conosciuti ed evitare di perderlo.

Il numero delle *Survey* è in continua crescita, come mostra la fig. 18, che evidenzia il numero dei NEO scoperti dal 1995 a oggi (5 luglio 2022), mettendo a confronto i programmi coinvolti nella ricerca. Tra i programmi non possiamo non citare ATLAS (*Asteroid Terrestrial-Impact Last Alert System*) che, oltre a contribuire alle survey, ha lo scopo di fornire un preavviso di almeno un giorno per asteroidi che possono sprigionare 30Kt, una settimana per i 5Mt e 3 settimane per i 100Mt.

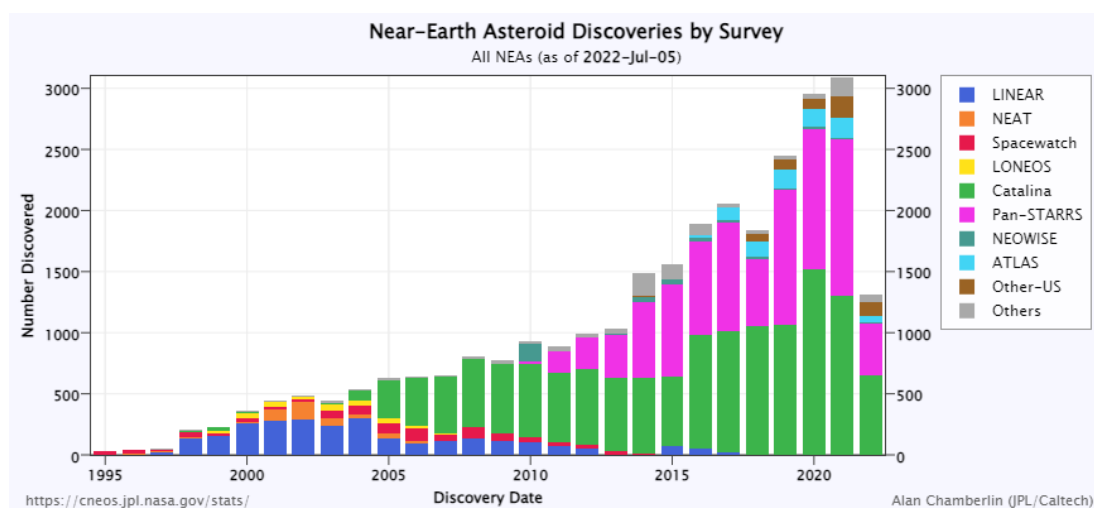


Figura 18 Contributo, negli anni, dei progetti dedicati alla survey sui PHA. Come vediamo i contributi maggiori negli ultimi anni provengono da Catalina (in verde) e Pan-STARRS (in viola). Dati aggiornati al 5 luglio 2022.

Tuttavia, al momento, non è possibile raggiungere il 90% di rilevazione dei NEO con diametro maggiori di 140 metri con le attuali survey a causa di limitazioni fisiche. Per arrivare a questo obiettivo occorrono telescopi più potenti per poter rilevare oggetti a magnitudini maggiori (oltre 21 mag) con un ampio campo visivo.

I diametri vengono stimati, utilizzando la magnitudine assoluta (H). Per questi oggetti⁴⁴, la magnitudine assoluta H è la magnitudine apparente che l'oggetto

⁴⁴ per le comete e gli asteroidi, come i pianeti, si utilizza una diversa definizione di magnitudine, rispetto a quella utilizzata per le stelle.

avrebbe se si trovasse ad 1 AU⁴⁵ sia dal Sole che dalla Terra, con un angolo di fase⁴⁶ di zero gradi.

Utilizzando la relazione

$$D = \frac{1329}{\sqrt{p}} 10^{-0,2H}$$

(3. 1)

in cui p è l'albedo, possiamo ricavare il diametro D dell'asteroide utilizzando H . Per calcolare il diametro è necessario conoscere l'albedo, che non è nota per tutti gli oggetti, e si rende necessario stimarlo. Gli asteroidi molto scuri, di tipo C, hanno un albedo molto bassa ($p \approx 0,06$), mentre per asteroidi di tipo M possono avere anche $p \approx 0,5$, mentre per il tipo S l'albedo media è di 0,2.

La stima del diametro non sarà estremamente precisa ma è comunque in grado di darci un ordine di grandezza per questi oggetti, come mostrato in fig. 19. Con il tempo si è potuto avere un'idea del numero di NEA conosciuti per dimensione.

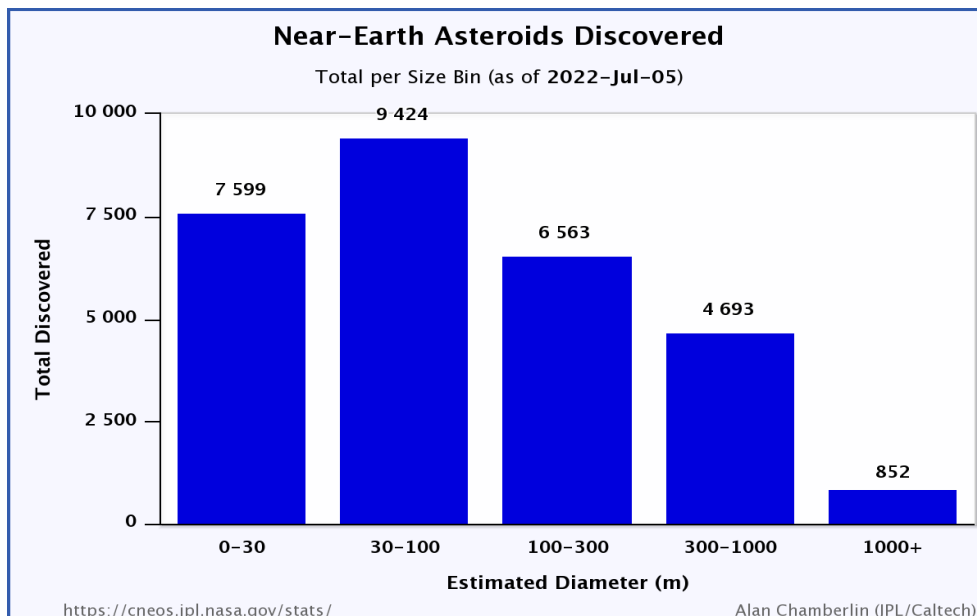


Figura 19 Numero di NEA in funzione dell'intervallo di diametro. Dati al 5 luglio 2022.

⁴⁵ si definisce Unità Astronomica la distanza media Terra-Sole (149 597 870,700 km)

⁴⁶ angolo formato da Sole-asteroide-Terra

3.1.2 Programmi ESA

Solo nel 2008 nasce il programma europeo SSA (*Space Situation Awareness*). Inizialmente pensato per la sorveglianza e il monitoraggio dei detriti spaziali⁴⁷, il programma è stato poi ampliato aggiungendo lo studio dell'attività solare e infine, nel 2013, lo studio degli oggetti *Near-Earth*.

Questi tre tipi di pericolo sono stati suddivisi rispettivamente in tre "segmenti":

- *SST Segment (Space Surveillance and Tracking)*
- *SWE Segment (Space Weather monitor and forecast)*
- *NEO Segment*

L'attivazione di un programma dedicato allo studio dei NEO permette di raggiungere diversi obiettivi tra cui: la conoscenza delle posizioni attuali e future di oggetti vicini alla terra, la probabilità di impatti con la terra, la valutazione delle conseguenze di ogni singolo impatto e lo sviluppo di metodi di deflessione attraverso un centro di coordinamento, il NEOCC (*NEO Coordination Center*).

Il Centro è situato presso la sede italiana dell'ESA, l'ESRIN (*European Space Research Institute*) di Frascati (Roma), e rappresenta il centro operativo del *Planetary Defense Office (PDO)* dell'ESA nell'ambito del Programma di sicurezza spaziale (S2P). Il suo compito è quello di coordinare e contribuire all'osservazione di piccoli corpi del Sistema Solare al fine di valutare e monitorare la minaccia proveniente da oggetti vicini alla Terra.

Al NEOCC sono disponibili sistemi avanzati per il calcolo delle orbite e per il monitoraggio degli impatti di tutta la popolazione di NEO – informazioni rese pubbliche attraverso il portale web⁴⁸ e aggiornate quotidianamente. Il centro che coordina anche le osservazioni di follow-up degli asteroidi (fondamentali per raffinare la determinazione dell'orbita di un asteroide), è, infatti, un punto

⁴⁷ Con le espressioni *detriti spaziali, detriti orbitali, spazzatura spaziale o rottame spaziale* si indica tutto ciò che orbita attorno alla Terra, creato dall'uomo e non più utile ad esso.

⁴⁸ <http://neo.ssa.esa.int>

di riferimento per le attività di studio e ricerca necessarie a migliorare i servizi di allerta sui NEO e rappresenta il punto di accesso a un'intera rete di dati europei per determinare l'orbita e il rischio di impatto di questi corpi celesti proponendo, là dove necessario, le misure per mitigare eventuali danni. Esso è collegato in rete con la base dati del NEA dell'Agenzia Spaziale Tedesca (DLR) e con la banca dati NEODyS (Near Earth Objects Dynamic Site) gestita dalla SpaceDys s.r.l., una società di Cascina (Pisa, Italia).

I servizi del sistema NEOCC si basano sull'elaborazione quotidiana dei dati NEO eseguita dal software AstOD (Asteroid Orbit Determination) e sulle informazioni delle proprietà fisiche NEA precedentemente fornite dal database EARN.

Il PDO gestisce un insieme di applicazioni, chiamato sistema software NEO, che fornisce informazioni non solo agli utenti scientifici, ma anche ad altri utenti e parti interessate di sicurezza spaziale (istituzioni governative, compagnie assicurative e società). L'accesso alla gran parte dei dati del sistema NEO è pubblico, alcune sezioni infatti sono destinate all'approfondimento e sensibilizzazione del pubblico generico su queste tematiche.

Il NEOCC possiede un sistema di software che mette a disposizione preziose informazioni, come è possibile collegandosi alla sua pagina web (<http://neo.ssa.esa.int>), sulla valutazione della reale minaccia, che rimane uno degli obiettivi più importanti.

Nella sezione del sito denominata "Servizi Principali" troviamo la Lista dei Rischi (fig. 20) e a rischio speciale (fig. 21), ossia un catalogo di tutti gli oggetti per i quali è stata calcolata una probabilità di impatto non nulla. I NEA vengono inseriti in quest'ultima lista quando hanno valori della Scala di Palermo (PS) compresi tra 0 e -3 e per cui occorre dedicare una maggiore attenzione a causa della maggiore probabilità di impatto che questi oggetti presentano, come abbiamo detto quando abbiamo parlato della scala di Palermo.

Di ciascun oggetto, ordinato in base al valore massimo della scala di Torino, troviamo la dimensione (*Size*) stimata, la data e ora dell' (eventuale) impatto (*Date/Time*), Probabilità massima calcolata con il valore più elevato nella PS (*IP max*), il valore di rischio massimo nella Scala di Palermo (PS max), il valore di rischio sulla Scala di Torino (*TS*), il range di anni in cui ci si può aspettare l'impatto (*Years*), la probabilità cumulativa di impatto (*IP cum*), il valore cumulativo sulla PS, la velocità d'impatto all'entrata in atmosfera (*Vel*), il tempo - in giorni- da quando è stato inserito nella lista (*In list since*), abbiamo poi altri link che mostrano tabelle e grafici dell'evoluzione dei valori di IP e PS nel tempo. Vengono forniti i collegamenti alla tabella dell'oggetto impattatore relative alle proprietà fisiche e al visualizzatore dell'orbita.

Risk List														
No.	Object designation	Diameter in m	Impact date/time in UTC	IP max	PS max	TS	Years	IP cum	PS cum	Vel. in km/s	In list since in d	History data	History plot	IT
1	2010RF12	8*	2095-09-05 23:45	1/14	-3.07	0	2095-2119	1/14	-3.07	12.29	4331	🔗	🔗	🔗
2	1979XB	700*	2056-12-12 21:35	1/3.5E6	-3.22	0	2056-2117	1/1.11E5	-2.89	27.54	5023	🔗	🔗	🔗
3	2000SG344	40*	2071-09-16 00:57	1/1146	-3.37	0	2069-2119	1/371	-2.95	11.27	5023	🔗	🔗	🔗
4	2014EK67	8000*	2026-09-24 04:04	1/5.56E9	-3.38	0	2026-2083	1/3.28E9	-3.30	23.08	3	🔗	n/a	🔗
5	2008JL3	30*	2027-05-01 09:06	1/6711	-3.66	0	2027-2119	1/6097	-3.65	14.01	5023	🔗	🔗	🔗
6	2021GX9	30*	2032-04-16 21:51	1/19880	-3.67	0	2032-2052	1/19880	-3.67	20.17	457	🔗	🔗	🔗
7	2020FA5	210*	2110-10-29 06:46	1/552486	-3.74	0	2077-2116	1/440528	-3.64	29.34	842	🔗	🔗	🔗
8	2018JD	16*	2067-05-08 13:22	1/793	-3.82	0	2067-2119	1/568	-3.68	13.76	1532	🔗	🔗	🔗
9	2011DU9	16*	2046-02-23 20:45	1/1443	-3.90	0	2043-2059	1/1432	-3.90	14.21	4105	🔗	🔗	🔗
10	2012QD8	90*	2047-03-08 23:16	1/169491	-3.90	0	2042-2115	1/164203	-3.89	23.58	3617	🔗	🔗	🔗

Figura 20 Schermata della lista degli oggetti a rischio visualizzabile sul sito dell'ESA.

Special Risk List											
No.	Object designation	Diameter in m	Impact date/time in UTC	IP max	PS max	Vel. in km/s	In list since in d	Comment	History data	History plot	IT
1	101955 Benu	484	2182-09-24 20:24	1/2702	-1.59	12.68	4923	Impact Date > 100 years	🔗	🔗	🔗
2	29075 1950DA	1300	2880-03-16 23:48	1/51020	-2.13	17.99	2417	Impact Date > 100 years	🔗	🔗	🔗

Figura 21 Schermata della lista degli oggetti a rischio speciale visualizzabile sul sito dell'ESA.

Abbiamo poi due liste di oggetti: una relativa agli incontri ravvicinati⁴⁹ nei giorni precedenti alla data di consultazione del sito web (tab. 22) e una a quelli che avverranno nei trenta giorni successivi (tab. 23). Per ogni oggetto viene riportata la data dell'incontro (*Close approach date*), la distanza (*Miss Distance*) rispettivamente in Km, AU e LD⁵⁰, il diametro (*Diameter*), la magnitudine assoluta (H), la luminosità massima (*Maximum brightness*) e la velocità relativa (*relative velocity*).

Recent close approaches to Earth								
Object designation ↕	Close approach date in UTC ↕	Miss distance in km ↕	Miss distance in au ↕	Miss distance in LD ↕	Diameter in m ↕	H in mag ↕	Maximum brightness in mag ↕	Relative velocity in km/s ↕
Q 2022NJ	2022-07-15 01:42	1309636	0.008754	3.407	24*	25.9	17.7	8.9
Q 2022NC	2022-07-14 18:37	2908454	0.019442	7.566	30*	25.2	119.9	7.4
Q 2022NY	2022-07-14 16:17	2762012	0.018463	7.185	26*	25.7	23.0	8.2
Q 2022NX	2022-07-12 08:27	4401165	0.029420	11.449	17*	26.6	21.1	4.6
Q 2022NF1	2022-07-12 03:34	1955338	0.013071	5.087	30*	25.1	18.2	12.8
Q 2015OQ21	2022-07-12 01:43	7019826	0.046925	18.262	10*	27.8	122.5	6.6
Q 2022NH	2022-07-11 08:37	1504032	0.010054	3.913	20*	26.2	17.7	10.1
Q 2022NC1	2022-07-11 02:22	6484923	0.043349	16.870	30*	25.3	21.2	9.0
Q 2019NW5	2022-07-10 21:59	5721762	0.038248	14.885	60*	23.7	118.7	16.0
Q 2022NS	2022-07-10 17:33	1283146	0.008577	3.338	15*	26.9	19.7	11.9

Figura 22 Schermata dell'Incontro ravvicinati dei NEO al pianeta terra, nei giorni precedenti alla data di consultazione del sito web.

⁴⁹ Un oggetto celeste è considerato "vicino alla Terra" se la sua orbita lo porta ad avvicinarsi a meno di 200 milioni di chilometri dalla Terra. Se il suo diametro è di almeno 150 metri e la sua distanza minima all'intersezione dell'orbita terrestre scende sotto i 7,5 milioni di chilometri (0,05UA), allora è considerato potenzialmente pericoloso (Potentially Hazardous Object o PHO).

⁵⁰ distanza lunare che corrisponde a 384399 km

Upcoming close approaches to Earth								
Object designation ↕	Close approach date in UTC ↕	Miss distance in km ↕	Miss distance in au ↕	Miss distance in LD ↕	Diameter in m ↕	H in mag ↕	Maximum brightness in mag ↕	Relative velocity in km/s ↕
Q 2022LR1	2022-07-16 11:56	3561012	0.023804	9.264	40*	24.5	19.3	4.7
Q 2022KY4	2022-07-17 15:42	6095285	0.040744	15.857	90*	23.0	17.4	7.6
Q 2021OT	2022-07-18 00:11	6242567	0.041729	16.240	19*	26.4	122.0	11.3
Q 349068 2006YT13	2022-07-19 22:42	6758250	0.045176	17.581	496	18.4	117.4	22.9
Q 2011BV11	2022-07-23 01:06	3515512	0.023500	9.145	70*	23.5	17.7	19.1
Q 2017RX2	2022-07-24 10:34	6742647	0.045072	17.541	18*	26.5	24.3	14.3
Q 2022NV1	2022-07-24 13:14	4947649	0.033073	12.871	60*	23.9	17.8	8.1
Q 2022ML3	2022-07-26 14:11	2903674	0.019410	7.554	13*	27.2	20.5	1.5
Q 2022NU1	2022-07-29 01:05	4708964	0.031477	12.250	50*	24.4	119.1	8.3
Q 2016CZ31	2022-07-29 15:26	2689535	0.017978	6.997	130*	22.2	16.9	15.6

Figura 23 Schermata dell'Incontro ravvicinati dei NEO al pianeta terra, nei 30 giorni successivi alla data di consultazione del sito web.

Abbiamo poi la lista delle priorità (tab. 24), che indica la precedenza che hanno certi oggetti ad essere osservati, soprattutto quelli di recente scoperta, perchè la loro orbita deve essere ancora determinata con precisione, in base all'appartenenza a una di queste quattro categorie: urgenti (UR), necessarie (NE), utili (US), a bassa priorità (LP). Oltre alla data di inserimento vengono riportate le coordinate equatoriali, l'elongazione⁵¹, la magnitudine in banda V, l'incertezza in cielo aggiornata riferita alla data aggiornata (*Sky uncertainty*) e in ultimo la fine della visibilità (*End Visibility*).

Priority List								
Priority ↕	Object designation ↕	Inserted ↕	R.A. in hh:mm ↕	Declination in deg ↕	Elongation in deg ↕	Visual magnitude in mag ↕	Sky uncert. in arcsec ↕	End of visibility ↕
NE	Q 2019TE8	2022-07-16	01h34m	0.2	92	21.6	1	2022-07-17
NE	Q 2022GJ3	2022-07-16	15h35m	-49.2	124	21.9	0	2022-07-17
UR	Q 2022MM3	2022-07-16	22h48m	28.1	113	21.8	2	2022-07-17
UR	Q 2022NX	2022-07-16	15h04m	3.8	107	21.7	8	2022-07-17
NE	Q 2022NA	2022-07-16	18h10m	-19.3	158	21.8	5	2022-07-18
NE	Q 2022MY	2022-07-16	23h23m	15.7	115	21.7	1	2022-07-18
UR	Q 2022NE1	2022-07-16	20h48m	-9.2	160	22.0	2	2022-07-18
UR	Q 2022NJ	2022-07-16	02h06m	7.6	82	20.1	1	2022-07-18
US	Q 2022MK	2022-07-16	13h53m	4.6	91	21.4	1	2022-07-19
NE	Q 2022MU	2022-07-16	02h50m	-30.9	88	21.3	1	2022-07-19

Figura 24 Schermata che mostra l'elenco degli oggetti in base al grado di priorità.

⁵¹ distanza angolare fra l'asteroide ed il Sole, rispetto alla Terra.

3.2 Missioni spaziali

Abbiamo sottolineato come lo studio di questi oggetti è importante, oltre che per il loro interesse scientifico, in quanto ci permette di indagare sulla storia evolutiva del nostro Sistema Solare, anche e soprattutto per la sicurezza del nostro pianeta. A sostegno delle osservazioni da Terra, sono state progettate negli anni numerose missioni per esplorare gli asteroidi. Non tutte le missioni hanno avuto come scopo primario il sorvolo o l'atterraggio su un asteroide; la maggior parte delle sonde, infatti, sono state progettate per incontrarne qualcuno durante il loro tragitto, raccogliendo comunque dati preziosi per la conoscenza di questi oggetti. Alcune di queste missioni sono state finalizzate alla validazione di nuove soluzioni tecnologiche in ambiente spaziale (es. *Deep Space 1*) o per il test di sequenze di comandi in vista di obiettivi futuri (es. *Stardust*).

Di seguito vengono riportate le missioni che hanno effettuato almeno un *fly-by*⁵² di un asteroide nella Fascia Principale, le cui caratteristiche verranno sintetizzate in una tabella conclusiva (tab. 4).

1. Galileo

La missione, che aveva come obiettivo primario Giove, fu la prima in assoluto ad incontrare un asteroide (951 Gaspra, 29 ottobre 1991) e successivamente il primo sistema binario (243 Ida e il suo satellite Dactyl, 28 agosto 1993, si tratta della prima scoperta in assoluto di un asteroide con satellite). Vennero riprese diverse immagini dell'asteroide che testimoniano una presenza di crateri d'impatto sulle superfici: in generale, molte informazioni sugli asteroidi si sono ottenute grazie a questa missione.

⁵² sorvolo ravvicinato



Figura 25 Immagine scattata dalla sonda Galileo il 28 agosto 1993. In primo piano l'asteroide 243 Ida e destra la sua luna Dactyl. Crediti: NASA/JPL

2. NEAR-Shoemaker

La missione *Near Earth Asteroid Rendez-vous* (NEAR), conosciuta come NEAR-Shoemaker, in onore di E. Shoemaker⁵³, fu lanciata il 17 febbraio 1996, con l'obiettivo di raggiungere e studiare in modo prolungato un NEA (eseguendo un Rendez-vous⁵⁴). Tra i possibili candidati fu scelto 433 Eros (classe S, appartenente al gruppo Amor). Durante il tragitto, sorvolò prima l'asteroide 253 Mathilde il 27 giugno 1997, per poi arrivare ed entrare in orbita su Eros il 14 febbraio 2000. Dopo un anno passato a orbitare attorno all'asteroide, il 12 febbraio 2001 fu infine fatta precipitare in maniera controllata su Eros, riuscendo a resistere all'atterraggio e a raccogliere dati per altre due settimane prima del definitivo spegnimento.

Grazie alle osservazioni fornite si poté stabilire la massa e il volume dei due asteroidi, determinando una stima della densità. Inoltre, grazie

⁵³ geologo planetario

⁵⁴ un sorvolo molto ravvicinato con un oggetto celeste che comporta una manovra di avvicinamento delicata

alla strumentazione si stabilì che Eros era un corpo monolitico e non un agglomerato di piccole componenti (*rubble pile*).

3. Deep Space 1

La missione principale della sonda consisteva nel testare nuove tecnologie spaziali adottate per la prima volta, quali il propulsore ionico e il sistema di navigazione autonomo, ma era prevista anche l'attività di osservazione e raccolta immagini dell'asteroide 9969 Braille raggiunto il 28 luglio 1999.

4. Stardust

La missione ha sorvolato il 2 novembre 2002 l'asteroide 5535 Annafrank allo scopo di testare la sequenza dei comandi in previsione dell'obiettivo principale della missione, la cometa 81P/Wild. Prima di raggiungere la cometa, la sonda ha effettuato un fly-by dell'asteroide Annefrank, ottenendo diverse immagini della sua superficie da cui si evince una forma irregolare.

5. Hayabusa

La missione è stata la prima in assoluto ad aver riportato sulla terra un campione della superficie di un asteroide. Arrivata, il 4 ottobre 2005, attorno all'asteroide 25143 Itokawa, la sonda avrebbe dovuto effettuare ripetuti *touchdown*⁵⁵ e recuperare il materiale asteroidale tramite un braccio. La fortuna non accompagnò questa missione a causa di malfunzionamenti tecnici che causarono ritardi e solo la parziale riuscita della missione. La sonda comunque, con campioni della superficie, riuscì a rientrare sulla Terra il 13 giugno 2010.

6. Rosetta

La missione è stata sviluppata dall'ESA per lo studio della cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko, seguendone l'evoluzione nel suo

⁵⁵ s'intende un contatto ravvicinato con la superficie

moto di avvicinamento al Sole. Durante il suo percorso per raggiungerla, la sonda ha sorvolato due asteroidi, 2867 Šteins (5 settembre 2008), un asteroide appartenente alla classe spettrale E e 21 Lutetia (10 luglio 2010), il cui incontro si è rivelato un successo con la raccolta di numerosi dati e immagini. La caratterizzazione superficiale dell'asteroide ha sollevato alcune perplessità tra gli studiosi, che speravano di ottenere risultati definitivi dall'analisi dei dati raccolti durante il sorvolo di Rosetta. Lutetia, infatti, è stato indicato sia come un asteroide di tipo M la cui superficie risulta però povera di metalli, sia come un oggetto di transizione tra gli asteroidi di tipo C e X⁵⁶.

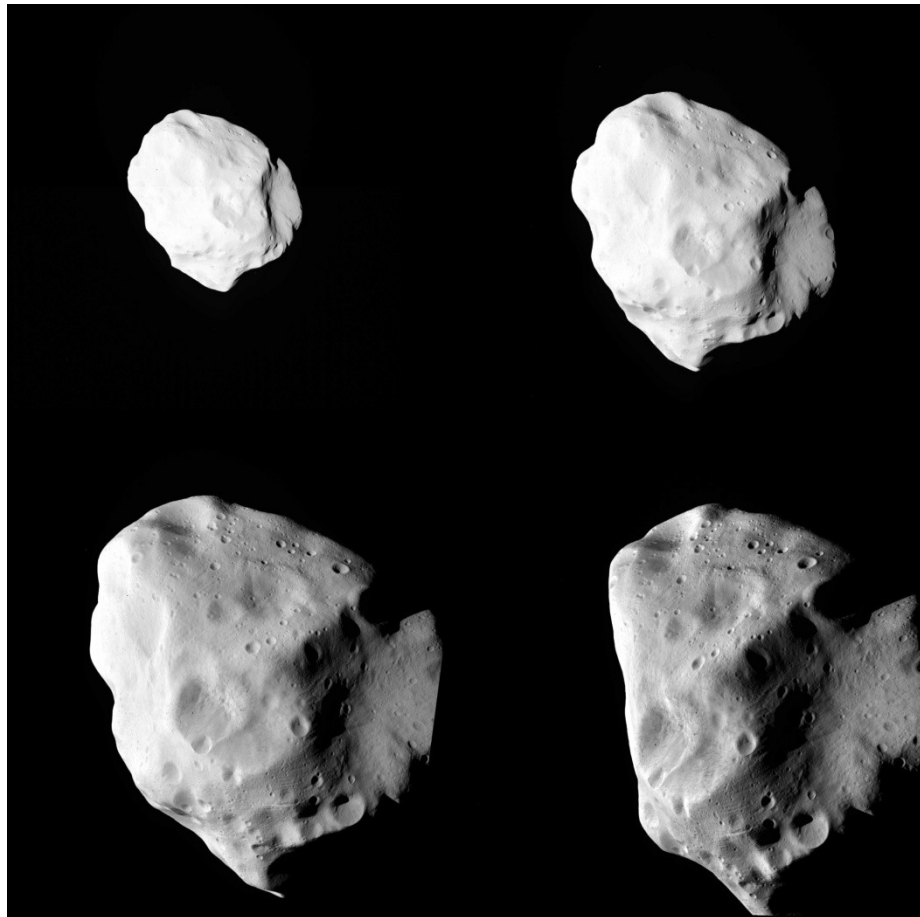


Figura 26 Sequenza finale di immagini dell'asteroide Lutetia, acquisite il 10 luglio 2010 dalla sonda Rosetta poco prima del massimo avvicinamento (3162 Km). Crediti: ESA

⁵⁶ nella classificazione di Tholen il gruppo X comprende i gruppi M, P ed E.

7. Dawn

Si tratta della prima missione nella storia dell'esplorazione spaziale ad aver orbitato attorno a due diversi corpi celesti, avendo, infatti, come obiettivi due dei maggiori oggetti della fascia principale: l'asteroide 4 Vesta (22 luglio 2011) e il pianeta nano 1 Cerere (6 marzo 2015). Lo scopo della missione è stato quello di ottenere una miglior comprensione della formazione del nostro Sistema Solare a partire dalla nebulosa primordiale da cui è nato.

8. Chang'e 2

Si tratta di una sonda cinese, con l'obiettivo di mappare la superficie lunare, con una risoluzione migliore rispetto alla precedente Chang'e 1 (2007-2009). Grazie ad un prolungamento della missione, la sonda effettuò il sorvolo dell'asteroide 4179 Toutatis (13 dicembre 2012).

9. Hayabusa 2

Missione simile (per scopo) alla *Hayabusa 1*, ma con tecnologie più avanzate. Il 27 giugno 2018 ha raggiunto l'asteroide 162173 Ryugu, dove è restata in orbita per circa un anno e mezzo per poi effettuare un primo *touchdown* (21 febbraio 2019) per la creazione di un cratere artificiale, mediante un proiettile metallico, e un secondo *touchdown* (5 aprile 2019) per recuperare, attraverso un braccio meccanico, i frammenti dei campioni da riportare sulla Terra. La capsula con i campioni è rientrata il 6 dicembre 2020, mentre la sonda madre ha proseguito verso altri due asteroidi, il primo dei quali, 98943 (2001 CC21) verrà raggiunto nel 2026 e il secondo, 1998 KY₂₆, nel 2031.

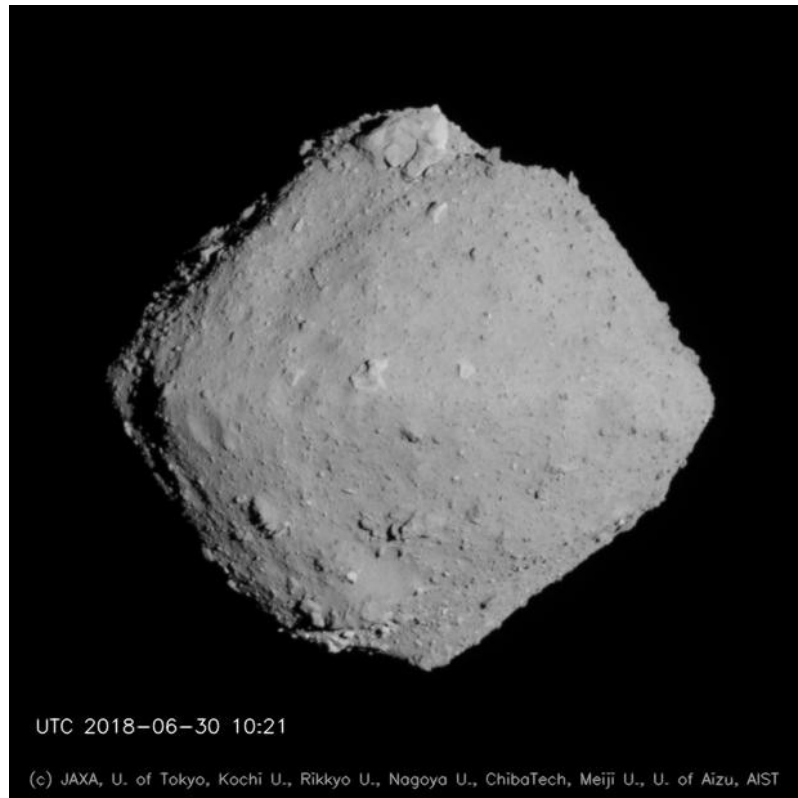


Figura 27 Asteroide Ryugu fotografato a una distanza di 19 Km, il 30 giugno 2018. Crediti: JAXA

10. OSIRIS-Rex

Prima missione della NASA concepita, come per le sonde giapponesi *Hayabusa 1* e *2*, per effettuare dei prelievi di campioni dalla superficie dell'asteroide 101955 Bennu (ognuno di circa 60 grammi) e di trasportarli sulla Terra nel 2023. A differenza però delle missioni giapponesi la sonda non è atterrata sulla superficie, ma il prelievo dei campioni è avvenuto attraverso un braccio robotico. Dopo un periodo di circa un anno e mezzo per una dettagliata survey, e una fase ricognitiva per individuare i possibili siti di estrazione del campione, il 20 ottobre 2020, ha finalmente raggiunto l'asteroide. Al momento stiamo assistendo al suo rientro sulla Terra, che avverrà a settembre 2023. I suoi studi saranno utili anche per la definizione di missioni future, per prevedere ed evitare un impatto con un asteroide, infatti verrà misurata la deviazione dell'orbita dovuta a effetti non gravitazionali come l'effetto YORP individuando le proprietà dell'asteroide che contribuiscono a tale effetto.



Figura 28 Immagine di 101955 Bennu scattata dalla sonda OSIRIS-Rex il 2 dicembre 2019, a una distanza di 24 Km. Crediti: NASA/JPL

11. Altre missioni

Anche altre missioni hanno condotto osservazioni di asteroidi, sebbene da distanze molto maggiori rispetto a quelle descritte finora. Cassini- Huygens ha incontrato a 1,6 milioni di Km l'asteroide 2685 Masursky (23 gennaio 2000), mentre la missione New Horizon è transitata a 101867 Km dall'asteroide 132524 APL, in entrambi i casi determinandone la dimensione. Da citare, per l'interesse suscitato dalla sua forma caratteristica (simile a quella di un arachide) è l'oggetto 486958 Arrokoth, un binario a contatto, che orbita oltre l'orbita di Nettuno e per questo classificato come oggetto trans-nettuniano, visitato dalla New Horizon con un sorvolo ravvicinato nel 2019.

Missione	Ente Spaziale	Data di lancio	Data di arrivo	Asteroide osservato	Classe	Gruppo Asteroidale
Galileo	NASA	18 ott 1989	29 ott 1991 28 ago 1993	951 Gaspra 243 Ida	S S	Fascia Principale
NEAR-Shoemaker	NASA	17 feb 1996	27 giu 1993 14 feb 2000	253 Mathilde 433 Eros	C S	Fascia Principale Amor
Cassini-Huygens	NASA, ESA, ASI	15 ott 1997	Gen 2000	2685 Masursky	S	Fascia Principale
Deep Space 1	NASA	24 ott 1998	28 giu 1999	9969 Braille	Q	Mars-crosser
Stardust	NASA	06 feb 1999	02 gen 2004	5535 Annapark	S	Fascia Principale
Hayabusa 1	JAXA	09 mag 2003	12 set 2005	25143 Itokawa	S	Apollo - NEO
Rosetta	ESA	02 mar 2004	05 set 2008 10 lug 2010	2867 Steins 21 Lutetia	Xe Xc	Fascia Principale
New Horizons	NASA	19 gen 2006	12 giu 2006	132524 APL	S	Fascia Principale
Dawn	NASA	27 set 2007	Luglio 2011 Marzo 2015	1 Vesta 4 Cerere	V G	Fascia Principale
Chang'e	CNSA	01 ott 2010	13 dic 2012	4179 Toutatis	S	Apollo - PHA
Hayabusa 2	JAXA	03 dic 2014	27 giu 2018	162173 Ryugu	C	Apollo - PHA
OSIRIS-Rex	NASA	09 set 2016	Agosto 2018	101955 Bennu	B	Apollo - PHA

Tabella 4 Missioni spaziali che hanno effettuato almeno un flyby di un asteroide. Le missioni che sono atterrate (o sono previste di atterrare) su un asteroide sono state evidenziate in blu

3.3 Tecniche di mitigazione

Molti scienziati impegnati nei numerosi programmi spaziali in corso spesso mettono in primo piano la necessità di intensificare i programmi di sorveglianza. Una volta definito il livello di minaccia posto dai PHA per la terra, a seguito delle tecniche di monitoraggio attuali, cercheremo di porre l'attenzione su quello che è l'obiettivo della comunità scientifica.

Supponiamo di scoprire, con un certo anticipo, un asteroide in possibile rotta di collisione con la Terra, "Che cosa potremmo fare per scongiurare il pericolo?" "Di quali strumenti disponiamo per prevenire l'impatto?" . Se le sue dimensioni fossero di un chilometro o più, con le tecnologie di cui disponiamo adesso non ci sarebbe possibile evitare l'impatto, se invece si trattasse di un oggetto di poche centinaia di metri, compatibilmente con il tempo a disposizione per mettere in atto le contromisure, potremo valutare l'idea di **deviarlo dalla sua traiettoria**.

Proprio per sperimentare la fattibilità di tale operazione è stata concepita un'ambiziosa missione: *Asteroid Impact & Deflection Assessment (AIDA)* che descriveremo in seguito.

Affronteremo ora le tecniche di mitigazione concepite per poterci difendere da possibili impatti analizzando efficacia e fattibilità. Vedremo come il fattore tempo è fondamentale per intervenire con largo anticipo e come si renda necessario conoscere un potenziale impatto molti anni prima che si verifichi.

3.3.1 Trattore gravitazionale

Un sistema utile per rimuovere un asteroide dalla propria orbita potrebbe essere quello del trattore gravitazionale (GT): la sonda impiegata non impatta direttamente contro l'asteroide ma si avvicinerrebbe sufficientemente a quest'ultimo tanto da instaurare una debole, ma non trascurabile, attrazione gravitazionale tra i due corpi.

In questo modo, e grazie all'abilità della sonda di librare⁵⁷ sulla superficie dell'asteroide attraverso un sistema a propulsione ionica (o un altro a bassa potenza) l'asteroide ne verrebbe attratto e, esercitando questa forza per un lungo lasso di tempo, costringerebbe l'asteroide su un'altra orbita, allontanandolo di decine (o centinaia) di metri dall'eventuale orbita pericolosa. Questo metodo non coinvolge il contatto diretto con l'oggetto ma svolge, come suggerisce il nome stesso, il ruolo di un "rimorchiatore".

Nella configurazione ideale, la sonda (in fig. 29) è posizionata a una distanza d dall'asteroide bersaglio e i propulsori sono posizionati in configurazione inclinata verso l'esterno per evitare che i getti (di scarico) del motore colpiscano la superficie, annullando in parte la spinta.

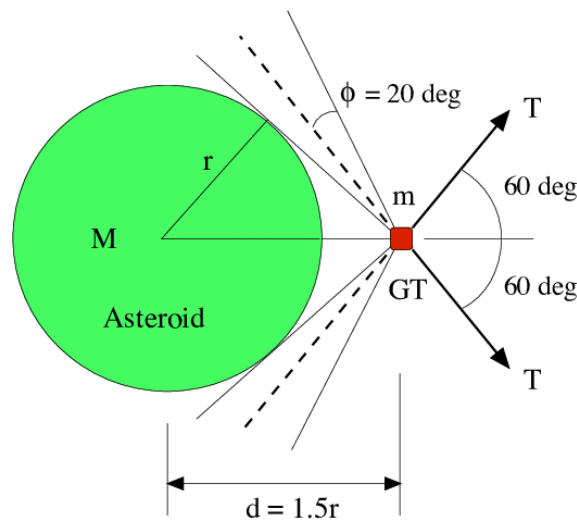


Figura 29 Configurazione fisica del sistema Trattore Gravitazionale-Asteroide

Affinché la posizione della sonda sia fissa, la forza gravitazionale (F_g) deve uguagliare la spinta prodotta dai motori (F_s):

$$F_g = F_s$$

(3. 2)

che possono essere esplicitate come:

⁵⁷ mantenere una distanza ravvicinata e costante

$$F_g = \frac{GMm}{d^2}$$

(3. 3)

in cui M è la massa dell'asteroide, m è la massa del GT, d la distanza tra l'asteroide e la sonda e G la costante di gravitazione universale.

$$F_s = 2T_s \cos\left(\arcsin\left(\frac{r}{d} + \phi\right)\right)$$

(3. 4)

in cui T_s è la spinta di un singolo motore, r il raggio dell'asteroide e ϕ l'angolo di mezza divergenza del motore.

L'accelerazione che viene impressa all'asteroide durante il "traino" sarà semplicemente

$$a = \frac{Gm}{d^2}$$

(3. 5)

I vantaggi principali del GT sono:

- il totale controllo della deviazione, permettendo di inserire l'asteroide bersaglio in un'orbita sicura con un elevato grado di precisione;
- l'assenza di ricognizioni del bersaglio, in quanto non è influenzato dalla composizione o struttura ma solo dalla massa;
- eliminazione del rischio di distruggere l'asteroide in frammenti più piccoli a loro volta oggetto di pericolo, per il fatto di agire a distanza.

Lo svantaggio maggiore può essere causato dal ritardo temporale; inoltre una maggiore richiesta di spinta richiede più carburante, aumentando la massa iniziale e così i costi di lancio.

A titolo di esempio proponiamo alcuni calcoli , in cui vengono forniti i requisiti per la deviazione dell'asteroide *99942 Apophis* (che effettuerà un passaggio ravvicinato nel 2029 e poi nel 2036) supponendo l'uso di una sonda di una tonnellata alimentata da propulsione elettrica solare. I valori indicati sono da

riferire a missioni con partenza del 2027 infatti più tardi si agisce più energia sarà necessaria per effettuare i cambiamenti dell'orbita necessari a evitare impatti.

La tabella 5 ne riassume i dati.

Parametro	Valore
Massa asteroide	$4,6 \times 10^{10}$ Kg
Massa sonda	1×10^3 Kg
Angolo inclinazione propulsori	20°
Spinta propulsori	0,053 N
Accelerazione fornita	$3,7 \times 10^{-6}$ m/s
Accelerazione minima richiesta	2×10^{-6} m/s
Tempo di deflessione ⁵⁸	20 giorni
Distanza sonda-asteroide	240 m

Tabella 5 Tabella riassuntiva del Trattore Gravitazionale sul PHA 99942 Apophis

Il veicolo deve mantenere una direzione costante in modo che, nel corso dell'interazione gravitazionale, il trattore stesso non venga influenzato.

3.3.2 Esplosione nucleare

Un altro sistema in grado di deviare un asteroide è quello che utilizza un ordigno nucleare, un'arma di questo tipo porterebbe alla sua disgregazione in frammenti più piccoli.

In questa strategia, una detonazione nei pressi dell'obiettivo sarebbe funzionale a deviare l'asteroide: un'area della superficie, quella più esposta all'esplosione, viene investita dalla radiazione emessa; il calore prodotto scalda lo strato sottostante che viene espulso, il contraccolpo generato farà così deviare il NEA dall'orbita.

Le dimensioni dell'area che viene riscaldata dipendono dalla distanza a cui è piazzata la bomba. Il 95% dell'energia rilasciata viene rilasciata sotto forma di: radiazione di neutroni (20%), emissioni di raggi X (55%) e energia cinetica sotto forma di detriti (20%); a causa dell'elevata densità energetica del dispositivo nucleare, quindi, questa tecnica potrebbe risultare essere

⁵⁸ tempo richiesto per deviare 99942 Apophis da un'ipotetica traiettoria di impatto

estremamente efficace⁵⁹, ma, in compenso, ha il problema rilevante di avere anche un'altissima probabilità di portare alla frammentazione dell'asteroide a seconda della struttura più o meno porosa. Questo, come visto prima, potrebbe portare all'aumento della probabilità di collisione con la Terra a causa della diffusione dei pezzi di asteroide.

Inoltre, anche se non rilevante per questo lavoro di tesi, è importante tenere presente che lanciare ordigni nucleari a bordo di un missile, anche se la destinazione è lo spazio profondo, causa sempre problemi socio-politici ed etici.

3.3.3 Impattatore cinetico

L'idea che sta alla base di questo metodo sfrutta il principio di conservazione della quantità di moto. Una sonda viene fatta impattare ad alta velocità contro un asteroide, trasferendo così quantità di moto nell'urto. Questo si traduce in una variazione della velocità orbitale (Δv) che ne modifica l'orbita. Sappiamo che la collisione tra due corpi può avvenire in modo elastico o anelastico, nel primo caso, sia la quantità di moto che l'energia sono completamente conservate, nel caso di collisioni anelastiche, come nel nostro caso, l'energia cinetica non si conserva più poiché viene dissipata sotto forma di calore durante il processo di impatto (deformazioni, rottura di legami di materiali, urti, compressione, comportamenti dei materiali). Dopo l'urto, il corpo più piccolo (impattatore) si attacca al corpo più grande (NEO) e si muovono assieme con una nuova velocità V .

Dalla fisica classica sappiamo che:

$$mv = (m + M)V$$

(3. 6)

⁵⁹ per valutarne l'efficacia abbiamo bisogno di informazioni sull'asteroide target quali porosità, spessore della superficie, composizione interna dell'asteroide, capacità di assorbimento dei raggi X da parte del materiale.

Con m e v rispettivamente massa e velocità dell'impattatore, M massa del NEO e V velocità a seguito dell'urto.

Tuttavia questa formulazione è ancora troppo semplice per rappresentare uno scenario di impatto reale. Per una migliore descrizione del problema dovremmo includere il fattore β , definito come:

$$\beta = \frac{\text{quantità di moto acquisita dal target}}{\text{quantità di moto dell'impattatore}} = \frac{M_t V_t}{m_p v_p} = \frac{m_p v_p + p_e}{m_p v_p} \quad (3.7)$$

dove M_t rappresenta la massa target e V_t la sua velocità dopo l'impatto. La composizione chimica gioca un ruolo importante nel determinare p_e , ossia la quantità di moto degli ejecta (materiale espulso dalla superficie dell'asteroide a causa dell'impatto). Questo può essere visto nella figura 30 a seguire.

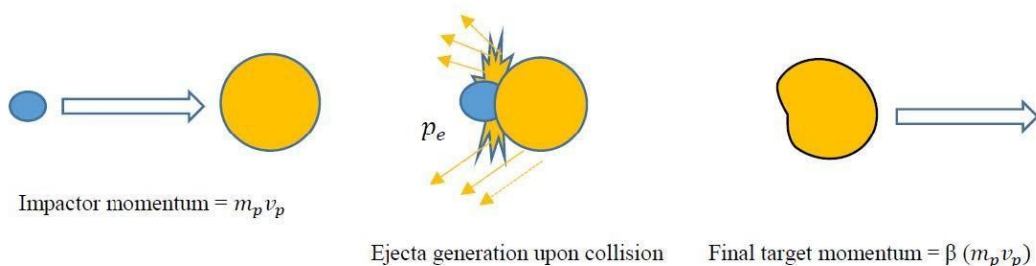


Figura 30 Fasi dell'urto nella tecnica dell'impattatore cinetico

A causa dell'enorme differenza di massa tra le due masse coinvolte, potrebbe modificare i parametri orbitali di piccolissima quantità, ma sufficienti a evitare l'impatto. Come ha dimostrato la missione *Deep Impact*, un veicolo spaziale può impattare con successo su un corpo minore (in quel caso era la cometa *Tempel 1*⁶⁰). Tuttavia questo metodo può divenire inefficace se la massa dell'asteroide risulta molto maggiore di quella del veicolo spaziale, con variazione di velocità orbitale nulla. È attualmente allo studio un impattatore cinetico più efficace (detto impattatore cinetico potenziato), in cui

⁶⁰ la cui variazione di velocità di 10^{-4} mm/s causò una diminuzione della distanza al perielio di 10 metri.

il problema della massa della sonda viene risolto con la raccolta, durante l'avvicinamento al bersaglio di rocce e/o piccoli asteroidi (<10 m).

3.4 La missione AIDA

La missione *Asteroid Impact and Deflection Assessment* (AIDA) è un programma di collaborazione internazionale che vede protagonisti l'agenzia spaziale americana e quella europea con l'obiettivo di testare la tecnologia di deflessione dell'impattatore cinetico; essa unisce al suo interno le missioni:

- **DART** (Double Asteroid Redirection Test) della NASA
- **Hera** dell'ESA

Inizialmente concepita come singola missione composta da un doppio veicolo, nel corso degli anni l'implementazione delle due missioni è stata separata e progettata per operare autonomamente, mantenendo però una strettissima collaborazione.

La coppia di sonde spaziali ha il compito di studiare e dimostrare l'effetto cinetico che scaturisce dall'impatto di una sonda sul satellite di un asteroide, in particolare DART impatterà ad alta velocità relativa contro il bersaglio, con l'obiettivo di modificarne l'orbita, mentre Hera (a posteriori) dovrà osservare da vicino il cratere prodotto a seguito dell'impatto e studiare le proprietà fisiche dell'asteroide.

Lo scopo della missione è infatti quello di verificare se una sonda possa deviare con successo un asteroide dalla sua orbita.

La missione ha come obiettivo un NEA, l'asteroide 65803 Didymos (di tipo S, appartenente alla categoria Apollo). Scoperto nel 1996, si tratta in realtà di un sistema binario formato da un corpo centrale (chiamato semplicemente Didymos o Didymos-A) di circa 780 m di diametro e da una luna chiamata Dimorphos, di circa 160 m che si muove attorno al primo ad una distanza media di circa 1.2 Km.

La massa totale del sistema è stimata attorno ai $(5,37 \pm 0,44) \times 10^{11}$ Kg. Si muove su un'orbita di media eccentricità con perielio pari a 1.013 UA (di poco inferiore all'afelio della Terra) ed afelio pari a 2.276 UA.

Rispetto all'orbita terrestre la traiettoria dell'asteroide è inclinata di soli 3.409° , mentre il periodo orbitale è pari a 2,11 anni. La tabella 6 riassume i parametri fisici e dinamici del sistema. Per chiarezza, prima di continuare la trattazione, è doveroso specificare che la sonda DART ha avuto come target la luna Dimorphos.

parametro	valore
Semiassse maggiore	1,2 Km
Diametro Didymos-A	780 m
Diametro Dimorphos	160 m
Massa totale	$(5,37 \pm 0,44) \times 10^{11}$ Kg
Periodo orbitale del sistema	11,92 h \approx 11 h: 55 m
Periodo rotazione Didymos-A	2,26 h \approx 2 h: 24 m
Periodo rotazione Dimorphos	11,92 h \approx 11 h: 55 m
Densità Didymos-A	(2170 ± 350) Kg m ⁻³
Densità Dimorphos	(2170 ± 350) Kg m ⁻³

Tabella 6 Parametri fisici del sistema Didymos

La scelta del target è ricaduta sul sistema Didymos principalmente per tre motivi:

1. è un sistema binario per cui il cambiamento orbitale potrà essere osservato più facilmente rispetto a quello di un oggetto singolo. La variazione di velocità dell'orbita eliocentrica risulta infatti trascurabile rispetto alla variazione di periodo di rivoluzione di Dimorphos. Si è visto che la velocità di Dimorphos è stata modificata, cambiando il suo periodo di rotazione attorno al primario, come vedremo dopo.
2. né Didymos né Dimorphos rappresentavano o rappresenteranno alcuna minaccia per la Terra. Durante l'incontro con la sonda

(avvenuto a settembre 2022) erano distanti poco più di 10 milioni di Km da essa.

3. date le sue dimensioni può essere preso come esempio di PHA, la luna di Didymos rappresenta una classe di asteroidi altamente pericolosi, difficili da rilevare e ad alto potenziale distruttivo.

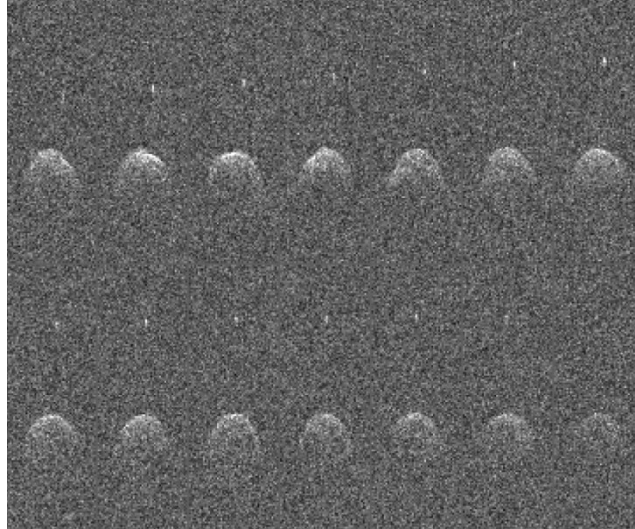


Figura 31 Immagini radar del sistema 65803 Didymos. Crediti: NASA.

Nei prossimi paragrafi descriveremo più in dettaglio le singole missioni DART ed Hera, soffermandoci sui loro obiettivi e i risultati attesi; commenteremo brevemente i primi risultati dalle missione DART.

3.4.1 DART

La componente NASA della missione ha il compito principale di testare la validità della tecnologia dell'impattore cinetico per deflettere con successo l'orbita di un asteroide (fig. 32), infatti DART è progettata per essere la prima dimostrazione di difesa planetaria mediante l'utilizzo di questa tecnologia.

Il vettore è stato lanciato il 24 novembre 2021 dalla Vandenberg Force Base in California, e l'arrivo (e impatto) è avvenuto alle ore 01:14 italiane (23:14 UTC) di martedì 27 settembre 2022.

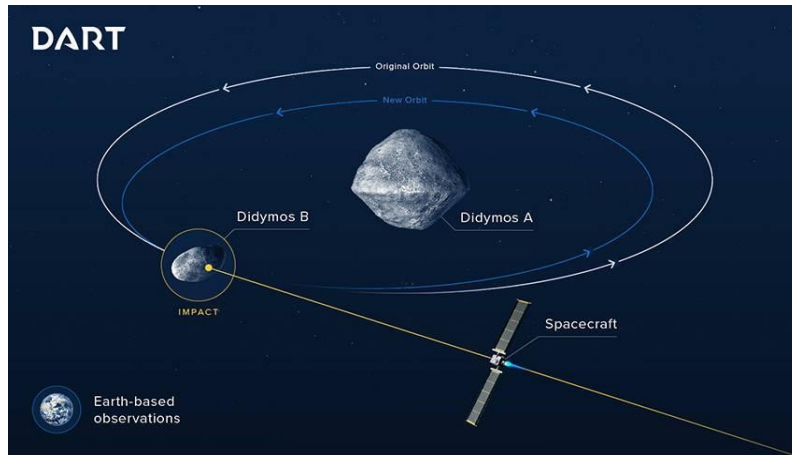


Figura 32 Effetti della sonda DART sul sistema 65803 Didymos. Crediti:NASA.

DART (la cui struttura è riportata in fig. 34), dal peso di 525 Kg, ha trasportato con sé il solo strumento DRACO (*Didymos Reconnaissance and Asteroids Camera for OpNav*) (fig.34): un *imager*⁶¹ che ha accompagnato la sonda durante le fasi di avvicinamento e registrato i fotogrammi precedenti lo schianto (fig.33).

Già dalle sue primissime immagini arrivate a terra abbiamo potuto recuperare importanti informazioni sull'asteroide, in particolare sulla morfologia e geologia superficiale in relazione al sito d'impatto.



Figura 33 Ultima immagine completa dell'asteroide Dimorphos, scattata dall'imager DRACO due secondi prima dell'impatto a 12 Km di distanza. L'area ripresa è di circa un 31 metri. Crediti: NASA/Johns Hopkins APL

⁶¹ fotocamera ad altissima risoluzione

DART era inoltre dotato di un CubeSat, chiamato LICIACube (*Light Italian CubeSat for Imaging of Asteroids*), fornito dall'Agenzia Spaziale Italiana (ASI), che è stato rilasciato 15 giorni prima dell'impatto per immortalare (a distanza) le primissime fasi dell'impatto (fig. 35), e con l'obiettivo di:

- studiare la struttura e l'evoluzione della nube di detriti sollevata con l'impatto, come conseguenza del tipo di materiale superficiale dell'asteroide
- caratterizzare il sito dell'impatto sulla superficie di Dimorphos per ottenere misure della dimensione e morfologia del cratere in funzione del tasso di dissipazione della nube di detriti
- osservare l'emisfero non impattato per contribuire alle misure di dimensione e volume dell'asteroide stesso.

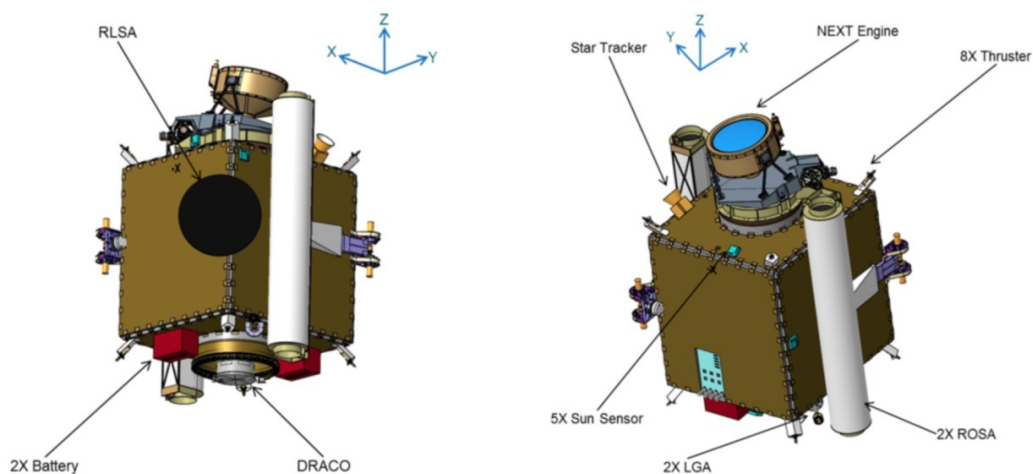


Figura 34 Schema della sonda DART in cui vengono mostrati gli strumenti a bordo

La missione si è conclusa con l'impatto della sonda su Dimorphos e si prefiggeva di:

- dimostrare la fattibilità della tecnica dell'impatto cinetico per deviare un asteroide dalla propria orbita come possibile soluzione per evitare eventuali collisioni con un *PHA*.
- osservare la deflessione dell'asteroide bersaglio, misurando la variazione del periodo orbitale

- studiare gli effetti di una collisione ad alta velocità contro un asteroide, compresi gli effetti provocati dagli *ejecta*.

Tutti interrogativi ai quali, come vedremo, gli scienziati hanno già iniziato a rispondere o lo faranno man mano che i dati dalle osservazioni verranno analizzati.

Un aspetto scientifico importante, come abbiamo detto, sarà quello di dedurre la composizione superficiale e interna dell'asteroide attraverso i modelli di trasferimento di energia cinetica al momento dell'impatto, riferendoci al fattore β , visto in precedenza, definito come in formula 3.7, che tiene conto delle proprietà meccaniche (resistenza, densità, composizione del materiale, porosità), struttura interna e forma del corpo.

La sonda (con i suoi 500 Kg) ha colpito l'asteroide $(4,8 \times 10^9 \text{ Kg})^{62}$, nel verso opposto al suo moto di rivoluzione, con una velocità di 22530 Km/h (circa 6,26 Km/s). Dal momento dello schianto attraverso le osservazioni al telescopio, ora ci si concentra nel quantificare l'efficienza della quantità di moto della collisione e di comprendere le proprietà fisiche dell'asteroide colpito, l'eiezione di detriti di roccia a seguito dell'impatto hanno amplificato notevolmente la spinta della sonda DART contro Dimorphos, producendo su questo una variazione della sua velocità (Δv): maggiore è la massa e maggiore è l'effetto razzo che spinge l'asteroide nella direzione opposta accentuando l'effetto di cambiamento dell'orbita. Questa variazione di velocità comporterà una modifica dei parametri orbitali significativa per quanto riguarda l'orbita reciproca dei due corpi, mentre il cambiamento nell'orbita eliocentrica del sistema sarà trascurabile dal momento che la variazione della velocità orbitale è di circa 17 cm/s, molto inferiore a quella che è la velocità orbitale attorno al Sole (attorno ai 23 Km/s).

Le prime osservazioni ottenute con i telescopi a Terra hanno confermato che l'orbita dell'asteroide è mutata, passando da una durata di 11 ore e 55 minuti a 11 ore e 23 minuti, un cambiamento di 32 minuti (con un margine di

⁶² valore stimato

incertezza di due minuti) che avvalorata la fattibilità di una tecnica di questo tipo per deviare un asteroide, e superiore a quella prevista dai modelli che stimavano una variazione da pochi secondi ad alcune decine di minuti. Ora le osservazioni continueranno per migliorare la precisione della durata della nuova orbita.

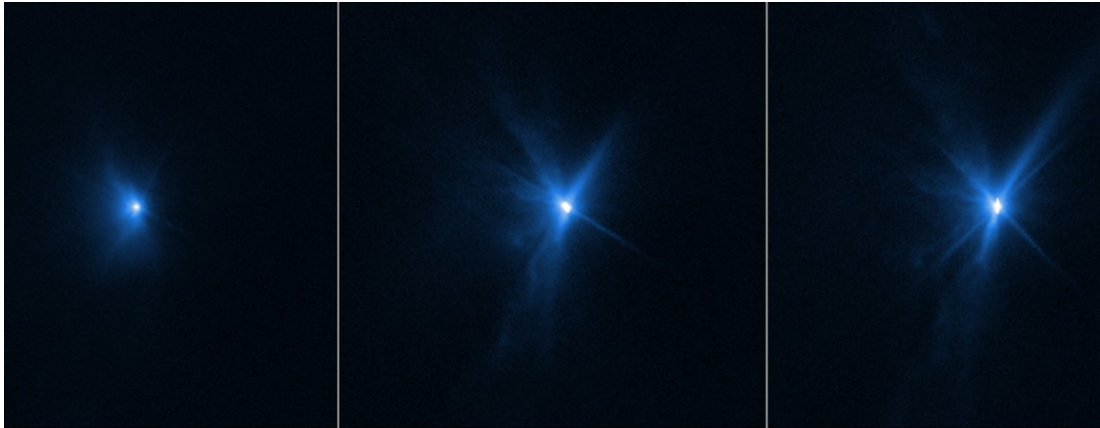


Figura 35 Immagini, riprese dal telescopio spaziale Hubble, sono state scattate (da sinistra verso destra) 22 minuti, 5 ore e 8,2 ore dopo l'impatto di DART con Dimorphos. Sono ben visibili diversi pennacchi di polveri che si espandono rapidamente nello spazio. I pennacchi più intensi si trovano sulla sinistra dell'asteroide che è la direzione da cui è arrivata la sonda Dart. Crediti: Nasa, Esa, Jian-Yang Li (Psi); elaborazione immagini: Alyssa Pagan (Stsci).

3.4.1 Hera

Una seconda missione, gestita dall'ESA e denominata Hera (in onore della dea greca del matrimonio) partirà, secondo l'ultimo crono-programma, nell'ottobre del 2024 ed arriverà a dicembre del 2026, con lo scopo di investigare sul sistema binario Didymos andando a studiare più da vicino gli effetti dovuti alla precedente missione DART su Dimorphos, verificando sia il cratere formatosi che le variazioni dell'orbita del sistema binario. La figura 36 mostra le diverse fasi della missione.

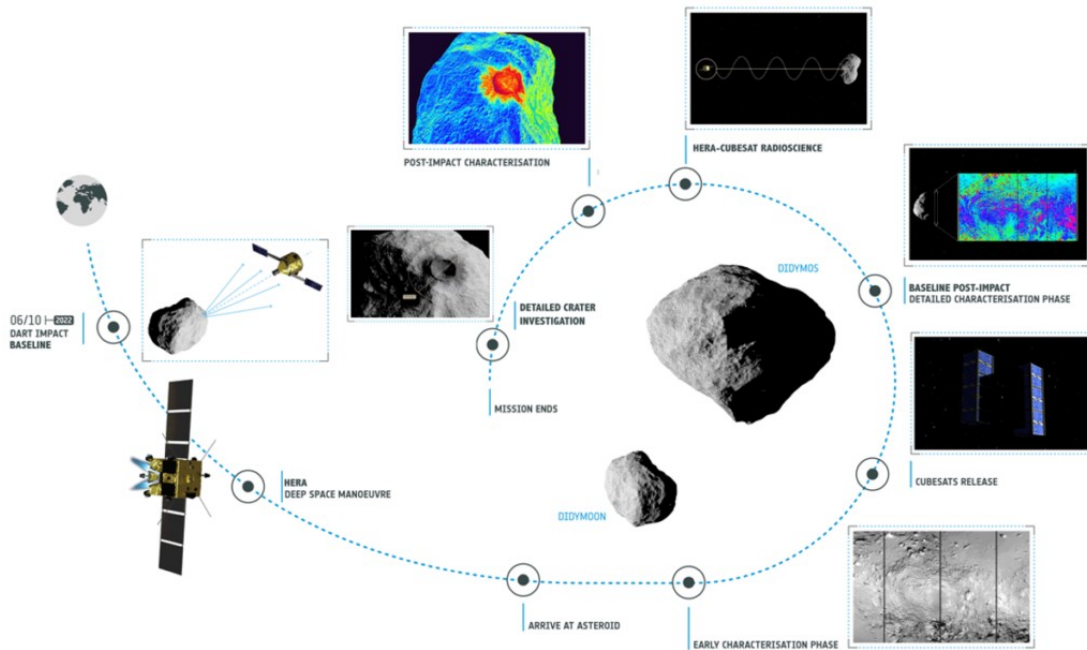


Figura 36 Fasi programmate della missione Hera

In particolare, verrà effettuato un *rendez-vous* con Didymos che permetterà di acquisire informazioni sull'orbita e sulla dinamica del sistema binario, determinando le proprietà fisiche di Dimorphos.

Il carico di Hera si compone di:

- una fotocamera *Asteroid Framing Camera* (AFC) che studierà le caratteristiche fisiche e dinamiche del sistema Didymos, in particolare (ma non solo) per determinare la massa di Dimorphos necessaria per il calcolo esatto del trasferimento del momento.
- un altimetro laser tipo LIDAR (PALT - *Planetary ALTimeter*) che, oltre a supportare le operazioni di sorvolo, concorrerà a stabilire la distanza dei due asteroidi, il volume e la forma dei due oggetti, nonché la topografia della superficie.
- un *imager* a infrarosso termico (TIRI) fornito dall'agenzia spaziale giapponese. L'obiettivo principale della termocamera è quello di distinguere tra le diverse possibili proprietà della superficie di Dimorphos, come roccia nuda rispetto a superfici granulari o polverose. Un altro obiettivo è quello di misurare le proprietà termiche della superficie dell'asteroide che sono rilevanti per la

caratterizzazione della struttura e della coesione del suolo, come quelle che contribuiscono agli effetti termici, in particolare i cambiamenti rotazionali dovuti agli effetti *Yarkovsky* e *YORP*.

- un imager iperspettrale (*HyperScout*) che osserverà nel visibile, in 45 bande spettrali. Contribuirà a un'indagine relativa alla composizione e alla geologia dell'asteroide.

A supportare la sonda Hera ci saranno anche i CubeSat *Juventas* e *Milani*, rilasciati dalla sonda in prossimità della meta. Essi trasporteranno ulteriore strumentazione scientifica, a complemento del *payload* di Hera, in particolare:

Juventas, i cui principali obiettivi saranno quelli di determinare il campo gravitazionale, la struttura interna e le proprietà superficiali di Dimorphos sarà dotato di un radar monostatico a bassa frequenza (JuRa) per investigare l'interno di Dimorphos e di un gravimetro pensato per lo studio dei corpi minori del Sistema Solare (GRASS).

Milani è invece dedicato all'ispezione visiva e al rilevamento della polvere in seguito all'impatto di DART, i suoi obiettivi riguardano la:

- mappatura della composizione globale del sistema Didymos
- caratterizzazione della superficie del sistema Didymos
- valutazione degli effetti dell'impatto di DART sul sistema Didymos e la determinazione del campo gravitazionale
- caratterizzazione delle nuvole di polvere intorno agli asteroidi Didymos

Consta di un micro-termogravimetro (VISTA) dedicato alla rilevazione della presenza di particelle di polvere inferiori a 5-10 μm ; per rilevare sostanze volatili (es. acqua), caratterizzare molecole organiche leggere (es. acidi carbossilici a corte catene di carbonio) e monitorare la contaminazione molecolare a supporto degli altri strumenti a bordo ovvero i Cubesat o i satelliti; e di uno spettrometro di *imaging* ASPECT (Asteroid SPECTral imaging) che opererà nel visibile e nel vicino infrarosso per rilevare la superficie fino a una risoluzione spaziale massima di 1 metro. A differenza

dei più tradizionali spettrometri di imaging a scansione spaziale, esso scatta istantanee 2D a determinate lunghezze d'onda.

La missione ha un triplice funzione: difesa planetaria utilizzando la tecnologia attualmente a nostra disposizione, preparerà la strada per future missioni, perfezionerà tutte quelle operazioni di prossimità nell'ambiente a bassissima gravità dell'asteroide. Le informazioni fornite dalla sonda europea permetteranno di raffinare i modelli matematici e fisici che sono alla base di questa tecnica di mitigazione.

Come abbiamo avuto modo di discutere nel corso del capitolo, emerge il coinvolgimento concreto della comunità scientifica mondiale a far fronte a eventuali pericoli che possono presentarsi nel futuro. Il supporto a questa attività arriva anche dagli investimenti messi in campo dalla politica, come i programmi NEOShield (1 e 2) e NEOROCKS.

Dato l'interesse generale e mediatico che ricoprono questi temi, riteniamo che sia utile, cercare di comunicare al meglio, cercando di arginare il preoccupante fenomeno delle *fake news* – informazioni false e fuorvianti confezionate in modo tale da avere un successo virale sul web, soprattutto se, come in questo caso, riguardano il rischio della propria incolumità fisica.

CAPITOLO 4

COMUNICARE L'ESPLORAZIONE SPAZIALE: DUE CASI STUDIO

In questo capitolo analizzeremo l'approccio delle agenzie spaziali NASA ed ESA nell'ambito della comunicazione istituzionale dell'esplorazione spaziale, facendo riferimento alle missioni DART ed Hera con un'analisi delle rispettive strategie comunicative

4.1 Dalla *space age* alla *space economy*: le implicazioni della comunicazione

Il settore spaziale svolge un ruolo essenziale nell'affrontare le sfide del nuovo millennio e su questo tema sono quindi necessarie da un lato un'adeguata comunicazione che riguarda la ricerca scientifica, dall'altro un coinvolgimento sulle questioni legate alla conquista dello Spazio extra-atmosferico ora che la *Space Economy* sta avviandosi a diventare realtà.

Con *Space Economy* intendiamo il comparto produttivo e finanziario orientato alla creazione e all'impiego di beni e di servizi e allo sfruttamento delle risorse nell'ambito dello Spazio. Essa rappresenta la frontiera dell'innovazione che si concretizza nella combinazione di tecnologie spaziali e digitali utili a sviluppare opportunità tecnologiche e di business che impattano in numerosi settori dell'economia.

La corsa allo Spazio e al suo utilizzo strategico (implicazioni militari, economiche, geopolitiche) va ricondotta al lancio del primo satellite artificiale

messo in orbita attorno alla Terra, lo Sputnik 1, a opera dell'Unione Sovietica (URSS) il 4 ottobre 1957, che apre ufficialmente la *Space Age*. Questo evento provocò, all'epoca, un serio dibattito politico negli USA, che portò alla costituzione della prima agenzia spaziale, la NASA. Da allora, le agenzie spaziali governative impegnate in attività legate a Spazio ed esplorazione spaziale sono cresciute. Oggi esistono 72 diverse agenzie spaziali governative, sei di queste - la China National Space Administration (CNSA), l'Agenzia Spaziale Europea (ESA), l'Organizzazione Indiana per la Ricerca Spaziale (ISRO), la Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), la National Aeronautics and Space Administration (NASA) e l'Agenzia Spaziale Russa (RFSA o Roscosmos) - dispongono di funzionalità di avvio complete; queste includono la capacità di lanciare e recuperare più satelliti, dispiegare motori a razzo criogenici e azionare sonde spaziali.

Nel 2016 la Commissione Europea, consapevole del ruolo essenziale del settore spaziale nell'affrontare le sfide future, ha stilato un documento dal titolo *Space Strategies for Europe*⁶³ in cui viene messo in luce il valore dello Spazio per l'Europa, i cui diversi servizi e prodotti sono fondamentali per la società moderna, quali la navigazione, le previsioni meteorologiche, le informazioni geografiche, passando anche per la ricerca scientifica, spaziale e non. Le attività umane oltre i confini della nostra atmosfera sono sempre più una parte fondante delle società tecnologicamente avanzate. Durante la 13^a Conferenza spaziale europea⁶⁴, l'alto rappresentante per gli affari esteri e la politica di sicurezza Josep Borrell ha dichiarato: *"Lo spazio è un elemento essenziale del nostro più ampio impegno teso a sviluppare l'autonomia strategica dell'Europa. Se c'è una cosa che abbiamo imparato [...] è che dobbiamo rafforzare la nostra autonomia strategica, in vari settori. [...] La nostra presenza nello spazio ci consente di realizzare i nostri obiettivi nei settori della scienza, dell'economia e della sicurezza. In questo modo il*

⁶³ Commissione Europea, "Communication from the commission to the european parliament, the council, the european economic and social committee and the committee of the regions - Space Strategies for Europe", 2016

⁶⁴ <https://spaceconference.eu/>, 12 - 13 gennaio 2021

settore spaziale europeo funge da motore dell'autonomia strategica europea".

Oggigiorno lo Spazio è diventato territorio di importanti business in molti campi, dalle telecomunicazioni all'osservazione della terra. Tutto ciò fa dello Spazio un elemento cruciale per la società. I progressi in campo spaziale, se correttamente comunicati, possono aumentare in modo significativo la consapevolezza pubblica della scienza in generale. Come anche per altri campi della ricerca, sia di base che applicata, sono necessari ingenti finanziamenti pubblici, ed è quindi imprescindibile il coinvolgimento della società. Per farlo è quindi necessario che sia attivo un canale di comunicazione che costituisca un ponte tra la scienza e la società. La scienza, e ancora di più l'esplorazione spaziale, porta con sé l'immagine dell'impresa razionale, in grado di cambiare la nostra vita quotidiana e il nostro modo di comunicare e di interpretare il mondo.

Nonostante la Guerra Fredda sia finita da svariati decenni, la *nuova* corsa allo Spazio continua a determinare gli equilibri internazionali tra le potenze economiche, delineando lo scenario geopolitico globale ormai aperto a numerosi attori, sia pubblici che privati.

L'ultima frontiera dell'esplorazione spaziale, congiunta tra Stati Uniti, Canada, Europa e Giappone in collaborazione con altri partner privati, è Artemis⁶⁵ (Artemide è la dea gemella di Apollo), un programma di volo spaziale con equipaggio che ha l'obiettivo di far sbarcare la prima donna e il prossimo uomo sulla Luna entro il 2024. In particolare per la NASA Artemis è un passo verso l'obiettivo a lungo termine di stabilire una presenza autosufficiente sulla Luna e mandare gli essere umani su Marte. In questo panorama, citiamo la *Lunar Gateway*⁶⁶, la prossima stazione spaziale in orbita cislunare⁶⁷ (fig. 37) che fornirà uno spazio in orbita di appoggio per tutte le missioni future verso la Luna e successivamente verso Marte. Un

⁶⁵ <https://www.nasa.gov/specials/artemis/>

⁶⁶ <https://www.nasa.gov/gateway>

⁶⁷ orbita tra la Terra e la Luna

progetto di questa portata, proietta verso un futuro quasi fantascientifico dove vengono varcate le nuove frontiere dell'umanità nello Spazio, con un ovvio enorme impatto comunicativo nell'immaginario pubblico.



Figura 37 Immagine tratta dalla home page del sito web del progetto Artemis. Crediti: NASA.

4.2 I casi studio: DART ed Hera

Nel contesto di questo lavoro di tesi concentreremo l'attenzione sulle agenzie spaziali statunitense ed europea (NASA ed ESA) e analizzeremo con maggiore dettaglio le strategie di comunicazione relative alle missioni DART e Hera per le rispettive agenzie spaziali. Considerato il contesto e il potenziale impatto mediatico di queste missioni, vogliamo capire meglio come gli attori principali affrontino gli scenari presenti e/o futuri delle due missioni. Lo scopo è di condurre un'indagine qualitativa su modalità e strategie di comunicazione attraverso un'analisi comparata delle rispettive attività, prendendo in esame aspetti specifici della comunicazione che sono ritenuti rilevanti per questo lavoro di tesi.

I nostri casi studio, ovvero le missioni DART e Hera, sono particolarmente interessanti perché racchiudono numerosi aspetti rilevanti a cui abbiamo fatto riferimento in precedenza, nonché le implicazioni relative alla comunicazione del **pericolo**, del **rischio** e del **fallimento**.

Per contestualizzare il discorso, facciamo una breve panoramica delle due agenzie spaziali.

4.2.1 La NASA

L'agenzia governativa civile responsabile del programma spaziale e di ricerca aerospaziale degli Stati Uniti è la NASA (*National Aeronautics and Space Administration*). Nata nel 1958 per volere del Congresso Americano - come espresso nel report *Space Act*⁶⁸ con l'intento politico di tener testa al progresso tecnologico portato avanti dall'Unione Sovietica, la NASA poggia le sue basi sulla preesistente agenzia aeronautica americana (NACA, *National Advisory Committee for Aeronautics*) dalla quale eredita tutta la tecnologia bellica e post-bellica. I primi programmi della NASA erano incentrati sulla possibilità di missioni umane nello Spazio, sotto la spinta della competizione tra USA e URSS dovuta alla Guerra Fredda (la corsa allo Spazio). Citiamo tra tutti il *Mercury*, il primo programma volto a stabilire la fattibilità per l'uomo di viaggiare nello spazio (fig.38), e le missioni *Apollo* il cui obiettivo nazionale era far "atterrare un uomo sulla Luna entro la fine del decennio", come dichiarò il presidente John Kennedy durante una sessione congiunta al Congresso americano il 25 maggio 1961. Dopo otto anni di missioni preliminari e la perdita dell'equipaggio dell'*Apollo 1*, il programma *Apollo* raggiunse la sua meta il 20 luglio 1969, con l'atterraggio dell'*Apollo*

68

<https://web.archive.org/web/20200824122028/https://www.hq.nasa.gov/office/pao/History/spaceact.html>

11⁶⁹ sulla superficie della Luna e lo sbarco del primo uomo (fig 39). Dopo il programma Apollo per l'esplorazione lunare, l'attività spaziale della NASA si è sviluppata attraverso il programma della stazione orbitale *Skylab*, il lancio di numerose missioni di esplorazione del sistema solare con sonde automatiche e lo sfruttamento dello spazio orbitale terrestre con le navette *Space Shuttle* e collaborazione della Stazione spaziale internazionale (ISS).



Figura 38 Locandina del primo programma spaziale americano con l'equipaggio del progetto *Mercury*. Crediti: NASA.

La NASA, che fin dalle sue origini ha una connotazione volta alla comunicazione pubblica, anche a tratti propagandistica, detiene anche il primato assoluto nell'avere sdoganato contenuti scientifici in forma *open-access* attraverso il primo sito web liberamente consultabile (primi anni '90).

⁶⁹ Neil Armstrong fu il primo uomo a toccare il suolo lunare, altri dieci astronauti misero poi piede sul suolo lunare nelle successive missioni Apollo che terminarono nel dicembre 1972.

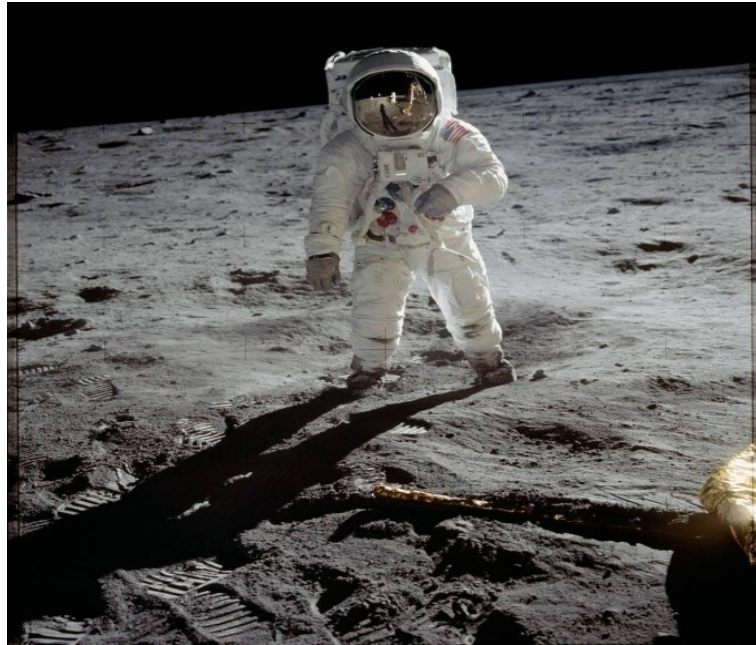


Figura 39 L'astronauta Buzz Aldrin cammina sulla superficie della luna vicino al modulo lunare Eagle durante la missione Apollo 11. Fotografia scattata il 20 luglio 1969 dal comandante della missione Neil Armstrong. Crediti: NASA.

4.2.2 L' ESA

L'Agenzia Spaziale Europea (ESA, *European Space Agency*)⁷⁰, istituita nel 1975, nasce con l'obiettivo di aprire nuove strade all'esplorazione spaziale, sviluppare tecnologie avanzate e costruire un'industria competitiva e forte a livello globale. Attualmente⁷¹ fanno parte di questo ente 22 nazioni europee. La strategia spaziale dell'ESA si articola attorno a quattro principali assi: lo sviluppo delle conoscenze scientifiche, il miglioramento della qualità della vita sulla Terra, il successo della cooperazione europea e la promozione dell'industria europea.

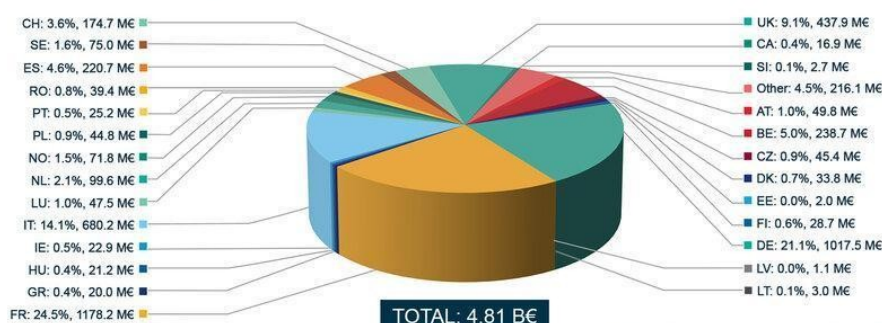
Le attività principali dell'ESA riguardano programmi scientifici e di esplorazione spaziale, osservazione della Terra, telecomunicazioni, navigazione satellitare, trasporto spaziale e lanciatori, e cooperazione alla Stazione Spaziale Internazionale. In questo momento l'ESA non è parte integrante dell'Unione Europea (UE), infatti non tutti i Paesi dell'Unione

⁷⁰ <https://www.esa.int/>

⁷¹ 14 novembre 2022

Europea fanno parte dell'ESA, mentre l'organizzazione contiene anche membri come Svizzera, Norvegia e Regno Unito. Tuttavia, ESA e Unione europea hanno molti obiettivi in comune. L'UE, in particolare, è interessata a mantenere un saldo posizionamento nel panorama geopolitico spaziale in modo da poter consentire agli stati membri un accesso sicuro allo Spazio, rappresentando quest'ultimo una risorsa vitale per le politiche economiche dell'UE e per il ruolo che l'UE vuole svolgere nel mondo. Inoltre l'UE finanzia l'ESA per il 20% del budget totale. Dopo l'agenzia spaziale americana e quella cinese, quella europea è l'agenzia spaziale con il budget più alto, 7,15 miliardi per il 2022⁷² (fig. 40) la quota principale, ossia il 64.3%, deriva dai finanziamenti ottenuti dagli Stati membri impegnati a sostenere i diversi programmi spaziali

BUDGET 2022 ESA Activities and Programmes



BUDGET 2022 BY FUNDING SOURCE

TOTAL: 7.15 B€

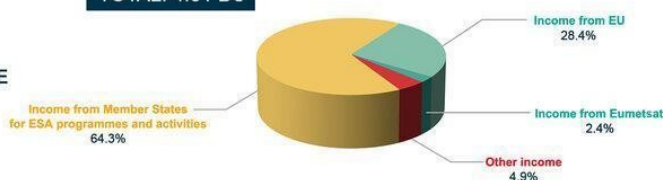


Figura 40 Budget ESA 2022 suddiviso per provenienza, includendo anche quello messo a disposizione dall' Unione Europea. Crediti: ESA.

Nell'ultima riunione del Consiglio a livello ministeriale dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA), CM22⁷³, avvenuta tra il 22 e il 23 novembre 2022, si è deciso di rafforzare ulteriormente la posizione europea in campo

⁷² https://www.esa.int/About_Us/Corporate_news/Funding

⁷³ appuntamenti triennali nei quali si prendono decisioni su attività e stanziamenti finanziari per i programmi obbligatori e opzionali dei prossimi tre anni dell'ESA. L'Italia è il terzo contributore dell'ESA, appena dopo la Francia e primo contributore per i programmi opzionali (<https://vision.esa.int/cm22/>)

internazionale per raggiungere la competitività e l'indipendenza nello Spazio, come dimostra la ripartizione del budget nei prossimi tre anni⁷⁴ (fig. 41)

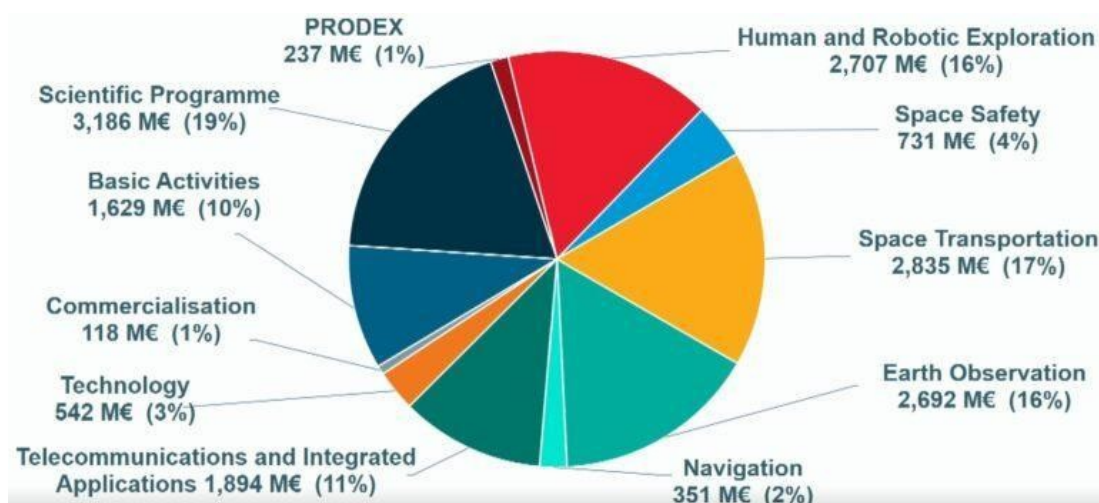


Figura 41 Ripartizione del budget ESA divisa per attività, illustrata il 23 novembre nell'ultima CM22. Crediti: ESA.

Tra le missioni ESA, Rosetta è sicuramente la missione più famosa e ambiziosa tra quelle che nel corso degli anni hanno esplorato e osservato un corpo minore del Sistema Solare. Per la prima volta in assoluto una sonda è atterrata sulla superficie di una cometa. L'impatto comunicativo di questa missione è stato un grande successo dell'Agenzia spaziale Europea grazie al lavoro fatto per la campagna di comunicazione della missione in cui i protagonisti e gli eventi raccontati sono riusciti a fare breccia nell'immaginario collettivo. Uno dei prodotti di maggior successo è stato il cartone animato *Once upon a time*⁷⁵ inizialmente pensato per i più piccoli ma considerata la chiave narrativa e originale con cui è stato affrontato il tema della missione, la serie di avventure ha avuto successo verso un pubblico più ampio⁷⁶. In quel caso il filo conduttore dello *storytelling* è stato la *suspence*, a causa del possibile insuccesso della missione per il fatto che la sonda potesse non svegliarsi, dopo alcuni anni di ibernazione pianificata.

⁷⁴ triennio 2023-2025

⁷⁵ https://www.esa.int/Education/Teach_with_Rosetta/Once_upon_a_time

⁷⁶ C. Mignone, E. Baldwin, K. O'Flaherty, A. Homfeld, M. Bauer, M. McCaughrean, S. Marcu, C. Palazzari, How a Cartoon Series Helped the Public Care about Rosetta and Philae, in «CAPJournal», (2016), 19, 12

Rosetta è stata una missione da record, la sonda ha percorso quasi 8 miliardi di chilometri in un arco di tempo pari a 12 anni, due dei quali intorno alla cometa, sganciando un suo lander (*Philae*) e raccogliendo una mole di dati impressionante e scattando una serie di immagini che hanno rivoluzionato la nostra conoscenza delle comete, tra le immagini più celebri, e per certi versi divertenti, è quella che del famoso *selfie* sulla cometa 67P (fig. 42)

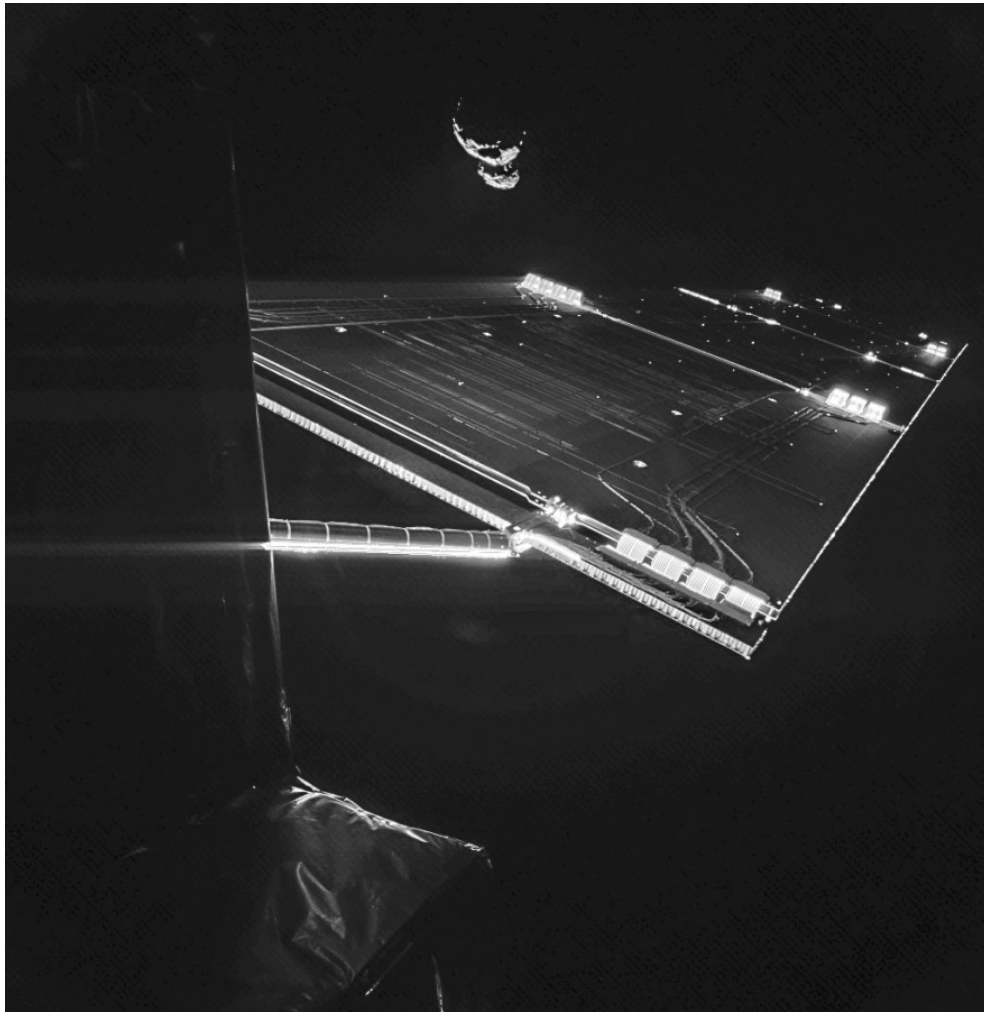


Figura 42 Utilizzando la fotocamera CIVA sul lander Philae di Rosetta, la sonda ha scattato un *selfie* alla cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko. L'immagine è stata scattata da una distanza di circa 50 km dalla cometa e cattura uno dei pannelli solari di Rosetta lungo 14 metri, con la cometa 67P/C-G nello sfondo. Crediti: ESA.

4.3 Analisi comparativa delle strategie di comunicazione

Ci addentriamo ora sul ruolo dell'attività di comunicazione delle due agenzie spaziali delineandone le caratteristiche ed esaminando le declinazioni che assume in situazioni differenti e imprevedibili, in quella che rappresenta la prima sfida di difesa planetaria, capace di portare all'attenzione del pubblico un problema tangibile di rischio e quindi dotato di un *appeal* specifico.

Dopo l'impatto di DART sull'asteroide, i titoli delle testate giornalistiche mettevano in luce il successo senza precedenti della missione, ma cosa sarebbe accaduto in caso contrario? È una domanda che ogni team che lavora a una missione spaziale deve prendere in considerazione. Quali saranno gli aspetti caratterizzanti della comunicazione della missione Hera? Questi interrogativi ci hanno spinto a indagare su quali scelte sia stata declinata la comunicazione.

4.3.1 La comunicazione NASA della missione DART

Sin dalla sua nascita, un merito della NASA è stato indubbiamente quello di comunicare le proprie attività al pubblico nel modo più ampio possibile. Il *NASA Space Act*⁷⁷ del 1958 stabiliva che l'Agenzia doveva "provvedere alla più ampia diffusione praticabile e appropriata di informazioni riguardanti le sue attività e i relativi risultati". Nel corso degli oltre sei decenni di storia della NASA, foto e video sono stati importantissimi per questi sforzi di comunicazione, le riprese video e le fotografie dell'Apollo 11 son diventate iconiche: l'uomo sulla Luna, è stato il primo caso che ha fatto da apripista nel catalizzare l'interesse del pubblico verso lo Spazio. La NASA ha dimostrato più volte, nel corso degli anni, come il potere delle sue immagini possono rappresentare una straordinaria forma di comunicazione dell'esplorazione spaziale e non solo. Oltre ai materiali rivolti alla stampa, un canale privilegiato e più immediato, oggigiorno, è rappresentato dai *social network*. Il pubblico di elezione della NASA è un pubblico generalista, come dimostra la

⁷⁷ documento che sancisce la sua legislazione istitutiva

diversificazione dell'offerta operata nella comunicazione: bambini e insegnanti, appassionati della materia, scienziati, operatori dei media, ecc.

Centrale è divenuto anche nei progetti NASA il tema della difesa planetaria. All'interno del sito web istituzionale esiste una sezione specifica⁷⁸ (fig. 43) in cui è possibile avere una prima idea del tema e familiarizzare con i concetti di base. Dalle pagine web è possibile accedere ad altri canali come le piattaforme social che permettono un'interazione maggiore, diretta e in tempo reale con il pubblico.

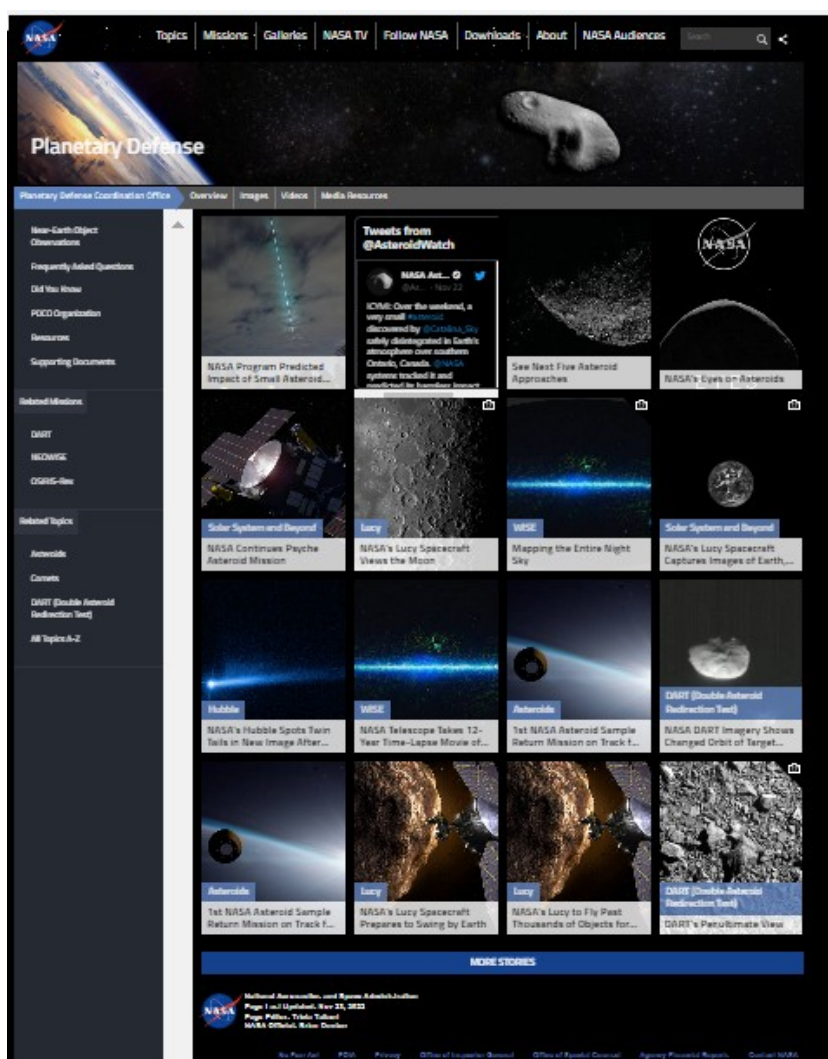


Figura 43 Schermata pagina sito web NASA dedicato alla tema della Planetary Defense

⁷⁸ <https://www.nasa.gov/planetarydefense/overview>

Al rischio asteroidale⁷⁹ sono riservati canali specifici, tra cui anche un account twitter (fig. 44) che è interamente dedicato al mondo degli asteroidi. Immagini, dati, infografiche permettono al lettore di accedere a una descrizione rigorosa e documentata dell'argomento, volendosi configurare come una fonte diretta di informazioni scientifiche senza lasciare spazio a possibili derive irrazionali.

Questa sezione del sito web è curata dall'ufficio di coordinamento della difesa planetaria, che - si legge - *“rileva, traccia e caratterizza i NEO (Near-Earth Objects) per consentire la mitigazione dei potenziali futuri impatti dei NEO”*.



Figura 44 Schermata pagina twitter account *NASA Asteroids Watch*

Un altro aspetto caratterizzante della comunicazione della NASA è certamente quello emotivo e di empatia verso le missioni, come è successo per DART, con la creazione di uno *storytelling* specifico e coinvolgente, come dimostrano i tweet relativi alle due fasi più salienti della missione (fig. 45).

⁷⁹ <https://www.jpl.nasa.gov/asteroid-watch>

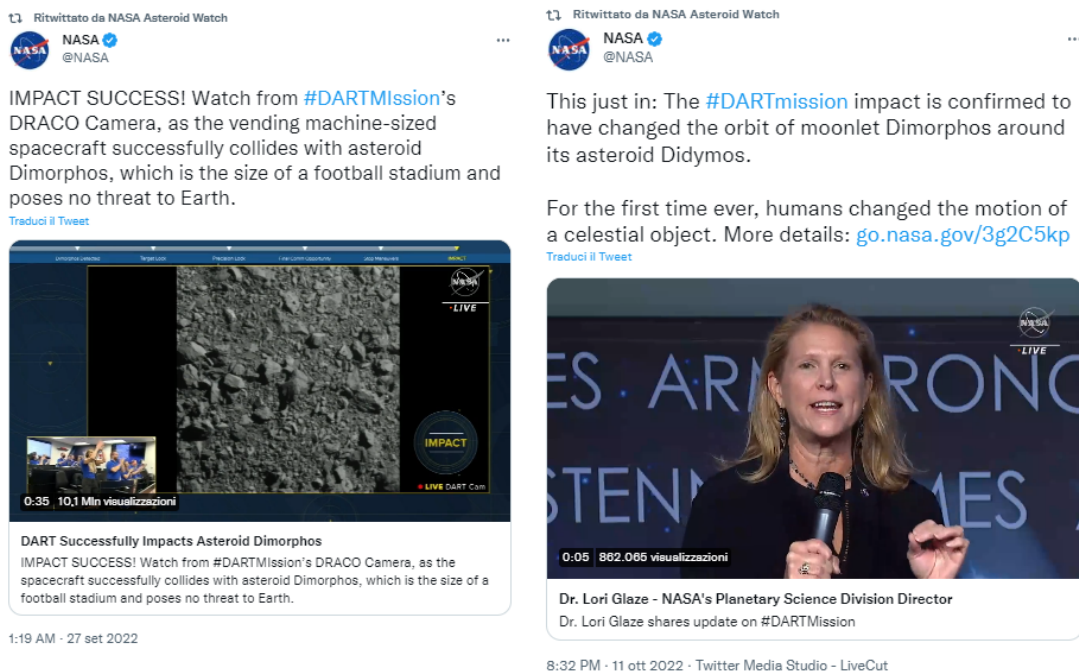


Figura 45 A sinistra, il tweet che conferma il successo dell'impatto di DART avvenuto il 27 settembre 2022; a destra l'annuncio del cambiamento del periodo orbitale di Dimorphos a seguito dell'impatto durante la conferenza stampa del giorno 11 ottobre 2022.

4.3.2 La comunicazione ESA della missione Hera

Altrettanto articolati sono i canali comunicativi dell'Agenzia Spaziale Europea, nonostante sia evidente a un occhio esperto che la strategia complessiva sia stata implementata più recentemente. Un canale dedicato alla stampa è ESAforMEDIA - NEWSROOM⁸⁰ con contenuti predisposti appositamente per i mass media. Altre sezioni più generiche sono dedicate per un pubblico più generico. All'interno del sito web istituzionale si trova anche la sezione dove sono indicati i principali social network⁸¹ attivi: oltre al canale principale abbiamo tre principali segmenti di account, uno legato alle pagine nelle principali lingue dei paesi membri tra cui quello in italiano, un secondo dedicato alle attività dell'ESA, e infine una sezione completamente dedicata agli astronauti.

⁸⁰ <https://www.esa.int/Newsroom>

⁸¹ https://www.esa.int/ESA/Connect_with_us/Connect_with_us

Sempre nell'ambito della missione *Hera*, a supporto della comunicazione, sono stati creati anche degli episodi *cartoons* originali, sulla fortunata scia che aveva caratterizzato la missione Rosetta, come abbiamo citato prima, attraverso una campagna di comunicazione dal titolo *The incredible adventures of Hera Mission* (le incredibili avventure della missione Hera) (fig. 46). La serie, iniziata il 1° giugno 2021 con la pubblicazione del primo episodio *Presenting* (La Presentazione), al momento attuale⁸² si trova al quarto episodio, pubblicato il 26 ottobre 2022. La sonda Hera viene antropomorfizzata sotto le vesti di un detective che con i suoi aiutanti Juventas e Milani dovrà indagare su ciò che è avvenuto dopo l'impatto di DART su Dimorphos. Gli episodi durano pochi minuti (non superano mai i quattro minuti) e presentano le sfide che attendono Hera nel suo viaggio.



Figura 46 Locandina della campagna di comunicazione *The incredible adventures of Hera Mission*. Crediti ESA.

⁸² 22 novembre

4.4 Approfondimento: intervista all'ESA

Nel caso della missione Hera, essendo una missione ancora in fase preliminare, abbiamo svolto un ulteriore lavoro di approfondimento intervistando direttamente i referenti degli uffici comunicazione istituzionale dell'ESA (le interviste riportate integralmente nella sezione Appendice). Sia il lavoro di preparazione delle interviste, sia l'interazione istituzionale con l'Agenzia Spaziale Europea, sia le risposte effettivamente ottenute, rappresentano una parte rilevante e inedita di questo lavoro di tesi.

4.4.1 Impostazione e tematiche

L'individuazione delle figure di riferimento interne all'Agenzia Spaziale Europea è avvenuta tramite contatto diretto. L'intervista è avvenuta a seguito di uno scambio di e-mail preliminari ed è stata scelta la forma scritta, in modo da fornire agli interlocutori domande standard e aperte, dando il tempo di fornire risposte articolate e ampie.

L'idea di partenza era quella di predisporre un questionario standard da sottoporre alle agenzie spaziali per un'eventuale analisi comparata.

L'intervista si articola intorno a cinque assi tematici:

1. l'insuccesso nel raggiungimento degli obiettivi della missione;
2. il rischio derivante dall'eventuale impatto di oggetti asteroidali sul nostro pianeta;
3. il *target audience*, ovvero il pubblico o i pubblici potenzialmente interessati a missioni di questo tipo e sulla scelta dei destinatari;
4. l'interazione tra il team scientifico e gli specialisti della comunicazione nella scelta del messaggio da veicolare nella comunicazione;
5. eventuali strumenti di valutazione dell'efficacia delle campagne di comunicazione.

Di seguito riportiamo nel dettaglio le singole domande:

- 1. Hera sarà la prima missione a incontrare l'asteroide binario Didymos dopo l'impatto con la sonda DART della NASA. Alla luce di ciò che accadrà a seguito dell'impatto, ovvero se vi sarà o meno una deviazione significativa, quale sarà la strategia di comunicazione che l'ESA adotterà in caso di successo della missione? E in caso di fallimento? In ogni modo, ESA e NASA prevedono il coordinamento di una strategia di comunicazione sia in caso di successo che di fallimento?*
- 2. La difesa planetaria è legata al concetto di rischio perché riguarda la sicurezza e l'incolumità delle persone, pensiamo a quanto accaduto a Chelyabinsk nel 2013. Come avviene la comunicazione quando si ha a che fare con il rischio? In che modo l'elemento di rischio influenza la vostra strategia di comunicazione?*
- 3. Per ora abbiamo parlato di comunicazione, ma non di quali siano i destinatari. È risaputo che temi così importanti hanno bisogno di essere condivisi con la società, sia in termini di ricerca scientifica sia in termini di investimento anche in prospettiva dei risvolti futuri. Esiste un target di riferimento predefinito? Se sì, quale? Come scegliete il vostro target di riferimento? In che modo siete/sarete in grado di raggiungere questo particolare target di riferimento?*
- 4. Come è formata la vostra squadra? Che rapporto esiste tra il team di comunicazione e gli scienziati nella vostra agenzia spaziale?*
- 5. Pianificate qualche survey per capire l'impatto della vostra campagna di comunicazione? Qual è il vostro target di riferimento?*

Abbiamo rivolto le nostre domande a Daniel Scuka, responsabile della comunicazione del programma per le operazioni e la sicurezza spaziale presso l'Agenzia spaziale europea, che lavora al Centro europeo per le operazioni spaziali dell'ESA a Darmstadt in Germania.

Nelle fasi più informali della nostra intervista abbiamo discusso del potenziale dell'astronomia nel contesto ampio della comunicazione della scienza rivolta anche a un pubblico molto vasto di non esperti.

4.4.2 Analisi delle risposte

Analizziamo le risposte ricevute partendo dal primo tema che abbiamo voluto indagare, di carattere generale relativo al *feedback* nel monitoraggio della comunicazione da parte del pubblico. L'analisi del target e della comunicazione permette di evidenziare le fratture che possono crearsi all'interno del processo comunicativo ed è quindi necessario averne traccia per poter sopperire a questa mancanza e agire in maniera mirata. Dovendo tenere a mente che un processo comunicativo efficace per definizione non può mai essere unidirezionale, è necessario valutare l'efficacia della comunicazione e constatare quanto essa abbia inciso sul pubblico e se abbia sortito o meno gli effetti desiderati.

Si evince che l'ESA predispone annualmente delle *survey* specifiche per raccogliere *feedback* tramite i propri canali (o media a cui si affida) o mediante l'ausilio di servizi esterni; accanto a queste mensilmente vengono effettuate analisi incentrate su attività specifiche (missioni in partenza, scoperte astronomiche, ecc.) per determinare la portata, la diffusione e la risonanza delle notizie. Nel caso di Hera, non si farà una *survey* specifica, ma verrà effettuata durante alcuni momenti dedicati, sicuramente le fasi di lancio, quelle arrivo, ecc.

Accanto alle *survey*, degli strumenti molto utili sono i *media analytics*. Mentre le *survey* danno indicazioni di carattere generale con un periodo di tempo ampio, non permettono però di effettuare un'analisi puntuale, cosa che invece è possibile sondare con i *media analytics* (dei social per esempio), in modo da avere un riscontro (giornaliero e/o settimanale) su una notizia o un tema "caldo" ed è più facile quantificare questo rapporto: le analisi delle metriche e dei commenti si rivela uno strumento utile per capire qual è la reazione del pubblico a una notizia o a un evento.

Per contestualizzare forniamo alcuni dati forniti da ESA con l'ultima survey. Essendo un documento interno dell'ente non è possibile condividerlo ma possiamo citare dei dati interessanti per il nostro lavoro.

Individuiamo alcuni pubblici di riferimento a cui l'ESA indirizza la comunicazione, che possiamo identificare come segue:

- destinatari di una comunicazione generalista: pubblico composto da non esperti di differenti fasce di età. Un'attenzione specifica e' dedicata ai Paesi membri dell'ESA o Paesi terzi dove l'attività e la cooperazione dell'ESA ha una presenza significativa a livello internazionale, per esempio gli Stati che partecipano alla ISS, con sezioni linguistiche ad hoc. Infatti, esistono diverse pagine e diversi canali all'interno del sito ufficiale ESA redatte nelle lingue nazionali dei paesi membri. Questo strumento permette anche a chi ha poca dimestichezza con l'inglese di poter accedere alle notizie dell'Ente.
- i mass media, in particolare le televisioni, soprattutto quelle che hanno canali dedicati alla comunicazione scientifica. ESA al suo interno offre un canale tv⁸³ la cui programmazione web (continua nel tempo) offre programmi sulle attività spaziali europee, dagli asteroidi alla gravità zero, seguendo la vita degli astronauti europei all'interno della ISS.
- un pubblico specialistico e tecnico, che comprende gli scienziati e le industrie, le istituzioni pubbliche, e infine i decisori politici di più alto livello. La scelta di questo tipo di pubblico è operata dal direttore generale ed è a tutti gli effetti una scelta politica.

Andando più nel dettaglio, se è tanto importante la scelta del pubblico lo è altrettanto la scelta di "cosa comunicare". Il raggiungimento del pubblico e dei vari segmenti avviene attraverso diversi canali declinati per essere attrattivi e selezionando la notizia (e il tipo) a seconda del pubblico. Un altro fattore fondamentale è la tempistica corretta e funzionale alla comunicazione: la notizia deve essere infatti connessa al ciclo di notizie esterne relative agli

⁸³ https://www.esa.int/ESA_Multimedia/ESA_Web_TV

eventi del mondo scientifico e alle attività dei partner (es. NASA ma anche altre agenzie spaziali).

All'ESA la comunicazione è ben integrata tra tutte le componenti dei vari team che partecipano a un determinato progetto. Questo richiede un'organizzazione chiara con ruoli ben definiti e sicuramente un piano di comunicazione strategico.

Ecco come è organizzata l'ESA relativamente alla comunicazione:

- un team di 12-15 persone che si occupa della comunicazione aziendale (nessuno è dedicato esclusivamente alla missione Hera);
- un team per il programma di Sicurezza Spaziale;
- il team project e il team scientifico (che dispone di un proprio addetto alla comunicazione).

Il team di comunicazione è "condiviso" temporaneamente in più progetti, missioni, o campagne comunicative, tuttavia per fasi intensive di una specifica campagna (quando ci sarà il lancio di Hera) potranno essere utilizzate più unità.

Il team di comunicazione ha il compito di guidare la comunicazione istituzionale e le relazioni con i media e garantisce che esse siano coerenti con gli obiettivi ESA, mentre i team scientifici e di programma hanno un margine di autonomia maggiore.

Per quanto riguarda la sinergia della rispettive agenzie spaziali nel frangente comunicativo, possiamo riportare che la comunicazione ESA della missione Hera si intreccia con quella della NASA per la missione DART, concordando con essa le strategie di comunicazione sin dagli albori della missione, come si evince dal comunicato⁸⁴ dell'11 ottobre 2022. Infatti, a seguito dell'avvenuto successo, è stato sottolineato che DART conferma che sia possibile spostare artificialmente un corpo di piccole dimensioni nel nostro Sistema Solare. Sul fatto che però possa essere o meno una tecnica

⁸⁴ <https://www.nasa.gov/press-release/nasa-confirms-dart-mission-impact-changed-asteroid-s-motion-in-space>

ripetibile e prevedibile, potremo saperlo solo con la missione Hera che, come sappiamo, studierà più approfonditamente il sistema asteroidale.

Come per il team scientifico anche per la parte comunicativa la missione Hera sarà integrata e gestita in sinergia, come per la strategia comunicativa di successo anche quella in caso di fallimento, viene condivisa assieme tra le due agenzie.

Il tema della difesa planetaria è molto "sentito" all'interno dell'ESA, in ottica di rischio, come il meteo spaziale e i detriti spaziali hanno e stanno avendo una trattazione speciale, alcuni accorgimenti che ESA utilizza per il pubblico di non esperti, con il quale evita l'uso troppi numeri, formulazioni matematiche e percentuali, questi invece vengono utilizzate quando si comunicano con i media in cui la precisione è essenziale per riportare la notizia.

Data la portata della missione Hera, l'ESA predisporrà l'organizzazione di workshop dedicati ai giornalisti non specialisti, che tratteranno i rischi della difesa planetaria e i calcoli di tali rischi.

CONCLUSIONI

L'esplorazione spaziale si conferma in ogni sua implicazione come una proiezione delle capacità umane verso frontiere inesplorate, spostando i limiti delle nostre capacità scientifiche e tecnologiche sempre in avanti. In quest'ottica, le missioni DART ed Hera sono un esempio particolarmente ingegnoso, complesso e affascinante di imprese mai tentate dall'Uomo in precedenza. Accanto a un esame dello stato dell'arte delle due missioni nello specifico e della tematica della difesa planetaria in generale, sono stati approfonditi molti aspetti caratterizzanti della comunicazione delle rispettive missioni e delle relative agenzie spaziali. Con questo lavoro di indagine qualitativa e senza pretesa di esaustività, sono stati messi in luce e analizzati interessanti aspetti della comunicazione delle missioni DART ed Hera, coerentemente con l'obiettivo di cercare di descrivere uno spaccato dei processi comunicativi nell'ambito della difesa planetaria interpretata in capo a due tra le principali agenzie spaziali del panorama internazionale. Sono state messe inoltre in evidenza le notevoli implicazioni geopolitiche e di opinione pubblica che conseguono inevitabilmente dalla comunicazione istituzionale.

È evidente come la comunicazione scientifica non possa essere interpretabile come mero strumento di diffusione di notizie, ma è ben riconoscibile un processo complesso, articolato, talvolta insidioso e ricco di implicazioni strategiche, sia per i molti attori coinvolti (che non hanno lo stesso background culturale e metodologico) sia perché, come ogni disciplina integrata in un sistema complesso, presuppone competenze specifiche.

Oggi, la comunicazione della scienza è un tassello fondamentale e imprescindibile del mondo della ricerca, non essendo più possibile considerarla un'attività marginale o subordinata. Condividere e valorizzare metodologie, rischi, risultati e fallimenti delle proprie ricerche è un dovere della scienza verso la società.

I media, i ricercatori, gli istituti di ricerca, le università, nonché il mondo dell'industria e dei decisori politici devono svolgere pienamente il proprio ruolo di informazione pubblica; devono cioè essere in grado di comunicare e impegnarsi nel dibattito su questioni scientifiche in modo professionale, rigoroso e comprensibile, nonché spiegare onestamente i benefici e i limiti del progresso scientifico⁸⁵.

Affinché il sistema scienza-società sia pienamente integrato, il passo decisivo deve arrivare dalle istituzioni scientifiche che devono prendere consapevolezza della loro dimensione anche sociale e impegnarsi attivamente affinché si investano risorse su figure con competenze tecnico-scientifiche solide da dedicare alla comunicazione, e che possano contribuire a un reale beneficio in termini di conoscenza, immagine e reputazione dell'impresa globale razionale che la ricerca scientifica rappresenta.

⁸⁵ Commissione Europea, Office for Official Publications of the European Communities, Science and Society Action Plan, Lussemburgo, 2002.

APPENDICE

Nr.	Questions and Answers
1	<p>Do you plan any survey to understand the impact of your campaign of communication? Which is your target audience?</p> <p>ESA routinely – at least 1x per year – surveys its audiences, sometimes via our own channels, and sometimes via external survey company/service providers.</p> <p>We generally always target general public/mass market in our corporate communication efforts, so that’s who we survey. In these surveys, we target all people who follow all channels/all topics.</p> <p>We also target general/non-specialist media in our corporate communication efforts, but we never survey media for any purpose.</p> <p>We also conduct extensive media analytics (monthly, plus ad hoc for specific major activities e.g. James Webb) to determine the spread, reach and echo of our communication activities including online, social and media relations. Our analytics focusses on ESA overall as well as on specific topics, missions, campaigns and spokespersons (e.g. the Director General).</p> <p>For the Hera mission, we don’t foresee any specific surveys. We will include Hera in our regular analytics tracking, with special Hera-only ad hoc tracking for key events (launch, asteroid arrival, etc.).</p> <p>We base our communication plans much more on the media analytics than on surveys; Surveys aren’t useful for judging day-to-day or week to-week sentiments – but analytics tracking does precisely that.</p> <p>Here’s an example of a recent survey:</p> <p>https://www.esa.int/About_Us/Corporate_news/Strong_European_support_for_space_to_combat_climate_crisis</p> <p>[...]</p>
2	<p>How is your team made up? Which is the relationship between the communication team and the scientists in your space agency?</p> <p>For the Hera mission, the ‘team of people who communicate about the mission’ comprises:</p> <ul style="list-style-type: none"> ● The ESA Corporate Communication Team – Online editorial + social media (2 people), media relations (2 people), one ‘communication officer’ (1 person) □ these are backed up by ESA-level teams of production: digital, video, graphics, outreach, etc. This represents ca. 12-15 people, but none are dedicated only to Hera. ● The Space Safety Programme Communication team – Online editorial + social media (2.5 people) ● The mission project team at ESA – includes the ESA mission manager (who is

	<p>*excellent* with media and other activities), the ESA project scientist, several specialists who are very good with media interviews, etc., plus a committed budget</p> <ul style="list-style-type: none"> • The team of scientists working across all the instruments, including the mission PI (see full list via https://www.heramission.space/team) – and they have 1x online communications editor. • NASA Communication – Corporate Communication • NASA Communication – Planetary Defence Office • Johns Hopkins University, Baltimore, MD – contracted by NASA to build and fly DART <p>Note that none of the communications people (except the 1 working with the science team) are full-time dedicated to Hera – they all have other missions and activities they must cover. However, for intense phases, e.g. launch campaign in autumn 2024, they can be substantially dedicated to just Hera.</p> <p>The relationship between all these people is very good – there are clear lines of responsibility, many options/opportunities for collaboration and everyone has a very proactive/positive attitude, so we are particularly lucky.</p> <p>ESA Communication leads the policy/campaigns for top-level communication and media relations, and ensures these are coherent with ESA’s overall communication goals, while the programme and science teams are free to conduct communication activities (online, events, digital production, publishing) within specific areas/domains.</p> <p>Also, as ESA owns all IP for the data coming from Hera (images, etc.), the workflow for publishing news, data, images and updates will be especially clear and short.</p> <p>Note that in Sep & Oct 2022, we found via our analytics that ca. 50% of all European media who covered/mentioned “NASA DART” also mentioned “ESA Hera” – which is an astounding figure and a testament to the good relationship between ESA Communication and NASA Communication, both ensuring that both missions were relatively well mentioned/covered.</p>
3	<p>Hera will be the first mission to encounter the binary asteroid Didymos after the impact with NASA's DART probe. In light of what will happen following the impact, i.e. whether there is a significant deviation or not, what will be the communication strategy that ESA will adopt if the mission is successful? And in case of failure? Anyway, will ESA and NASA coordinate a communication strategy both in case of success or failure?</p> <p>DART has already proven it is a success, and the deviation that resulted from the impact was much larger than expected:</p> <p>https://www.nasa.gov/press-release/nasa-confirms-dart-mission-impact-changed-asteroid-s-motion-in-space</p> <p>So far, so good.</p> <p>The strategy now for both ESA and NASA – as even mentioned in the ‘success PR’ of NASA above – is to stress the following:</p> <ul style="list-style-type: none"> • DART proved we could shift a body in the solar system

	<ul style="list-style-type: none"> • Hera will gather additional data that will enable us to prove that this is a <u>repeatable and predictable technique</u>. Very specifically, we need to know Dimorphos' precise mass and internal composition. Only Hera will tell us that (DART never had time...). <p>Even though DART is finished, the PI team + NASA and JHUAPL communication teams will in future work closely with the Hera PIs and with ESA communication on data analysis, etc. and on ensuring that the '1-, 2-punch' of DART + Hera is what provides us the valued-added scientific prize from 2 cooperative missions.</p> <p>Note that some of the scientists working on Hera also work on DART!</p> <p>c.f. Alan Fitzsimmons</p> <p>https://dart.jhuapl.edu/Team/</p> <p>https://www.heramission.space/team</p> <p>Yes, ESA and NASA did coordinate communication actions in case of DART failure, and will do so again in case of Hera failure.</p>
4	<p>Planetary defense is linked to the concept of risk because it concerns the safety and security of people, if we think about what happened in Chelyabinsk in 2013. How does communication happen when dealing with risk? How did the element of risk inform your communication strategy?</p> <p>The answer to the first question is very long and complex. One very important factor is: When communicating to general public about natural disasters, space debris, space weather or planetary defence – all with risk inherently part of the mix and messaging – communicators must avoid too many numbers, mathematical formulations or percentages and make artful use of metaphors and comparisons to explain what risk means to the average person. If competent media are present, it is fine to provide raw numbers to them, knowing full well that they are also capable of explain what these risks mean to the average person.</p> <p>In this regards, we do foresee within the Hera communication effort hosting workshops specifically for non-specialist journalists to explain in detail what risks for planetary defence mean and how they are calculated.</p> <p>The element of risk informs all aspects of communication about planetary defence, and we always think about how the public perceive risk. For example, one often asked question by media in Europe for DART was: Can the DART impact accidentally knock the asteroid onto a collision course with earth? (answer: No, not at all)</p> <p>This is the best I can do for these questions – both are very complex to answer and there is a ton of risk communication studies available online.</p>

5	<p>For the moment, we have talked about communication, but not to who is the target audience. It is well known that such important issues need to be shared with society, both in terms of scientific research and in terms of investment, also in view of future implications.</p> <p>Is there a predefined target audience?</p> <p>Yes; for ESA Corporate Communication as well as for the mission-, programme- or Directorate-specific communication teams at ESA.</p> <p>If so, which one?</p> <p>For ESA Corporate Communication:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ General public in each ESA Member State ■ General public in countries where ESA has a specific, significant presence or connection e.g. Australia and Argentina, ISS Member states, EU member states, etc. ■ Non-specialist, mass media (esp TV) in any of these countries ■ Decision makers via the general public in any of these countries ■ Internal workforce of ESA ■ Significant professional networks across Member States, e.g. IAF, UNOOSA, etc. <p>For the mission-, programme- or Directorate-specific communication teams at ESA:</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Scientific, academic, industrial, institutional audiences in any of the countries mentioned above, as well as worldwide, for scientific data/information <input type="checkbox"/> Top-level decision makers, politicians, VVIPS, etc. <p>How do you choose your target audience?</p> <p>Our Director General tells us who to target.</p> <p>And how did you / will you make sure to reach this particular target audience?</p> <p>By:</p> <ul style="list-style-type: none"> ❖ Building our own channels that reach across these audiences ❖ By tailoring our messaging and content to be attractive to these respective audiences/matched to the channels. ❖ By selecting which topics we communicate to which audience ❖ By carefully timing when we communicate, paying attention to the external news cycle, world events, activities of our partners, etc. ❖ By communicating not only in EN but also in the significant/major Member State languages. ❖ By paying attention to what our audiences tell us (not only via analytics but also via direct feedback and comments vis, e.g. social media).
---	--

BIBLIOGRAFIA

- Binzel R., *The Torino Impact Hazard Scale*. Planetary and Space Science, Vol. 48, p. 297-303, 2000.
- Binzel R. et al. *Physical Properties of Near-Earth Objects*. University of Arizona Press, Asteroids III, p.255–271, 2002.
- Bodmer W., Royal Society's report *Public Understanding of Science*, 1985.
- Brown M. B., *Science in Democracy: Expertise, Institutions, and Representation*, Cambridge, MA: MIT Press, 2009.
- Bucchi M., *Scienza e società*, Raffaello Cortina Editore, 2010.
- Bucchi M., *Beyond Technocracy - Science, Politics and Citizens*, Springer, 2010.
- Bush Vannevar, *The endless frontier, report to the president on a program for postwar scientific research*, Princeton Univ Pr., 1945.
- Carnelli I. *The Hera Mission Study*. ESA, 11/10/2017.
- Castelfranchi Y., Pitrelli N., *Come si comunica la scienza?*, Edizioni Laterza, 2007.
- Commissione Europea, *Piano d'azione Scienza e Società*, 2002 COM(2001) 714 del 4/12/2001.
- Commissione Europea, *Scienza, società e cittadini in Europa*, <http://ec.europa.eu/research/area/pdf/science-society-it.pdf>, 2000 SEC(2000) 1973 del 14/11/2000
- Commissione Europea, *Making the Most of Your H2020 Project. Boosting the impact of your project through effective communication, dissemination and exploitation*, European IPR Helpdesk, 2018.
- Commissione Europea, *Communication from the commission to the european parliament, the council, the european economic and social committee and the committee of the regions - Space Strategies for Europe*, 2016.

- Davies S.R., Horst M., *Science Communication, Culture, Identity and Citizenship*, Palgrave McMillan, 2016.
- Cellino A., Tedesco E.F. e Zappalà V., *Near-Earth objects: Origins and need of physical characterization*, p.1965-1974 in *Meteoritics & Planetary Science* 37, 2002.
- Cheng, Andrew F., *Implications of the NEAR mission for internal structure of Mathilde and Eros*, *Advances in Space Research*, Vol. 33, Issue 9, p. 1558-1563, 2003.
- Cheng, Andrew F.; Rivkin, Andrew S.; Michel, Patrick; Atchison, Justin; Barnouin, Olivier; Benner, Lance; Chabot, Nancy L.; Ernst, Carolyn; Fahnestock, Eugene G.; Kueppers, Michael; Pravec, Petr; Rainey, Emma; Richardson, Derek C.; Stickle, Angela M.; Thomas, Cristina, *AIDA DART asteroid deflection test: Planetary defense and science objectives*, *Planetary and Space Science*, Vol. 157, p. 104-115, 2018.
- Cheng, A. F.; Michel, P.; Jutzi, M.; Rivkin, A. S.; Stickle, A.; Barnouin, O.; Ernst, C.; Atchison, J.; Pravec, P.; Richardson, D. C.; *AIDA Team, Asteroid Impact & Deflection Assessment mission: Kinetic impactor*, *Planetary and Space Science*, Vol. 121, p. 27-35, 2016.
- Cheng A. F., Stickle A. M., Fahnestock E. G., Dotto E., Della Corte V., Chabot N. L, and Rivkin A. S., *Dart mission determination of momentum transfer: Model of ejecta plume observations*, *Icarus*, Vol. 352, p. 113989, 2020.
- Chourey S., *The Asteroid Impact Threat- cost of damages and benefit of mitigation: Regolith Impact Testing Activity*, Master thesis, No. 220 ESA-SSA-NEO-RP-0185, Università di Monaco, 2017.
- Drigani F., *Communicating Space Exploration*, Springer, 2020.
- Encot Team, *Encot: The European network of science communication teachers*, *Public Understanding of Science*, Vol. 12, pag. 167-181, 2003.
- Granvik et al., *Frequency of Close Earth Approaches by Near-Earth Objects*, *Icarus*, Vol. 312, p. 181–207, 2018.

- Granvik et al. *OpenOrb: Open-source asteroid orbit computation software including statistical ranging*, *Meteoritics & Planetary Science*, Vol. 12, p. 1853-1861, 2009.
- Greco P., *Science and Society of knowledge*, JCOM Journal of Science Communication, 2007
- Greco P., Pitrelli N., *Scienza e media ai tempi della globalizzazione*, Codice Edizioni, 2009.
- Greco P., *I nipoti di Galileo*, Dalai Editore, 2011.
- Hall J.K., Kahan M. D., Scheufele D. A., *The Oxford Handbook of the Science of Science Communication*, 2017.
- Heck A., Madsen C., *Astronomy communications*, *Astrophysics and Space Science Library*, 2003.
- Macleod R., *Science and Democracy: Historical Reflections on Present Discontents*, *Minerva* 35.4, p. 369–384, 1997.
- Merton, R. K., *The Normative Structure of Science*, in Merton, *The Sociology of Science*, University of Chicago Press, 1973
- Michel P., Kueppers M., Sierks H., Carnelli I., Cheng A. F., Mellab K., Granvik M., Kestila A, Kohout T., Muinonen K., Nasila A., Penttila A., Tikka T., Tortora P., Ciarletti P, Hérique A., Murdoch N., Asphaug E., Rivkin A., Barnouin O., Bagatin A. C., Pravec P., Richardson D. C., Schwartz S. R., Tsiganis K., Ulamec S., Karatekin O., *European component of the aida mission to a binary asteroid: Characterization and interpretation of the impact of the dart mission*, *Past, Present and Future of Small Body Science and Exploration*, *Advances in Space Research*, Vol. 62, no. 8, pp. 2261-2272, 2018.
- Mignone C., Baldwin E., O’Flaherty K., Homfeld A., Bauer M., McCaughrean M., Marcu S., Palazzari C., *How a Cartoon Series Helped the Public Care about Rosetta and Philae*, *CAPJournal*, IAU, 19, 12, 2016.
- Morbidelli et al. *Origin and Evolution of Near-Earth Objects*, University of Arizona Press, Tucson, p. 409-422, 2002.

- Park, J., Turrin, B. D., Herzog, G.F., Lindsay, F. N., Delaney, J. S., Swisher, C., Uesugi, M., Karouji, Y., Yada, T., Abe, M., Okada, T., Ishibashi, Y., *40Ar/39Ar age of material returned from asteroid 25143 Itokawa*, Meteoritics & Planetary Science, Vol. 50, Issue 12, p. 2087-2098, 2015.
- Perna D., Barucci M. A., Fulchignoni M., *The near-Earth objects and their potential threat to our planet*, The Astronomy and Astrophysics Review, Vol. 21, 2013.
- Pielke R. Jr, *In Retrospect: Science - The Endless Frontier*, Nature, 2010.
- Roeland J. in't Veld (Editor), *Knowledge Democracy - Consequences for Science, Politics and Media*, Springer, 2010.
- Rumpf C. M., Mathias D. L., Wheeler L. F., Dotson J. L., Barbee B., Roa J., Chodas P., Farnocchia D., *Deflection driven evolution of asteroid impact risk under large uncertainties*, Acta Astronautica, Vol. 176, pp. 276-286, 2020.
- Sanchez-Lozano J., Fernandez-Martinez M., Saucedo-Fernandez A., Trigo-Rodriguez J. M., *Evaluation of nea deflection techniques. a fuzzy multi-criteria decision making analysis for planetary defense*, Acta Astronautica, Vol. 176, pp. 383-397, 2020.
- Schweickart, R., Chapman, C. Durda, D., Hut, P., *Threat Mitigation: The Gravity Tractor*, 2006.
- Spiga R., *Strategie di comunicazione e mass-media nelle agenzie spaziali. Il caso della missione Futura*, Tesi di Master I liv., Università degli Studi di Ferrara, 2016.
- Thiry N., Vasile M., *Statistical multi-criteria evaluation of non-nuclear asteroid detection methods*, Acta Astronautica, Vol. 140, p. 293-307, 2017.
- Tholen D.J., *Asteroid taxonomy from cluster analysis of photometry*, PhD thesis, University of Arizona, Tucson, 1984.
- Vokrouhlický et al., *The Yarkovsky and YORP Effects*, Asteroids IV, University of Arizona Press, p. 509-531, 2015.

- Walsh K., *Rubble Pile Asteroids*, Annual Review of Astronomy and Astrophysics, Vol. 56, p. 593-624, 2018.
- Wheeler, L.F., Donovan L., *Probabilistic assessment of Tunguska-scale asteroid impacts*, Icarus, Vol. 327, p. 83-96, 2019.
- Yeomans D.K., *Near-Earth Objects. Finding Them Before They Find Us*, Princeton University Press, Princeton, New Jersey, USA, 2013.
- Ziman J., *Post-academic science: constructing knowledge with networks and norms*, Science & technology studies, 1996.
- National Research Council, *Defending Planet Earth: Near-Earth-Object Surveys and Hazard Mitigation Strategies*, Washington, DC: The National Academies Press, 2010.

RINGRAZIAMENTI

Il primo ringraziamento va alla squadra di lavoro. In primis alla mia relatrice, la prof.ssa Monica Lazzarin, per aver creduto in questa tesi "visionaria" e averla resa possibile.

Un ringraziamento va alle mie due correlatrici, alla dott.ssa Rossella Spiga per avermi guidato nei meandri della parte comunicativa ed avermi accompagnato in questo bel viaggio e alla dott.ssa Fiorangela La Forgia per tutte le dritte e i consigli. I loro preziosissimi suggerimenti e la loro attenzione nei dettagli, unita al lato umano, ha reso questo faticoso lavoro un po' più leggero.

Un sentito ringraziamento va alla disponibilità del dr. Daniel Scuka, dell'Agenzia Spaziale Europea, per avermi offerto il suo prezioso tempo alla realizzazione delle interviste.

Voglio poi ringraziare la mia famiglia, mamma e papà, mio fratello, le zie, per esserci stati in questo mio "lungo viaggio". Lontani, ma sempre vicini.

Ringrazio tutte le persone, vecchi e nuovi amici, vecchie e nuove conoscenze, che in questi lunghi anni padovani mi hanno fatto dono della loro amicizia...

