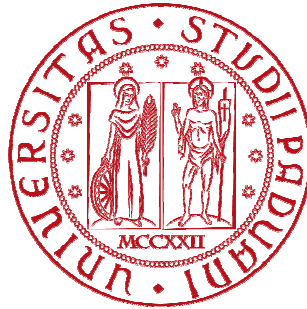


Università degli Studi di Padova
Dipartimento di Fisica e Astronomia “G. Galilei”

Corso di Laurea Triennale in
Astronomia



NEAR EARTH OBJECTS ED IL RISCHIO DA IMPATTO

Relatore: Prof.ssa Monica Lazzarin

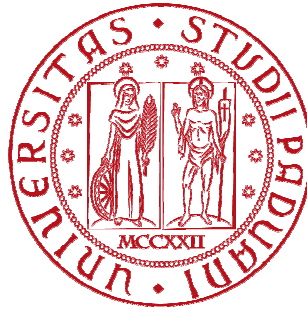
Laureanda: Maria Mosca

Matricola: 512516-SA

Anno Accademico 2014-2015

Università degli Studi di Padova
Dipartimento di Fisica e Astronomia “G. Galilei”

Corso di Laurea Triennale in
Astronomia



NEAR EARTH OBJECTS ED IL RISCHIO DA IMPATTO

Relatore: Prof.ssa Monica Lazzarin

Laureanda: Maria Mosca

Matricola: 512516-SA

Anno Accademico 2014-2015

“Spazio, ultima frontiera.

Questi sono i viaggi della nave stellare Enterprise.

La sua missione è quella di esplorare strani nuovi mondi, alla ricerca di nuove forme di vita e di nuove civiltà, per arrivare là dove nessuno è mai giunto prima.”

Capitano Jean-Luc Picard , Star Trek - The Next Generation

A Gabriele

A Francesco

INDICE

Introduzione	i
1 Il Sistema Solare	1
1.1 Formazione ed evoluzione del Sistema Solare	1
1.2 Struttura attuale e popolazione	4
1.3 Asteroidi	12
1.3.1 Localizzazione e caratteristiche	12
1.3.2 Composizione chimica e classi tassonomiche	15
1.3.3 Evoluzioni dinamiche	17
1.3.4 Le “famiglie dinamiche”	20
2 Near Earth Objects	22
2.1 Definizioni e caratteristiche dei NEO	22
2.1.1 Origine dei NEO	23
2.1.2 Popolazione costante: meccanismi di rifornimento	24
2.1.3 La popolazione	26
2.2 Evoluzione orbitale e probabilità di collisione	28
2.1.1 Amplificazione di incertezze	29
2.1.2 Incroci di orbite e PHA	30
2.1.3 Frequenza di collisioni ed effetti	31
2.1.4 Cenni su due grandi impatti del passato	36
3 Monitoraggio da Terra e missioni spaziali	39
3.1 Programmi di monitoraggio e controllo	39
3.1.1 Il Near Earth Object Program della NASA	40
3.1.2 Il NEO Coordination Centre dell’ESA	45
3.2 Missioni spaziali verso asteroidi	51
Conclusioni	59
Bibliografia	63

INTRODUZIONE

Con il termine *Near Earth Objects* (letteralmente: oggetti vicini alla Terra), abbreviato in *NEO*, viene indicata quella popolazione di corpi minori che orbitano intorno al Sole su traiettorie tali da poter incrociare l'orbita terrestre e, quindi, rappresentare un concreto rischio di collisione con il nostro pianeta. Tale popolazione è composta principalmente da asteroidi (nel qual caso ci riferiremo ai *NEA – Near Earth Asteroid*) e, in misura minore, da comete (denominati *NEC – Near Earth Comet*). Gli asteroidi e le comete hanno origini molto diverse, a causa delle diverse regioni del Sistema Solare nelle quali si sono formati e le loro caratteristiche fisiche e dinamiche conservano ancora la memoria di questa differenza. Lo studio di tali oggetti riveste una duplice importanza e tale da giustificare gli sforzi scientifici ed economici che hanno caratterizzato l'aumento di investimenti nel campo della ricerca e dell'osservazione di questi corpi minori negli ultimi anni. Si tratta di oggetti particolarmente interessanti fondamentalmente per due motivi:

1. lo studio dei corpi minori, in generale, ci permette di risalire all'origine del Sistema Solare e ci permette anche di valutare la composizione originaria della *nebula pre-solare* dalla quale ha avuto origine;
2. ad oggi, una parte della popolazione dei *NEO* può considerarsi potenzialmente pericolosa per la Terra dal punto di vista di eventuali impatti; vogliamo, quindi, studiare le possibili future interazioni con il nostro pianeta.

Prima di addentrarci nello studio dei *NEO* dovremo necessariamente fare alcuni cenni riguardo la formazione e l'evoluzione del Sistema Solare, in modo da meglio comprendere quali siano le differenze essenziali fra i diversi corpi minori. A questo argomento verrà dedicato il primo capitolo della Tesi. Infatti il Sistema Solare è

composto da un grandissimo numero di oggetti con una grande varietà di dimensioni, a partire da quelli più piccoli (addirittura microscopici!) come le particelle elementari, gli atomi o i granelli di polvere (che formano il mezzo interplanetario), passando per le rocce di pochi metri o di parecchi chilometri di diametro, che costituiscono gli asteroidi, fino ai pianeti nani, i pianeti ed il Sole stesso. L'affinamento delle tecniche osservative, l'avanzamento tecnologico degli strumenti scientifici e l'utilizzo di sonde che sono riuscite a raggiungere alcuni corpi del Sistema Solare, nonché l'uso di telescopi posti in orbita al di fuori dell'atmosfera terrestre (che pone forti limiti alle osservazioni da Terra) hanno permesso di ampliare le nostre conoscenze del Sistema Solare fino al punto di permetterci di ridisegnare il quadro generale della sua struttura. Fino a poco tempo fa si pensava che il Sistema Solare fosse composto dal Sole, da nove pianeti che, con i loro satelliti, vi orbitano intorno, più una serie di "corpi minori" che comprendevano asteroidi e comete. Si pensava che Plutone fosse l'ultimo di questi nove pianeti (il più distante dal Sole) e che la sua orbita rappresentasse il confine estremo del Sistema Solare. Oggi, invece, sappiamo che Plutone, oltre ad essere stato riclassificato come pianeta nano (dalla XXVI Assemblea Generale dell'International Astronomical Union – IAU) è solo uno dei componenti maggiori di una vasta popolazione di oggetti che orbitano intorno al Sole al di là dell'orbita di Nettuno. Tutti i corpi del Sistema Solare sono stati soggetti, fin dalle prime fasi della loro formazione, ad impatti più o meno catastrofici con oggetti "vaganti". Molti di loro portano ancora oggi i segni di tali impatti sulle loro superfici (basti pensare al sistema di crateri che si possono osservare sul nostro satellite o su Marte, ma anche su alcuni asteroidi). Le collisioni fra corpi celesti non sono una realtà da relegare al passato del Sistema Solare, ma si tratta di eventi ancora oggi molto probabili e, in alcuni casi, prevedibili ed osservabili (come dimenticare la spettacolare caduta della cometa Shoemaker-Levy 9 su Giove tra il 16 ed il 22 luglio del 1994?). La Terra stessa è oggetto di un bombardamento continuo dallo spazio di materiale che può andare dalle dimensioni di particelle minuscole, che non danno luogo ad alcun fenomeno visibile, fino a vere e proprie rocce, a volte di dimensioni non trascurabili. Si calcola che la massa complessiva del materiale interplanetario che giornalmente entra nella nostra atmosfera ammonti a oltre 100 tonnellate. Dopo una panoramica generale sui corpi che popolano il Sistema Solare e le dinamiche che regolano i loro moti, concentreremo la nostra attenzione sugli asteroidi. Infatti, oltre il 99% dei *NEO* oggi conosciuti sono di natura asteroidale, vale a dire sono veri e propri asteroidi o frammenti di asteroidi che hanno acquisito, nel tempo, orbite tali da portarli in prossimità della Terra. Nel secondo capitolo andremo a definire in maniera più precisa cosa si intende per *NEO* e le caratteristiche

fisiche, chimiche e dinamiche che possiamo aspettarci di osservare in questo grande gruppo di corpi minori. Vedremo come, negli ultimi anni, la nostra capacità di individuare asteroidi di dimensioni sempre più contenute e di seguirne l'evoluzione orbitale nel tempo è notevolmente aumentata grazie agli strumenti che abbiamo a disposizione. Tutt'altro problema, invece, risulterà essere la nostra capacità di poter prevedere l'evoluzione futura delle traiettorie degli asteroidi. Infatti i *NEO*, come vedremo, sono soggetti ad una serie di perturbazioni tali da non poterci permettere di effettuare calcoli realistici su scale di tempi medio-lunghe. Questo non significa che dobbiamo aspettarci, da un momento all'altro, un terribile impatto con un asteroide e che non potremo far altro che assistere impotenti all'evento: vedremo, nell'ultimo capitolo, come, a partire dalla scoperta del primo asteroide, avvenuta poco più di due secoli fa, le osservazioni finalizzate a riconoscere, seguire e calcolare l'orbita di questi piccoli corpi si siano moltiplicate su scala mondiale, costruendo anche reti informatiche che permettono di condividere in tempo reale tutte le informazioni ricavate dalle osservazioni. Da ultimo, vedremo come la tecnologia abbia permesso di studiare gli asteroidi in modo estremamente ravvicinato con l'ausilio di sonde lanciate a partire dalla fine del secolo scorso da agenzie spaziali di diversi Stati.

CAPITOLO 1

IL SISTEMA SOLARE

1.1 Formazione ed evoluzione del Sistema Solare

Attraverso l'analisi delle meteoriti più primitive possiamo stimare l'età del Sistema Solare in circa quattro miliardi e mezzo di anni. E' interessante notare come le rocce più antiche non siano state trovate sul nostro pianeta o sulla Luna: infatti corpi così massicci non sono campioni primitivi della materia esistente all'epoca della formazione dei pianeti perché, nel corso della loro storia, hanno sperimentato importanti fenomeni di evoluzione geologica. In particolare, la materia solida che forma i pianeti terrestri ha subito processi di fusione completa e di successiva risolidificazione, che ha causato un riprocessamento dei minerali presenti, con la conseguenza che le proprietà del materiale originario sono andate completamente perdute. Campioni intatti di materiale primitivo, invece, possono essere ancora trovati nella popolazione dei corpi minori, asteroidi e comete, i quali, a causa delle loro piccole dimensioni e masse (nel caso delle comete, per la loro prolungata permanenza a grandi distanze dal Sole), non hanno subito apprezzabili fenomeni di evoluzione geologica. Da questi corpi minori hanno origine alcuni dei meteoriti la cui età, determinata in base a misurazioni del contenuto di isotopi di elementi creati in processi di decadimento radiattivo spontaneo, risulta essere di circa 4,6 miliardi di anni. Secondo le teorie più accreditate, il Sistema Solare si è formato dalla contrazione e condensazione di una grande nube di gas e polveri. Inizialmente, tale *nebulosa presolare* faceva parte, probabilmente, di una nube molto più grande, da cui si è a poco a poco separata a causa della propria stessa auto-gravitazione. In questo modo le sue dimensioni si sono progressivamente ridotte e la sua densità è aumentata, tendendo a concentrarsi in una piccola zona di forma pressoché sferica. A mano a mano che la densità aumentava, l'attrazione gravitazionale, sempre più

intensa, accelerava la velocità del collasso fino a quando un'altra forza è entrata in gioco a controbilanciare la gravità: la forza centrifuga. Sappiamo, infatti, che un sistema isolato mantiene invariato il suo momento angolare totale e che, per un sistema composto da più particelle, il momento totale è dato dalla somma dei momenti angolari delle singole particelle. La conseguenza diretta è che se una massa in rotazione si contrae, la sua velocità di rotazione deve necessariamente aumentare¹. La *nebulosa presolare* possedeva una debole rotazione iniziale che è andata progressivamente crescendo nel corso del collasso fino a che la velocità angolare delle regioni periferiche è diventata così elevata da controbilanciare l'attrazione gravitazionale, arrestando localmente il moto di contrazione. In questo modo la *nebulosa presolare*, inizialmente di forma irregolare, ha assunto nel tempo una struttura a disco formata da materiale in rotazione (polvere e gas) in equilibrio dinamico tra forza centrifuga e forza gravitazionale. Da tale disco si sono formate particelle solide di dimensioni crescenti che, collidendo tra di loro a bassa velocità, hanno dato origine ad una popolazione di *planetesimi* di dimensioni via via maggiori. Gli urti a velocità molto basse favorivano infatti l'adesione delle particelle tra di loro e la formazione di oggetti più grandi mediante un processo di aggregazione. La formazione dei *planetesimi* è avvenuta in un arco di tempo piuttosto breve (alcuni milioni di anni) dall'inizio del collasso. La composizione chimica della *nebulosa presolare* rispecchiava quella media del materiale galattico: gli elementi di gran lunga predominanti erano i gas leggeri, soprattutto l'idrogeno (64,0%) e l'elio (33,9%) mentre gli elementi più pesanti rappresentavano la percentuale rimanente (ossigeno 1,0%, carbonio 0,40%, ferro 0,22%, neon 0,17% ecc ecc). Inizialmente la composizione chimica del *protodisco* era pressoché omogenea, ma l'accensione delle reazioni termonucleari all'interno del *protosole* generarono un forte gradiente di temperatura e quindi una variazione di condizioni chimico-fisiche. Nella parte più interna del disco, vicino al Sole (quindi più calda) gli elementi più leggeri rimasero allo stato gassoso così che i *planetesimi* che si stavano formando erano costituiti da elementi pesanti (carbonio, ferro e silicio). Man mano che la distanza dal centro aumentava, la minore temperatura permetteva la condensazione di composti più leggeri (metano, ammoniaca e azoto). Questa differenza di composizione chimica si è conservata anche durante la formazione dei pianeti dall'aggregazione dei *planetesimi*: infatti possiamo ben distinguere i quattro pianeti interni di tipo terrestre

¹ Nel caso di una singola particella in rotazione attorno ad un centro il momento angolare è dato dal prodotto mvr dove m è la massa della particella, r è la sua distanza dal centro e v è la sua velocità di rotazione (o meglio, la componente di velocità trasversale rispetto alla direzione del centro). Se la distanza r dal centro diminuisce (nel caso di una massa che si contrae) allora la velocità v deve aumentare, in modo tale che il loro prodotto rimanga mediamente invariato.

ed i quattro pianeti esterni di tipo gassoso. Inoltre, i *planetesimi* della zona esterna avevano a disposizione una quantità maggiore di materiale per accrescersi: questo spiega perché i pianeti esterni hanno masse molto maggiori rispetto a quelli di tipo terrestre. Quando i *planetesimi*, nel loro processo di crescita, raggiunsero dimensione dell'ordine di alcuni chilometri, la loro massa divenne abbastanza grande da esercitare una sensibile attrazione gravitazionale reciproca; l'attrazione gravitazionale accelerò fortemente la velocità di aggregazione ed innescò una sorta di processo di selezione naturale: infatti i *planetesimi* più massicci erano in grado di attirare materiale da distanze più grandi e quindi crebbero a velocità maggiore rispetto a quelli più piccoli. Le ultime fasi della formazione planetaria videro la presenza di pochi corpi massicci, gli *embrioni planetari*, che nel loro moto orbitale spazzavano la zona in cui erano localizzati, incorporando i *planetesimi* ivi presenti o perturbandone gravitazionalmente altri, modificando le loro orbite. In queste condizioni le collisioni reciproche tra i *planetesimi* cessarono di essere costruttive e divennero distruttive. La conseguenza fu che i pianeti maggiori subirono impatti di violenza tale da fonderne la superficie originaria (le velocità di collisione erano di alcuni chilometri al secondo), mentre un grande numero di *planetesimi* di dimensioni considerevoli vagava ancora attraverso il sistema planetario in stato avanzato di formazione, con l'effetto di provocare nuovi ed impressionanti fenomeni di collisione.

Gli effetti più importanti di questa fase violenta della storia dei pianeti sono ancora visibili oggi: uno di questi effetti fu l'interruzione della crescita del pianeta che, forse, si stava formando nella zona occupata attualmente dalla Fascia Principale (o Fascia degli Asteroidi). In questa zona, che si trova tra Marte e Giove, il materiale presente non ebbe modo di completare il processo di accrescimento, a causa della presenza di Giove, e rimase suddiviso in un grande numero di oggetti. La maggior parte dei *planetesimi* presenti furono perturbati ed espulsi dalla zona, mentre una piccola percentuale di quanto rimaneva formò quella che è l'attuale popolazione asteroidale. Anche la formazione delle comete è da ricondurre alla fase iniziale della vita del Sistema Solare: infatti le loro orbite (seppure molto ellittiche) intorno al Sole sono una prova della loro appartenenza al nostro sistema. Si pensa che i frammenti di materia ghiacciata costituenti la Nube di Oort (per i dettagli vedere il prossimo paragrafo) siano il materiale residuo avanzato dalla formazione del Sole, dei pianeti e dei satelliti. Tali frammenti non si formarono direttamente in quella remota regione ma ben all'interno del Sistema Solare: da lì alcuni andarono ad incrementare le masse dei pianeti, altri vennero espulsi definitivamente dal sistema, a causa delle perturbazioni degli altri corpi, ed infine altri, benché allontanati dalle regioni di

formazione, sempre a causa delle perturbazioni, si spostarono fino alle regioni esterne continuando a sentire, seppure tenue, l'attrazione gravitazionale del Sole. Esiste anche un'altra regione che ha visto la nascita di nuclei cometari: la cintura di Kuiper: curiosamente, pare che gli oggetti attualmente appartenenti alla Nube di Oort, ben più lontana dal Sole, si siano formati più internamente al Sistema Solare rispetto a quelli appartenenti alla fascia di Kuiper. La spiegazione potrebbe stare nel fatto che la distanza di questi ultimi dai pianeti in formazione abbia attenuato fortemente le perturbazioni gravitazionali e, quindi, abbiano avuto maggiore probabilità di restare nella regione dove si sono formati.

Un'altra importante conseguenza delle fasi finali e violente della formazione dei pianeti fu, con tutta probabilità, la formazione della Luna, la quale, secondo le teorie più accreditate si formò da un gigantesco impatto subito dalla Terra con un oggetto delle dimensioni di Marte.

Il risultato finale di questa turbolenta fase della vita del Sistema Solare è che i pianeti superstiti si posizionarono su orbite abbastanza distanti tra loro in modo da non disturbarsi troppo reciprocamente: questo è il motivo per cui le orbite attuali dei pianeti ci appaiono abbastanza ordinate, di forma non troppo eccentrica e spaziate tra di loro con una certa regolarità (a tal proposito ricordiamo i vari tentativi di stabilire delle relazioni matematiche in grado di calcolare le distanze dei pianeti dal Sole, la più famosa delle quali è la *legge di Titius-Bode*²).

Nel prossimo paragrafo vedremo brevemente quali sono le forze che regolano i moti dei corpi nel Sistema Solare e come è distribuita la popolazione all'interno di esso.

1.2 Struttura attuale e popolazione

Alla luce di quanto detto riguardo la formazione e l'evoluzione del Sistema Solare, e grazie ai mezzi che oggi abbiamo a disposizione per le osservazioni, siamo in grado di proporre un modello di Sistema Solare molto più completo rispetto a quanto era possibile fare in passato e, in alcuni casi, anche rivoluzionario (basti pensare al

² Le orbite dei pianeti sembrano seguire una relazione matematica empirica, chiamata "legge di Titius-Bode": $d_n = 0,4 + 0,3 \cdot 2^n$ dove ad n vengono sostituiti, progressivamente, i valori $-\infty, 0, 1 \dots$ fino a 6. In tale modo la legge fornisce le distanze (in UA) dei pianeti dal Sole. Inoltre, seguendo tale progressione, vediamo che, a circa 2,8 UA dal Sole, dovrebbe trovarsi un pianeta. Proprio la sua ricerca ha tenuto occupati molti astronomi del passato.

“declassamento di Plutone” da pianeta ad una nuova famiglia di oggetti chiamati “*pianeti nani*”). Senza voler dare una descrizione eccessivamente dettagliata, è però il caso di illustrare brevemente quale sia la visione attuale della struttura del Sistema Solare in modo da poter meglio andare ad identificare le diverse popolazioni di corpi che ne fanno parte. Fino alla fine del secolo scorso si era portati a pensare che i pianeti occupassero orbite molto simili a quelle che avevano in origine; questa visione è andata cambiando in tempi recenti e si pensa che l’aspetto del Sistema Solare, alle sue origini, fosse molto diverso da quello attuale. Gli impatti tra corpi celesti, che sulla scala dei tempi della vita umana sono considerati eventi rari, sono in realtà considerati una parte essenziale dello sviluppo e dell’evoluzione del Sistema Solare. Oltre all’impatto da cui si ipotizza abbia avuto origine la nostra Luna, anche il sistema Plutone-Charonte si pensa derivi da un impatto tra oggetti della fascia più esterna del sistema. Risulta evidente che la struttura iniziale del Sistema Solare abbia subito, nel tempo, diverse modifiche proprio a causa di collisioni fra i corpi che lo popolavano. Dare una dimensione al Sistema Solare è piuttosto difficile ma possiamo immaginarla come una sfera irregolare. Tra un corpo celeste e l’altro lo spazio è occupato da pulviscolo, gas e particelle elementari, generalmente definiti come “mezzo interplanetario”. Il Sole è la fonte di energia termica del sistema e ne rappresenta il centro gravitazionale: si tratta di una stella della sequenza principale di classe spettrale G2V e la sua massa, da sola, rappresenta il 99,86% della massa totale presente nel sistema. Giove e Saturno, i due pianeti più massicci che orbitano intorno al Sole, costituiscono, insieme, più del 90% della massa restante. Gli oggetti che orbitano intorno al Sole giacciono su piani simili a quello dell’orbita terrestre (chiamata eclittica). I piani delle orbite dei pianeti sono molto vicini a quello dell’eclittica (cioè poco inclinati rispetto all’eclittica) ad eccezione di quelli delle comete e degli oggetti della fascia di Kuiper. Prima di vedere in dettaglio come si può schematicamente descrivere il Sistema Solare (o, per meglio dire, come lo si può suddividere in regioni con popolazioni diverse) è il caso di richiamare brevemente alcune nozioni relative all’orbita dei corpi intorno al Sole e le perturbazioni alle quali sono soggette in modo da poter meglio spiegare, più avanti, cosa si intende per risonanza di moto medio e per meglio comprendere le dinamiche che possono portare al verificarsi di incontri ravvicinati e collisioni. Come è noto, il moto orbitale è descritto dalle tre leggi di Keplero. Richiamiamole brevemente.

I legge: le orbite dei pianeti sono ellissi nelle quali il Sole occupa uno dei due fuochi. Questa legge implicitamente dice che, sebbene il moto orbitale avvenga nello spazio tridimensionale, esso è di fatto limitato su un piano ed è una curva chiusa. Il Sole non si trova nel centro geometrico dell'ellisse ma in uno dei due fuochi in modo tale che la distanza del pianeta dal Sole non è costante ma varia nel corso della sua rivoluzione. Il punto di minima distanza tra pianeta e Sole è chiamato *perielio* mentre quello di massima distanza è chiamato *afelio*. Le dimensioni dell'orbita sono specificate dal suo semiasse maggiore a (che equivale alla metà della lunghezza massima dell'ellisse).

II legge: la velocità areolare di un pianeta lungo la sua orbita è costante; in altre parole il raggio vettore percorre aree uguali in tempi uguali. Quindi la velocità angolare di un pianeta varia a seconda della sua posizione lungo l'orbita: se la distanza dal Sole diminuisce la velocità angolare aumenta.

III legge: i quadrati dei periodi di rivoluzione dei pianeti lungo le proprie orbite sono proporzionali ai cubi dei loro semiasse maggiori. Esprimendo i semiasse maggiori a in UA³ ed i periodi T in anni siderali (il tempo impiegato dalla Terra a compiere una rivoluzione completa attorno al Sole) la relazione si può scrivere come $T^2 = a^3$. In altre parole i pianeti più lontani dal Sole hanno periodi orbitali progressivamente crescenti.

Le tre leggi del moto orbitale appena richiamate furono scoperte da Johannes Kepler (1571-1630) su base puramente empirica. Successivamente Isaac Newton (1642-1727) dimostrò che queste leggi sono la diretta conseguenza della *legge di gravitazione universale*, da lui scoperta, secondo la quale tutti i corpi si attraggono con una forza che è direttamente proporzionale al prodotto delle loro masse ed inversamente proporzionale al quadrato della loro distanza reciproca. In pratica è possibile dimostrare che, se si considerano il Sole ed un pianeta come due corpi soggetti unicamente alla reciproca forza di attrazione newtoniana, allora il moto relativo del pianeta deve seguire le tre leggi di Keplero. In realtà, l'ambiente in cui la Terra e gli altri corpi del Sistema Solare si muovono è molto più complesso del sistema ideale a due corpi: anche trascurando le perturbazioni esterne (per esempio da parte di altre stelle) ogni pianeta è sottoposto, oltre che all'attrazione del Sole, anche a quella di tutti gli altri corpi che appartengono al Sistema Solare. Poiché i pianeti hanno masse molto piccole, rispetto al Sole, le leggi di Keplero rimangono valide in prima approssimazione.

³ Il valore del semiasse maggiore dell'orbita terrestre, che misura circa 150 milioni di chilometri, viene normalmente impiegato come unità di misura delle distanze nell'ambito del Sistema Solare ed è denominato Unità Astronomica (UA).

Una osservazione più accurata e protratta nel tempo permette di evidenziare alcune discrepanze rispetto al comportamento previsto dalle tre leggi. Tali discrepanze sono essenzialmente di due tipi: piccole oscillazioni periodiche del pianeta intorno alla sua posizione media Kepleriana, dovute al fatto che i pianeti perturbatori, nel corso della propria orbita, vengono a trovarsi in diverse posizioni attorno al corpo perturbato e perciò esercitano la loro attrazione alternativamente in varie direzioni (il risultato netto di tali perturbazioni, nel lungo periodo, è nullo, quindi le conseguenze possono essere sentite dal pianeta perturbato solo per periodi dell'ordine del periodo orbitale) ed un lento moto di rotazione dell'orbita del pianeta che in realtà è composto da un moto di rotazione della linea degli apsi e da un moto di precessione del piano orbitale attorno ad una direzione fissa nello spazio. Questi ultimi causano effetti molto lentamente, avendo periodi tipici dell'ordine di decine di migliaia di anni; per tale motivo questi effetti perturbativi vengono chiamati *secolari*.

I moti descritti sono comuni a tutti i corpi del Sistema Solare, siano essi pianeti, asteroidi o meteoroidi (frammenti rocciosi o metallici relativamente piccoli; le loro dimensioni variano fra quelle di un granello di sabbia a quelle di un masso, con massa compresa fra 10^{-9} e 10^7 kg). La loro caratteristica comune è quella di presentare una certa regolarità, in quanto consistono nella sovrapposizione di movimenti che, pur nella loro complessità, si ripetono ad intervalli regolari. L'immagine che otteniamo è quella di un Sistema Solare ordinato e stabile in cui le dimensioni e le forme delle orbite rimangono sostanzialmente immutate. La realtà è ben più complessa: lo studio delle forze e delle dinamiche in gioco hanno portato alla formulazione di quello che viene definito il "*moto caotico*". Nella terminologia della meccanica celeste con moto caotico si intende un moto il cui risultato finale è così sensibile a piccoli cambiamenti delle condizioni iniziali e delle forze che influenzano la traiettoria che la previsione dello stato del sistema in un futuro lontano diventa impossibile. Questo importantissimo argomento verrà ripreso ed approfondito più avanti, quando ci addentreremo nelle dinamiche che regolano i moti degli asteroidi. Per ora abbiamo solo voluto accennare alla complessità delle forze che regolano i moti dei vari corpi all'interno del Sistema Solare.

In modo molto schematico possiamo suddividere il Sistema Solare in diverse regioni, in ordine di distanza crescente dal Sole, all'interno delle quali possiamo identificare diverse categorie di popolazioni.

Sistema Solare interno: è indicato, generalmente, come la zona che va dal Sole alla fascia degli asteroidi e comprende quattro pianeti. Vale la pena richiamare la

definizione di “pianeta” indicata nella risoluzione dell’IAU (si veda la XXVI Assemblea Generale dell’International Astronomical Union, svoltasi a Praga nell’agosto del 2006 <http://www.iau.org/news/pressreleases/archive/year/2006/>). Si definisce “pianeta” un corpo celeste che:

- orbita intorno al Sole
- ha una massa sufficiente a conferirgli una propria gravità tale da vincere le forze di corpo rigido
- che abbia “ripulito” le regioni dello spazio interplanetario nelle vicinanze della propria orbita (in sostanza che svolga un ruolo “dominante” lungo la propria orbita e nelle vicinanze).

I quattro pianeti che appartengono a questa regione sono detti di tipo “terrestre” (sono composti da silicati nella crosta e da metalli nel nucleo) e le loro dimensioni sono più contenute rispetto a quelle dei pianeti esterni (si veda il primo paragrafo sulla formazione del Sistema Solare). Inoltre si può notare la densità relativamente alta (circa $5,39 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ per Mercurio, Venere e Terra, $3,94 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ per Marte) tipica proprio dei corpi solidi rocciosi, e la scarsa presenza di satelliti naturali (solo la Terra e Marte ne hanno rispettivamente uno e due), l’assenza di anelli e la presenza di atmosfere prevalentemente composte da anidride carbonica (Venere e Marte) o azoto ed ossigeno (Terra).

Fascia degli Asteroidi o Fascia Principale (Main Belt): tra le orbite di Marte e Giove, ad una distanza compresa tra 2 e 3,3 UA dal Sole, si trova una regione formata da una serie di oggetti di dimensioni piuttosto ridotte rispetto ai pianeti e che, probabilmente, sono il risultato della mancata formazione di un pianeta (forse causata dalla perturbazione di Giove). I corpi che appartengono a questa regione hanno composizione chimico-mineralogica piuttosto varia, essenzialmente di natura rocciosa (composti principalmente di rocce e metalli) ma anche di composti organici. La Fascia degli Asteroidi contiene decine di migliaia, forse milioni, di oggetti sopra il chilometro di diametro. Nonostante ciò, la massa totale di tutti gli asteroidi della Fascia Principale non arriva a più di un millesimo della massa della Terra. La Fascia Principale è scarsamente popolata: sonde spaziali passano continuamente attraverso di essa senza incorrere in incidenti di alcun tipo. Il rappresentante più famoso di questa popolazione è senz’altro 1 Cerere, che fu osservato per la prima volta il 1° gennaio del 1801 dall’astronomo Giuseppe Piazzi. Ad oggi viene classificato come pianeta nano, unico, per ora, a trovarsi nella fascia degli asteroidi. Il 6 marzo di quest’anno la sonda Dawn della NASA ha raggiunto Cerere, entrando in orbita intorno all’asteroide. A tutt’oggi la sonda risulta impegnata in una intensa

attività di mappatura del pianeta nano (vedi par. 3.1.2.). La popolazione asteroidale verrà approfondita nel prossimo paragrafo.

Regione dei pianeti esterni o giganti: Giove, Saturno, Urano e Nettuno sono caratterizzati, oltre che da una maggiore distanza dal Sole, da masse e dimensioni molto grandi, densità basse (circa $1,27 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$) tipiche di corpi prevalentemente gassosi, un alto numero di satelliti naturali ed atmosfere composte prevalentemente da idrogeno ed elio, gli elementi più volatili presenti in natura. Il numero di satelliti è ancora destinato ad aumentare dato che molti sono stati scoperti dalle sonde che sono passate nei pressi di questi pianeti.

Da quanto appena detto si può già intuire come Plutone rappresenti un caso molto particolare: nonostante si tratti di un pianeta esterno, le sue dimensioni sono esigue e le sue proprietà fisiche lo avvicinano ai pianeti interni. Inoltre Plutone è caratterizzato da una eccentricità orbitale molto pronunciata che lo porta a spingersi all'interno dell'orbita di Nettuno. Anche la presenza di un satellite di dimensioni non trascurabili non fa che aumentare le peculiarità di questo corpo celeste che nove anni fa lo ha portato ad essere protagonista di un acceso dibattito durante l'assemblea generale della IAU.

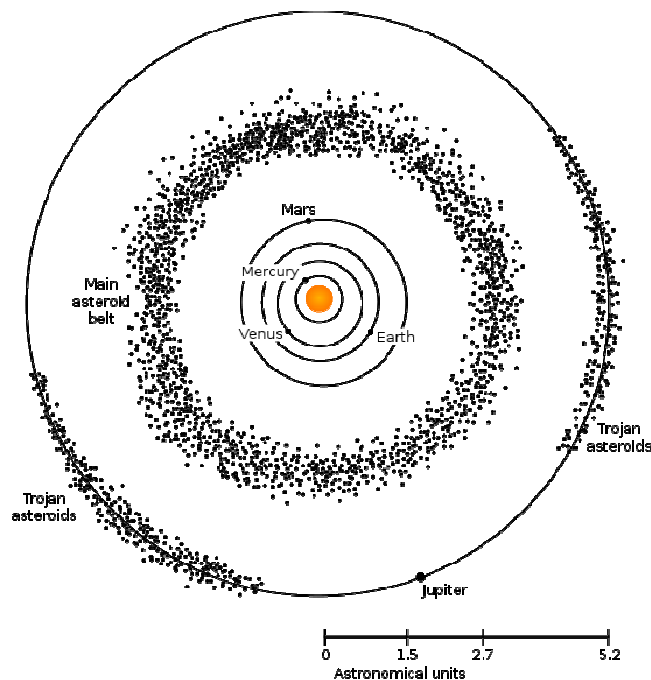


Figura 1.1: visione schematica delle orbite dei pianeti interni e di Giove con evidenziata la Fascia Principale o Fascia degli Asteroidi (main asteroid belt). Sono evidenziati anche i due gruppi di asteroidi troiani di Giove. (Immagine NASA).

La regione successiva, in termini di distanza, dopo quella dei pianeti giganti è la *Fascia di Edgeworth-Kuiper*: nel 1949 l'astronomo inglese Kenneth Essex Edgeworth (1880-1972) e nel 1951 l'astronomo olandese Gerard Pieter Kuiper (1905-1973) mettevano in evidenza, indipendentemente tra di loro, la possibilità che il disco di gas e polveri da cui si erano formati i pianeti non terminasse improvvisamente alla distanza dell'orbita di Nettuno, ma che poteva sfumare gradualmente verso lo spazio interstellare, e suggerirono che esistesse un numero significativo di piccoli corpi, resti del disco primordiale di *materia protoplanetaria*, in orbita intorno al Sole al di là della regione dei pianeti giganti. In questa remota periferia i tempi di accrescimento di un vero e proprio pianeta erano inevitabilmente troppo lunghi e, forse, il processo si è arrestato ad una fase embrionale simile a quello che è successo, ma per altri motivi, nella Fascia degli Asteroidi. Entrambi gli astronomi proposero che questa regione fosse il "serbatoio" delle comete di corto periodo (inferiore ai 200 anni) e suggerirono che Nettuno poteva perturbare le orbite di questi piccoli corpi provocandone l'espulsione verso le zone esterne (Nube di Oort) oppure l'entrata nel sistema solare interno in direzione dei pianeti terrestri. Le ipotesi di Edgeworth e Kuiper rimasero tali fino a che non si trovò un riscontro osservativo agli inizi degli anni novanta del secolo scorso.

La fascia di Edgeworth-Kuiper si estende a partire dall'orbita di Nettuno (30 UA) (il confine esterno non è ben definito). E' 20 volte più estesa della fascia degli asteroidi e molto più massiccia. Gli oggetti appartenenti a questa regione sono stati battezzati *Kuiper Belt Objects* (KBO) e, come già detto, Plutone ne è l'elemento più conosciuto. La maggior parte dei KBO, dai dati ricavati mediante la spettrofotometria, sono costituiti da ghiaccio e sembrano avere una composizione chimica simile a quella delle comete. Inoltre, proprio come nelle comete, è evidente la presenza di composti organici.

Prima di allontanarci ulteriormente dal Sole, verso i confini esterni del Sistema Solare, vorremmo soffermarci momentaneamente sulle comete. Si tratta di corpi caratteristici e spettacolari, grazie alla chioma e la lunga coda luminosa. Negli ultimi decenni, grazie soprattutto alle missioni spaziali, si è cominciato a delineare uno scenario abbastanza chiaro sulla loro origine ed evoluzione ed a comprendere i processi chimico-fisici che hanno luogo durante il loro passaggio in prossimità del Sole. Come tutti gli altri corpi del Sistema Solare, anche le comete sono soggette al campo gravitazionale del Sole. Tuttavia, a differenza dei pianeti, le cui orbite sono tutte ellittiche, le comete possono avere anche orbite iperboliche o paraboliche. Le orbite cometarie ellittiche sono, in generale, fortemente eccentriche, cioè presentano l'asse maggiore di gran lunga più grande dell'asse minore. Calcolare le orbite delle

comete non è semplice. Il loro moto, infatti, può essere perturbato dai pianeti maggiori ma anche dalle forze di reazione indotte dall'attività superficiale del nucleo, consistente nell'emissione di getti di vapore e polveri dovute alla sublimazione dei ghiacci che si verifica quando questi oggetti si avvicinano al Sole. La massa di una cometa è così piccola, rispetto a quella dei pianeti che, un incontro ravvicinato con uno di questi, può modificarne radicalmente l'orbita; questo può avvenire soprattutto con Giove, il quale può addirittura "catturare" la cometa, facendola entrare a far parte della famiglia che gli orbita intorno. Le orbite delle comete possono essere suddivise in tre diversi gruppi: comete a corto periodo (minori di 20 anni), comete a periodo intermedio (tra 20 e 200 anni), legate alla Fascia di Edgeworth e Kuiper, e comete a lungo periodo (maggiore di 200 anni) che risultano invece legate ad un'altra importantissima regione del Sistema Solare: la *Nube di Oort*. L'esistenza di questa lontanissima regione, localizzata oltre l'orbita di Plutone, ma che può ancora definirsi appartenente al Sistema Solare, fu ipotizzata dall'astronomo olandese Jan Hendrik Oort (1900-1992) agli inizi degli anni cinquanta. La sfera di influenza gravitazionale del Sole si estende per una distanza pari a circa tremila volte quella media che separa Plutone dalla nostra stella; la vita attiva delle comete è compresa tra qualche migliaia di anni ed alcune decine di migliaia di anni e, tuttavia, continuiamo a vederle ed ammirarle a distanza di miliardi di anni dalla formazione del Sistema Solare. Queste considerazioni hanno portato Oort ad ipotizzare l'esistenza di una qualche "riserva" di nuclei cometari che venivano di tanto in tanto iniettati nelle regioni interne del Sistema Solare. Oort giunse a questa conclusione esaminando la distribuzione dei semiassi maggiori di una ventina di comete; egli calcolò che nella nube dovevano esserci circa 200 miliardi di comete (valore attualmente più alto) la maggior parte delle quali localizzata ad una distanza compresa tra 10.000 e 100.000 UA.

Quello che però appare evidente è che tali nuclei cometari non possono essersi formati dove si trovano adesso perché, a queste distanze dal Sole, la materia della *nebulosa presolare* era troppo rarefatta per potersi condensare in corpi macroscopici. Secondo le più recenti teorie, confortate da complesse simulazioni numeriche, la maggior parte delle comete probabilmente ha avuto origine nella vasta regione compresa tra le orbite di Giove e Nettuno ed è poi stata espulsa dove adesso si trova dalle perturbazioni gravitazionali indotte dai pianeti giganti. Si pensa che la Nube di Oort contenga anche asteroidi provenienti dal sistema Solare interno: il loro numero potrebbe ammontare al 2-3% dell'intera popolazione asteroidale. La Nube potrebbe essere strutturata in due regioni distinte: una regione esterna di forma sferica ed una

regione interna appiattita che, con l'aumentare della distanza dal Sole, diventa più spessa sfumando nell'involuppo esterno.

Questa brevissima panoramica sulla struttura del Sistema Solare è stata necessaria per poter inquadrare la posizione delle diverse popolazioni di corpi celesti. Da questo momento fisseremo la nostra attenzione su una popolazione particolare: gli asteroidi. Prima vedremo le caratteristiche generali di questi corpi minori all'interno della regione dove si sono formati e poi studieremo i meccanismi che hanno portato alcuni di loro ad avvicinarsi alla Terra.

1.3 Asteroidi

Come già accennato, la scoperta e lo studio degli asteroidi è iniziata, di fatto, il 1° gennaio del 1801, quando Padre Giuseppe Piazzi, dall'osservatorio di Palermo, osservò per la prima volta Cerere convinto di aver trovato il famoso “pianeta mancante” (vedi la legge di Titius-Bode). Inizialmente le osservazioni sembravano confermare che si trattava effettivamente di un pianeta ma alcune sue caratteristiche non convincevano del tutto gli astronomi (a partire dalle dimensioni troppo ridotte). Come se non bastasse, negli anni successivi furono individuati altri corpi con caratteristiche simili: orbite molto vicine a Cerere, dimensioni ridotte e scarsa luminosità. Con l'affinarsi delle tecniche di osservazione le scoperte di questi corpi si moltiplicarono (aggiungendo anche il problema di come assegnare loro dei nomi univoci) fino a raggiungere, dopo circa due secoli di osservazione, una numero superiore a 350.000 oggetti⁴. I corpi con diametro maggiore di 200 km sono solo 26; gli altri hanno dimensioni inferiori. Questo pone il problema del limite inferiore alle dimensioni: anche le particelle di polvere interplanetaria potrebbero essere classificate come asteroidi. Risulta necessario, quindi, adottare una convenzione per poter dare una definizione univoca: definiremo asteroidi (o pianetini) i corpi con dimensioni di almeno una decina di metri e che possiedono orbite intorno al Sole non oltre quella di Giove.

1.3.1 Localizzazione e caratteristiche

La maggior parte degli asteroidi si trova all'interno della Fascia Principale, tra le orbite di Marte e Giove, ad una distanza dal Sole che va da 2 a 3,3 UA. Al di fuori di questa regione esistono vari gruppi, tra cui due grandi raggruppamenti di pianetini

⁴ Attualmente la raccolta dei dati di posizione osservati, il calcolo delle orbite e la catalogazione degli asteroidi che vengono scoperti sono affidati al *Minor Planet Center - MCP* presso l'osservatorio Astrofisico Smithsonian di Cambridge (USA).

che orbitano intorno al Sole alla stessa distanza di Giove: si tratta dei Troiani, posizionati esattamente in due punti dell'orbita di Giove chiamati "punti lagrangiani" (così chiamati in onore di Joseph-Louis Lagrange). Lagrange studiò approfonditamente il "problema dei tre corpi" (nel paragrafo precedente avevamo già accennato che il moto di un qualsiasi corpo all'interno del Sistema Solare è molto più complicato rispetto al semplice "problema dei due corpi", dove l'altro corpo è il Sole) in particolare riferito al caso di due oggetti massicci, come, per esempio, una stella ed un suo pianeta, ed un terzo oggetto di massa trascurabile, come, appunto, un asteroide. Egli riuscì a dimostrare analiticamente che esiste un certo numero di configurazioni stabili del sistema, in cui i tre corpi possono restare a tempo indefinito, in assenza di perturbazioni esterne. Due di tali posizioni sono quelle che formano, insieme al Sole ed al pianeta, un triangolo equilatero (quindi si tratta di due punti sull'orbita del pianeta stesso). I Troiani di Giove occupano, appunto, questi due punti, chiamati L4 ed L5. Come dicevamo, se pure questa famiglia di asteroidi sia molto interessante dal punto di vista dinamico, restano al di fuori del nostro campo di interesse perché non risultano avere orbite pericolosamente vicine a quella della Terra.

Ritorniamo agli asteroidi della Fascia Principale e vediamo alcune caratteristiche importanti. La loro distribuzione all'interno della fascia non è omogenea: osservando in termini di distanza dal Sole notiamo che alcune orbite, a determinate distanze, sembrano essere proibite, nel senso che non vi si trovano asteroidi conosciuti. Queste regioni vuote sono chiamate "lacune di Kirkwood" in onore di Daniel Kirkwood (1814-1895) che fu il primo a rendersi conto che queste lacune corrispondevano ad alcune importanti "risonanze" con Giove chiamate *risonanze di moto medio*. Tali "risonanze" non sono altro che zone dinamicamente instabili e, dal momento che risulteranno molto importanti per dare una spiegazione al fatto che la popolazione di oggetti vicini alla Terra (*NEO – Near Earth Object*) è rimasta pressoché invariata nel corso degli anni, verranno approfondite nel prossimo paragrafo, insieme ad altre cause che possono provocare questi ultimi effetti.

Un'altra interessante caratteristica è che, probabilmente, gli asteroidi, fin dall'inizio dell'evoluzione del Sistema Solare, hanno subito solo in parte, o anche per niente, quei processi che hanno cancellato i segni della storia primordiale nei corpi di dimensione più grande, come la Terra e gli altri pianeti. Il rapporto tra l'area superficiale ed il volume di oggetti di dimensione così ridotta ha fatto sì che la dispersione del calore interno sia stata molto rapida, per cui buona parte degli

asteroidi (vale a dire quelli che si trovano nella parte esterna della Fascia Principale) hanno mantenuto quasi inalterate le caratteristiche primordiali.

La caratteristica fisica più evidente in un asteroide è la sua dimensione. Il primo ad essere stato scoperto ed il più grande, Cerere, ha un diametro di circa 975 chilometri mentre il successivo in ordine di dimensione, Pallade, ha diametro di circa 570 km. Al diminuire delle dimensioni il numero di oggetti appartenenti al gruppo cresce rapidamente. Gli asteroidi di piccole dimensioni sono, probabilmente, frammenti di oggetti più grandi distrutti da collisioni catastrofiche. Fino a qualche decennio fa le uniche informazioni che potevamo ricavare riguardo alle dimensioni degli asteroidi erano quelle ottenute da Terra mediante diverse tecniche di misurazione: per esempio la tecnica radiometrica misurava simultaneamente la radiazione solare riflessa dagli asteroidi alle lunghezze d'onda del visibile e la radiazione termica che questi oggetti emettevano in funzione della loro temperatura. Infatti sia la quantità di radiazione riflessa sia la quantità di radiazione termica dipendono da due parametri: riflettività superficiale dell'oggetto (*albedo*⁵) e le sue dimensioni. Oggi, invece, possiamo godere di una serie di immagini forniteci dalle numerose sonde spaziali che sono state lanciate negli ultimi anni con lo scopo di raggiungere alcuni di questi oggetti per studiarli da vicino. La maggior parte degli asteroidi mostra una forma molto simile ad un ellissoide triassiale (i tre assi principali hanno lunghezze diverse tra loro).

Un'altra proprietà fisica importante è la densità: gli asteroidi sembrano essere molto porosi e meno densi rispetto ai meteoriti. Possiamo ipotizzare che, vista l'intensa attività collisionale di cui è stata protagonista la Fascia Principale, la maggior parte degli asteroidi con diametri inferiori ai 300 km siano stati disgregati da collisioni catastrofiche ed alcuni di essi si siano riaggregati per formare un corpo costituito da frammenti tenuti insieme dalla reciproca attrazione gravitazionale. In questi casi all'interno dei corpi sono presenti numerose fratture e vuoti con la conseguenza che la densità media risulti inferiore rispetto a quella del materiale che lo costituisce. Lo studio dei periodi di rotazione degli asteroidi su se stessi può aiutare a stimare la densità dei corpi: infatti la densità influenza il trasferimento di momento angolare quindi in media, per un certo intervallo di dimensioni, meno densi sono gli oggetti maggiore sarà il periodo di rotazione rispetto a quello dei corpi più densi.

⁵ L'*albedo* di una superficie è la frazione di luce o, più in generale, di radiazione incidente che viene riflessa in tutte le direzioni. Essa indica dunque il *potere riflettente* di una superficie.

1.3.2 *Composizione chimica e classi tassonomiche*

Le nostre conoscenze riguardo la composizione chimica degli asteroidi si basa su dati ottenuti da osservazioni spettroscopiche nel visibile e nell'infrarosso. In pratica possiamo studiare come si distribuisce, alle varie lunghezze d'onda, la luce solare riflessa dalla superficie di questi corpi. Ogni minerale (o meglio, gli atomi e le molecole che formano i minerali) interagisce in modo diverso con la luce in base alla sua composizione chimica: assorbe particolari lunghezze d'onda in maniera diversa dando così origine alle ben note bande di assorbimento. Studiare uno spettro di riflettanza significa studiare la distribuzione dell'intensità luminosa riflessa per i diversi colori. Non si tratta di uno studio semplice perché la presenza di molti materiali diversi potrebbe dar vita ad una serie di bande sovrapposte delle quali non si riesce a capire l'origine per cui è sempre necessario usare molta cautela nel definire la composizione chimica dell'oggetto che stiamo osservando. Gli spettri di riflettanza e l'albedo danno indicazioni riguardo la composizione superficiale degli asteroidi. Oggetti che possiedono caratteristiche spettrali ed albedo simili vengono raggruppati insieme in una classe indicata da una lettera. 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, ed il loro numero viene quindi sovrastimato. Le classi principali sono:

- *asteroidi di tipo C*. Rappresentano circa il 75% degli asteroidi conosciuti. La C sta per "carbonacei". Sono estremamente scuri (albedo 0.03-0.04) e caratterizzati da spettri in cui sono assenti le bande di assorbimento. Questi asteroidi sono formati da silicati e materiale carbonaceo. Una parte di essi mostra, inoltre, la presenza di alcune bande dovute all'alterazione acquosa e quindi materiali detti silicati idrati. I loro spettri sono molto piatti e tipicamente senza strutture evidenti.
- *asteroidi di tipo S*. Sono circa il 17% degli asteroidi conosciuti e dominano la regione interna della Fascia Principale. La S sta per "stony-roccioso". Sono oggetti relativamente luminosi (albedo da 0.10 a 0.22) ed hanno una composizione principalmente di silicati di nichel, ferro e magnesio. Lo spettro di questi asteroidi ha una forte componente rossa (sono caratterizzati da una profonda banda di assorbimento nell'ultravioletto) e presentano una forte banda di assorbimento ad 1 μm , dovuta all'olivina, e a 2 μm , dovuta al pirossene.
- *asteroidi di tipo M*. Questa classe comprende quasi tutti gli altri asteroidi. La M sta per "metallico". Sono asteroidi piuttosto brillanti (albedo 0,10-0,18),

sembrano fatti di nichel-ferro quasi puro. Essi sono numericamente i più rari e si pensa che siano i resti di antichi nuclei di corpi celesti che, al tempo della formazione del Sistema Solare, erano abbastanza grandi da generare il calore necessario per fondere il proprio materiale, facendo precipitare verso il centro quelli più pesanti e lasciando galleggiare i più leggeri, come rocce e silicati. Successivamente, raffreddandosi in minor tempo rispetto agli oggetti più grandi, non ebbero la possibilità di differenziarsi molto ed a causa delle frequenti collisioni che avvenivano in quel periodo i resti di alcuni di loro mostravano solamente il materiale metallico del nucleo.

- *Asteroidi di tipo D*: gli asteroidi appartenenti a questa classe sono tipici dei due gruppi di Troiani. Sono molto importanti perché i più primitivi e con più materiale organico, che conferisce loro uno spettro arrossato (più rosso rispetto alla classe C). Inoltre sono i tipi più simili alle comete tanto è vero che sembra esserci una continuità tra questi ed i nuclei cometari. All'interno di questa classe possiamo distinguere la sottoclasse degli asteroidi di tipo P: anch'essi con bassa albedo, sono predominanti nella regione compresa tra 3,6 e 4,9 UA dal Sole. Probabilmente rappresentano un gruppo di transizione tra i tipi C e D.

Esistono anche altri tipi di asteroidi, più rari:

- Asteroidi di tipo G, insieme alle classi B ed F sembrano essere una suddivisione degli asteroidi di tipo C, spettralmente distinte per le differenze nell'assorbimento nelle lunghezze d'onda più brevi. Il principale rappresentante di questa classe è l'asteroide Cerere.
- Asteroidi di tipo E - La E sta per enstatite. Raccoglie asteroidi di ridotte dimensioni che orbitano principalmente nella parte interna della Fascia principale e che probabilmente hanno avuto origine dal mantello di asteroidi di grandi dimensioni, distrutti in tempi remoti. La loro caratteristica maggiore è una albedo molto alta (circa 40%).
- Asteroidi di tipo V: sarebbero frammenti della crosta superficiale di Vesta, che è l'unico asteroide conosciuto ad avere una superficie formata da materiale basaltico. Ciò fa pensare che questo oggetto abbia una struttura differenziata, analoga a quella dei corpi planetari di maggiori dimensioni. Tali ipotesi sono rafforzate anche dalla presenza di un enorme cratere (circa 400 km di diametro) da impatto.

Le varie classi di asteroidi non sono distribuite in maniera uniforme nella Fascia Principale: il tipo S (con alcune sue sottoclassi) domina la parte interna, le classi C e P sono più abbondanti nella regione esterna, fino ad arrivare alla classe D, tipica dei

Troiani. Che significato ha questa distribuzione? Come abbiamo detto le differenze spettrali e di albedo tra le varie classi riflettono le differenze nella mineralogia, quindi ciò che stiamo in realtà distinguendo sono le diverse composizioni che caratterizzano le diverse zone della Fascia Principale. Ci possono essere diverse cause che hanno portato a differenziare, in composizione, gli asteroidi appartenenti alle diverse zone della Fascia Principale ma, riprendendo il modello di formazione del Sistema Solare, questa fascia sembra essere la zona di transizione tra le regioni interne (ricca di minerali a base di silicati) e le zone esterne (più ricche di composti carbonacei).

1.3.3 Evoluzioni dinamiche

Affrontiamo, adesso, la parte più tecnica e complicata dell'analisi delle popolazioni asteroidali, vale a dire le orbite e le forze che le governano e le perturbano. Nel secondo paragrafo abbiamo fatto cenno alle leggi che governano il moto orbitale di un corpo intorno al Sole, ponendo l'accento sul fatto che quella descrizione poteva essere valida in prima approssimazione trascurando tutta una serie di altre interazioni che, di fronte all'attrazione gravitazionale del Sole, sono trascurabili ma che sommate tutte insieme causano effetti di perturbazione, soprattutto sul moto degli asteroidi, che qui interessa.

Il moto caotico. Abbiamo già accennato alla differenza tra il moto regolare ed il cosiddetto “moto caotico” riservandoci di trattarlo in maniera più approfondita in un secondo momento. Proviamo a dare una valutazione oggettiva di quali e quanti possano essere gli effetti perturbativi sulle orbite degli asteroidi in modo da poter capire, nel prossimo capitolo, se la conoscenza di questi fenomeni può aiutarci o meno a prevedere (e con quanto anticipo) se siamo a rischio di collidere con uno di questi oggetti. Abbiamo già stabilito che la regolarità con cui i corpi celesti del Sistema Solare orbitano intorno al Sole è del tutto apparente e che solo negli ultimi decenni è stato introdotto il concetto di moto caotico. Abbiamo definito il moto caotico come un moto il cui risultato finale è così sensibile a piccoli cambiamenti delle condizioni iniziali e delle forze che influenzano la traiettoria, che la previsione dello stato del sistema in un futuro lontano diventa impossibile. In generale lo stato finale di un sistema dinamico è sempre dipendente dallo stato iniziale e dalle forze che agiscono sul sistema nel periodo che intercorre tra l'inizio e la fine del moto. Le posizioni e le velocità iniziali dei corpi celesti e l'espressione esatta delle forze a cui sono soggetti determinano esattamente l'evoluzione futura del sistema. Se cambiassimo lievemente le condizioni iniziali o i valori delle forze in gioco, l'evoluzione del sistema cambierebbe. La differenza tra il sistema iniziale e quello

variato tenderebbe ad aumentare nel tempo secondo un andamento che, in linea di principio, potrebbe essere prevedibile. Nel caso di moto caotico la divergenza tra orbite che partono da condizioni iniziali vicine avviene molto rapidamente, seguendo una legge esponenziale. Tale caoticità del moto ha una grande importanza per quanto riguarda la capacità di prevedere il moto di un oggetto. Le condizioni iniziali degli asteroidi sono conosciute attraverso misurazioni della loro posizione e quindi soggette ad una certa imprecisione. Anche il modello di forza è noto solo con un certo margine di errore. Quando l'orbita è "caotica" le imprecisioni provocano una amplificazione esponenziale dell'incertezza, cosicché si può asserire che non è possibile prevedere l'evoluzione orbitale degli asteroidi oltre un certo "orizzonte temporale". Nonostante l'evoluzione tecnologica ci abbia permesso di costruire strumenti sempre più precisi e sonde in grado di raggiungere gli asteroidi per poterli studiare da vicino e la matematica ci abbia fornito strumenti sempre più affidabili, l'incertezza dovuta alla estrema difficoltà di inserire in un unico modello tutti i parametri in gioco continua a rendere imprevedibile il moto di questi oggetti.

Le risonanze. L'insorgere del caos, come lo abbiamo definito pocanzi, è strettamente legato al fenomeno delle risonanze, delle quali abbiamo già accennato quando abbiamo parlato delle lacune di Kirkwood. Infatti gli asteroidi risentono fortemente della presenza dei pianeti, soprattutto di Giove, il quale produce effetti su alcune zone che diventano dinamicamente instabili. Tali instabilità sono causate dalla presenza di rapporti numerici semplici tra i periodi di rivoluzione o di precessione dei corpi celesti considerati. Ad esempio, se un asteroide si trova su un'orbita avente un semiasse maggiore pari a 0,62996 volte quello di Giove, per la III legge di Keplero il suo periodo orbitale sarà uguale a $\sqrt{0,62996^3} = 0,5$ volte quello di Giove. In altre parole nell'intervallo di tempo in cui Giove esegue un giro completo intorno al Sole l'asteroide ne compirà esattamente due: si parla, in questo caso, di una *risonanza 2:1 con Giove*. Per tornare all'esempio delle lacune di Kirkwood, le maggiori risonanze provocate dalla presenza di Giove sono quelle del tipo 3:1, 5:2, 8:3 e 9:4 (si veda la Figura 1.2). Questa circostanza complica enormemente la trattazione matematica del problema tanto che lo studio delle risonanze costituisce uno dei capitoli più complessi della meccanica celeste. Lo stato di risonanza comporta la ripetizione periodica delle stesse configurazioni reciproche tra i due corpi celesti coinvolti: un'analisi dettagliata dimostra che, in questo caso, una parte delle perturbazioni gravitazionali non si compensa nel tempo ma si accumula progressivamente, generando effetti sull'eccentricità e l'inclinazione dell'orbita dell'asteroide. In alcuni casi il caos legato ad una risonanza si manifesta come una lenta deriva dell'orbita, valutabile solo dopo tempi molto lunghi; se però l'aumento

di eccentricità orbitale prodotto dalla risonanza porta l'asteroide ad incrociare l'orbita di uno dei pianeti principali ciò può portare ad incontri ravvicinati che modificano bruscamente la traiettoria a causa delle intense perturbazioni gravitazionali che subisce.

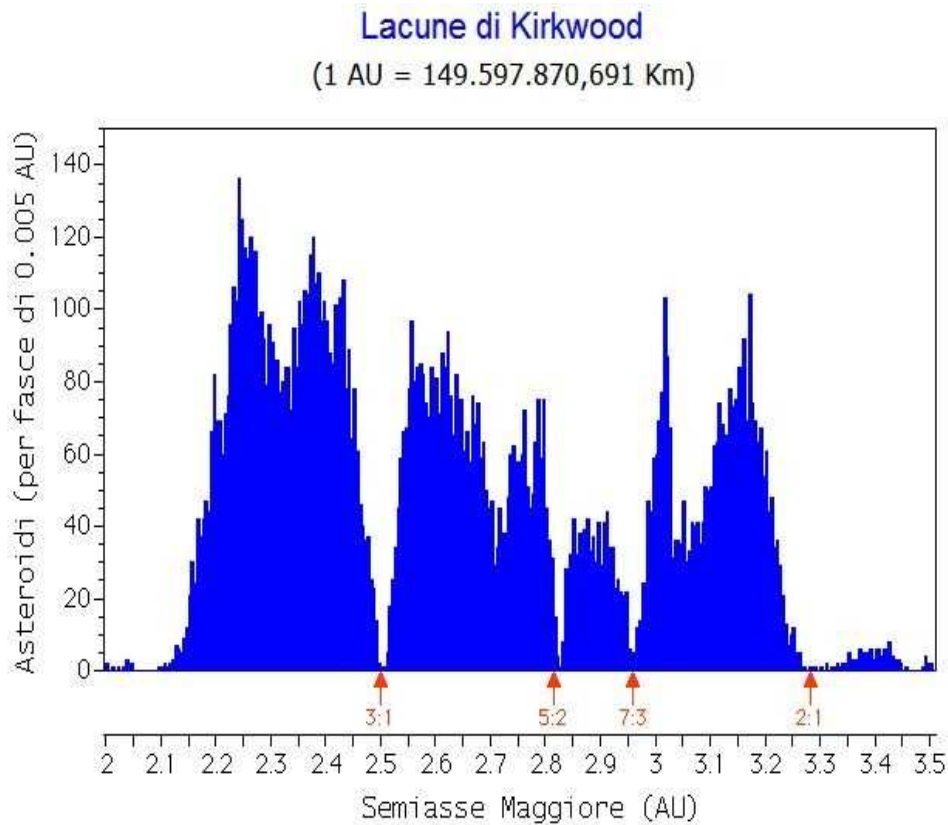


Figura 1.2 Nel diagramma sono rappresentati il numero di asteroidi della Fascia Principale in funzione della distanza dal Sole (o meglio in funzione del semiasse maggiore dell'orbita, espresso in UA). Sono particolarmente visibili le zone, corrispondenti a distanze particolari dal Sole, dove non si evidenzia la presenza di alcun asteroide. Si tratta delle Lacune di Kirkwood relative alle risonanze 1:3 (2,5 UA), 2:5 (2,82 UA), 3:7 (2,95 UA).

L'entità della perturbazione subita dall'asteroide a causa di un incontro ravvicinato con un pianeta dipende molto dalla posizione reciproca dei due corpi e quindi dalla loro traiettoria di avvicinamento: se l'orbita di avvicinamento non è perfettamente nota, l'incertezza dell'orbita successiva all'incontro sarà molto maggiore. Se l'asteroide ha ripetuti incontri ravvicinati con uno o più pianeti, è facile intuire che l'effetto a lungo termine della sequenza di amplificazione dell'incertezza sull'orbita porterà ad un comportamento non prevedibile, se non a breve termine.

Effetto Yarkovsky. Si tratta di un effetto non gravitazionale cioè in grado di variare le caratteristiche orbitali di un oggetto indipendentemente dall'attrazione gravitazionale reciproca dei corpi planetari. La causa principale è la radiazione

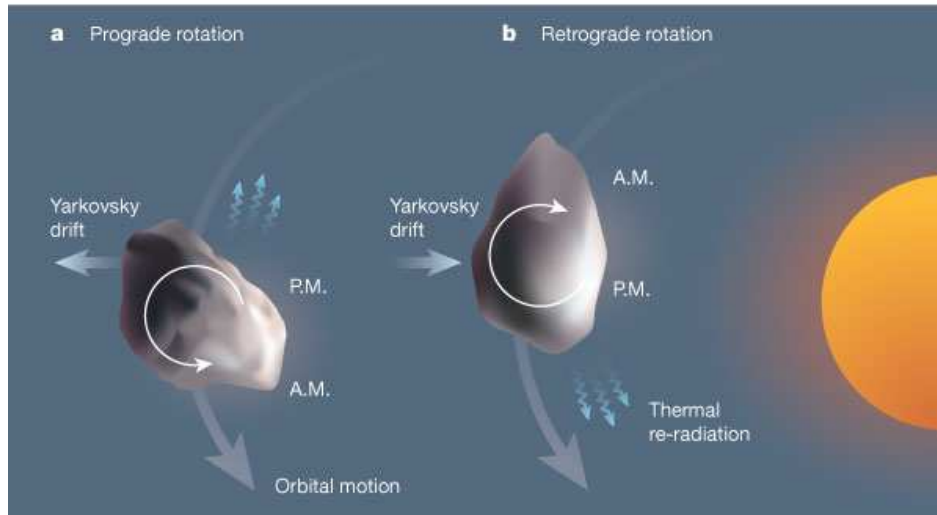


Figura 1.3 Effetto Yarkovsky.

elettromagnetica solare che pare possa agire su asteroidi di dimensioni fino ad alcuni chilometri. Altri tipi di effetti non-gravitazionali possono influenzare solo particelle inferiori al centimetro per cui rivestono scarsa importanza nella trattazione degli asteroidi vicini alla Terra (Near Earth Asteroid – NEA). Il meccanismo dipende essenzialmente dal fatto che un corpo planetario investito dalla radiazione solare si riscalda e riemette radiazione sotto forma di fotoni. Se gli asteroidi non ruotassero intorno al proprio asse, la zona più calda sarebbe sempre quella esposta al Sole (si dice con il Sole “a mezzogiorno”). La rotazione, invece, fa sì che la zona con maggiore emissione di fotoni risulti sempre quella un po’ in ritardo rispetto a tale istante, ossia nella regione detta “al pomeriggio”. L’emissione di fotoni agisce come un “effetto razzo” ossia spinge il corpo in direzione opposta (vedi Figura 1.3). La continua spinta impartita tende a far aumentare o diminuire il valore del semiasse maggiore, a seconda del senso di rotazione dell’oggetto. L’entità ed i tempi scala di queste variazioni dipendono dalle dimensioni del corpo in questione. L’effetto è così chiamato in onore dell’ingegnere civile russo Ivan Osipovich Yarkovsky (1844-1902) che lo ipotizzò per primo in un suo studio del 1900.

1.3.4 Le “famiglie dinamiche”

Come ultima, ma non meno interessante caratteristica degli asteroidi appartenenti alla Fascia Principale, è l’esistenza di una specie di “raggruppamento”. Sappiamo che tale regione del Sistema Solare è stata (e lo è tuttora) soggetta ad una evoluzione di tipo collisionale. Se proviamo a mettere su un grafico le posizioni degli asteroidi della Fascia Principale in funzione del semiasse maggiore a e dell’inclinazione della loro orbita (si veda la figura 1.4) ciò che appare evidente sono degli addensamenti che rappresentano le cosiddette “famiglie dinamiche”. Esse sono costituite da

asteroidi (o meglio, frammenti di asteroidi) formatisi a seguito della collisione e della relativa frammentazione di corpi più grandi e sono caratterizzate dal fatto di condividere in larga parte semiasse maggiore, eccentricità ed inclinazione, ereditati dal corpo progenitore. Le famiglie sono estremamente importanti, dato che consentono di osservare oggetti che sono a tutti gli effetti dei campioni degli strati più interni del corpo progenitore. I parametri fisici delle famiglie consentono di ottenere informazioni sulla fisica che governa la distruzione catastrofica di corpi *autogravitanti* del diametro delle decine o centinaia di chilometri.

Lo studio delle famiglie consente di dedurre le velocità tipiche di espulsione (tecnicamente, di eiezione) dei frammenti formati dopo le collisioni e riveste grande importanza dal momento che permette di valutare l'efficienza che tali fenomeni possono avere nel produrre frammenti espulsi con velocità tali da finire in qualcuna delle zone dinamicamente instabili della Fascia Principale, come le risonanze. Da queste regioni gli oggetti tendono a migrare verso le zone più interne del Sistema Solare, in modo da rifornire le popolazioni di NEO.

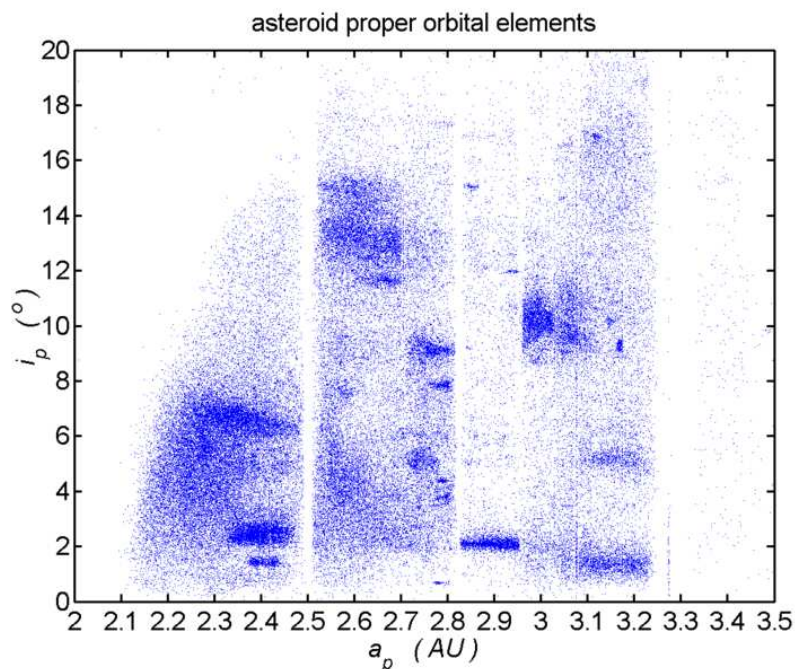


Figura 1.4 Nel diagramma sono rappresentate le posizioni degli asteroidi della Fascia Principale in funzione del semiasse maggiore a_p e dell'inclinazione i_p della loro orbita. Oltre agli addensamenti, che indicano le famiglie dinamiche, si possono notare le zone, corrispondenti a distanze particolari dal Sole, in UA, dove non si evidenzia la presenza di alcun asteroide. Si tratta delle Lacune di Kirkwood relative alle risonanze 1:3 (2,5 UA), 2:5 (2,82 UA), 3:7 (2,95 UA).

CAPITOLO 2

NEAR EARTH OBJECTS

2.1 Definizioni e caratteristiche dei NEO

Come già anticipato nell'introduzione, con il termine *Near Earth Objects*, abbreviato in *NEO*, viene indicata quella popolazione di corpi minori che orbitano intorno al Sole su traiettorie tali da poter incrociare l'orbita terrestre e, quindi, rappresentare un concreto rischio di collisione con il nostro pianeta. Tale popolazione è composta principalmente da asteroidi e, in misura minore, da comete. Nel capitolo precedente abbiamo fatto una panoramica sulle diverse popolazioni del Sistema Solare e delle zone da esse occupate. Abbiamo anche puntualizzato che le orbite occupate dai corpi celesti sono il frutto di una evoluzione dinamica cominciata con la formazione del Sistema Solare e, per alcuni di essi, tale evoluzione non è ancora terminata. Questo è proprio il caso dei *NEO*: le posizioni da loro occupate, che siano asteroidi o comete, non devono essere considerate fisse nel tempo. Oltre ai loro moti di rivoluzione intorno al Sole, dettati dalle leggi che abbiamo già visto, questi corpi minori subiscono continuamente una serie di perturbazioni che sono in grado di modificare sostanzialmente le loro orbite. I processi in grado di perturbare le orbite dei *NEO* possono essere "fisici" o "dinamici". I processi fisici sono le collisioni con altri oggetti celesti, numerose sia nei tempi passati che al presente. Tali collisioni possono causare frantumazione degli oggetti coinvolti nell'urto ed il destino dei frammenti così ottenuti è diversificato. Alcuni possono ricadere gli uni sugli altri e ricostruire in modo grossolano l'oggetto andato distrutto. Altri possono fuggire dalla reciproca attrazione gravitazionale e inserendosi su traiettorie del tutto autonome. Se la fuga di frammenti non è troppo accentuata è ancora possibile riconoscere l'origine comune e quindi la famiglia dinamica (vedi capitolo precedente). In ogni caso le collisioni, e l'eventuale fuga di frammenti che ne consegue, non sono processi tali da poter

causare spostamenti al di fuori della loro zona di origine: in pratica non bastano a trasferire da soli un asteroide dalla Fascia Principale e farlo diventare un *NEO* o assegnargli una traiettoria cometaria. Per ottenere trasferimenti decisivi è necessario che al processo fisico di collisione si aggiungano i processi dinamici, tali da far variare sensibilmente i parametri orbitali che caratterizzano la traiettoria dell'oggetto in questione.

2.1.1 Origine dei NEO

Nel Capitolo 1 abbiamo definito le risonanze di moto medio con Giove ed abbiamo anche visto come, nella Fascia degli Asteroidi, le zone attraversate dalle risonanze risultino prive di popolazione (in pratica sono state “svuotate”). Le risonanze di moto medio provocano la periodica ripetizione della stessa configurazione geometrica, facendo sommare le perturbazioni gravitazionali causate dal pianeta gigante. Il risultato è che, in tempi piuttosto brevi, i parametri orbitali, come eccentricità ed inclinazione, degli asteroidi finiti all'interno di una di queste risonanze crescono in modo continuo. La loro eccentricità orbitale potrebbe raggiungere valori molto alti, mantenendo comunque inalterato, o quasi, il valore del semiasse maggiore. La conseguenza è che l'orbita dell'oggetto si allunga spostando il perielio sempre più vicino al Sole, attraversando anche le orbite dei pianeti interni. Se tale meccanismo arrivasse a valori estremi, il destino dell'oggetto entrato in una risonanza sarebbe segnato: impattare contro il Sole, con ovvie conseguenze. Questo tipo di eventi è piuttosto frequente. Mentre il perielio si avvicina in modo drammatico al Sole è anche vero che l'afelio si allunga verso l'orbita di Giove. Di conseguenza, se l'oggetto si troverà costretto a passare nelle vicinanze del pianeta gigante subirà delle perturbazioni enormi e tali da cambiare drasticamente la sua orbita fino ad espellerlo (al limite) dal Sistema Solare. Anche i pianeti interni, sebbene con masse ridotte rispetto a quella di Giove, possono esercitare un effetto perturbativo sugli asteroidi che si spingono all'interno delle loro orbite. Ovviamente sono necessari incontri più ravvicinati per ottenere perturbazioni paragonabili a quelle del pianeta gigante. I pianeti più efficienti nell'estrarre gli asteroidi dalle risonanze sono la Terra e Venere (per ovvi motivi, sono più massicci rispetto a Mercurio e Marte): a seguito di uno o più incontri ravvicinati con questi pianeti l'orbita degli asteroidi tende a ridurre il semiasse maggiore inserendosi sempre più profondamente all'interno della zona vicina al Sole. In questo modo l'asteroide perde del tutto il ricordo della sua orbita iniziale e diventa un abitante della zona interna. In pratica diventa un oggetto a rischio di impatto con la Terra (di fatto diventa un *NEA*: *Near Earth Asteroid*).

Raggiungere una di queste orbite interne è tutt'altro che uno stato definitivo: l'asteroide è ben lontano dall'averne un'orbita stabile anzi, è continuamente soggetto a vigorose perturbazioni dovute agli incontri successivi con i pianeti che incontra. L'evoluzione della sua orbita continua ad essere altamente caotica e del tutto imprevedibile (se non per tempi brevissimi). Alcuni asteroidi potrebbero essere reinseriti all'interno di una risonanza e finire nel Sole, altri potrebbero mantenere le loro orbite acquisite per tempi più lunghi, altri ancora potrebbero essere inseriti su orbite tali da avvicinarli a Giove e venire poi espulsi dal Sistema Solare. Infine, i più "pericolosi" potrebbero impattare contro Venere o la Terra.

Fino ad ora abbiamo concentrato la nostra attenzione solo sugli asteroidi, come oggetti potenzialmente in grado di collidere con la Terra. In realtà c'è anche un'altra tipologia di oggetti che può avvicinarsi pericolosamente ai pianeti interni e diventare a loro volta dei *NEO*: le comete (la dicitura esatta è *NEC* – Near Earth Comet). Seppur in minima parte, anche loro possono contribuire ad aumentare la popolazione di oggetti pericolosi. Abbiamo già visto che possiamo distinguere le comete a corto/medio periodo (che arrivano dalla Fascia di Kuiper) da quelle a lungo periodo (che arrivano dalla Nube di Oort). I meccanismi di perturbazione che possono subire le due diverse categorie di comete sono diverse: per quelle provenienti dalla Nube di Oort potrebbe trattarsi di passaggi di stelle vicine e/o la presenza di nubi molecolari interstellari, in grado di strappare le comete dalla loro posizione stabile ed immetterle in orbite allungate, facendole passare a distanza ridotta dal Sole. Ovviamente le forze in gioco sono così diverse e non prevedibili che una previsione di traiettorie per questi oggetti è del tutto impensabile. Più "abbordabili", da questo punto di vista, potrebbero essere le comete a corto/medio periodo provenienti dalla Fascia di Kuiper. Le dinamiche all'interno di questa fascia esterna sono simili a quelle della Fascia degli Asteroidi, per cui potremmo considerare la stessa serie di eventi che abbiamo visto per gli asteroidi: collisioni tra comete che possono proiettare frammenti in risonanze di moto medio con i pianeti esterni, soprattutto con Nettuno, e conseguente immissione in orbite diverse da quelle iniziali che potrebbero portarle ad avvicinarsi al Sole ed ai pianeti interni. Una volta inserite in queste orbite le perturbazioni dovute alla presenza anche dei pianeti interni sono le stesse che subite dagli asteroidi.

2.1.2 Popolazione costante: meccanismi di rifornimento

Nel paragrafo precedente abbiamo visto quale è il meccanismo di formazione dei *NEO* ed abbiamo anche visto quale sia la probabilità che tali oggetti possano anche "sparire" o "morire" (o perché impattati sul Sole o su uno dei pianeti interni o perché

scagliati al di fuori del sistema Solare dall'entrata accidentale in una delle risonanze). Tali "sparizioni" non sono affatto improbabili ma la popolazione dei *NEO* risulta rimanere quasi costante. La vita media di un *NEO* è di qualche milione di anni, molto poco se paragonato alla vita del Sistema Solare. Questo significa che deve esistere un meccanismo di rifornimento continuo che permette a questa popolazione di non subire, nel tempo, grosse variazioni in termini in numero di elementi. I meccanismi di formazione dei *NEO* (collisioni ed entrata in risonanza per gli asteroidi ed inserimento in orbite ellittiche per le comete) sono processi ancora molto attivi e quindi non sembra così strano che, a fronte di un certo numero di corpi che muoiono ne abbiamo un altro che li rimpiazza. La domanda che ci poniamo è se questi meccanismi sono sufficienti a rifornire continuamente la popolazione. In altre parole, il numero di oggetti che entra in risonanza ed acquisisce un'orbita tale da portarli in prossimità della Terra è sufficiente a coprire il numero di oggetti che termina la propria vita in uno dei modi che abbiamo visto? Prima di rispondere a questa domanda è necessario dividere il problema in due parti distinguendo i *NEO* in base alla loro dimensione. Se parliamo di oggetti con dimensioni piuttosto contenute (indicativamente con diametro inferiore al chilometro) le collisioni in grado di produrre frammenti di questo tipo all'interno della Fascia degli Asteroidi sono piuttosto frequenti e sufficienti a garantire un passaggio continuo di corpi all'interno delle risonanze e poi nelle orbite che ci interessano. Più difficile diventa il rifornimento di oggetti di dimensione maggiore. Per produrre frammenti così grandi è necessario, ovviamente, che il corpo iniziale, prima dell'impatto, sia molto grande. Ma abbiamo già detto che il numero di oggetti decresce con il crescere della dimensione (fortunatamente) per cui gli asteroidi in grado di frammentarsi in oggetti di dimensioni ragguardevoli sono relativamente pochi e la frequenza di collisione è molto bassa. I tempi di rifornimento di tali *NEO* sono molto più lunghi (minore probabilità implica maggiore tempo che intercorre tra due collisioni di questo tipo) per cui dovremmo osservare un calo nel tempo di oggetti di grosse dimensioni all'interno della popolazione e poi, saltuariamente, un picco di inserimenti. La realtà è diversa. Anche la presenza di oggetti di dimensioni superiori al chilometro è costante. Esiste un altro sistema di rifornimento? Alcune ipotesi sono state certamente fatte, in tempi passati, ma nessuna delle soluzioni proposte era in grado di dare una spiegazione definitiva alla presenza costante di oggetti con dimensioni pari o superiori al chilometro. Solo recentemente è stata valutata un'altra soluzione che, fra tutte, sembra essere quella più realistica. Proviamo a spiegarla.

Presso il confine interno della Fascia Principale degli asteroidi esiste un gran numero di oggetti la cui orbita è tale da intersecare quella di Marte (per questo vengono

chiamati *Mars-crosser*). Si è sempre pensato che la probabilità che Marte potesse far sentire i propri effetti perturbativi su questi oggetti fosse molto bassa, a causa delle piccole dimensioni del Pianeta Rosso, ed in ogni caso su tempi scala estremamente lunghi. In realtà si è scoperto che, a causa dei numerosi incontri con il pianeta, la maggior parte di questi oggetti subisce piccoli spostamenti orbitali su tempi scala molto più corti di quanto avessimo immaginato. Quindi, anche questi oggetti possono finire in una delle risonanze ed acquisire orbite che li potrebbero portare nelle zone interne del Sistema Solare. Il tempo medio perché un *Mars-crosser* finisca in una di queste risonanze (e poi diventi un *NEA*) varia tra 25 e 60 milioni di anni, un tempo del tutto accettabile per spiegare la presenza di asteroidi di grosse dimensioni nella popolazione vicina alla Terra, anche se acquisiti con un processo mediamente più lungo rispetto all'immissione di frammenti più piccoli. Questo "serbatoio" può garantire un flusso di *NEO* ancora per almeno altri duecento milioni di anni ma potrebbe mantenerlo ancora più a lungo se il serbatoio stesso venisse a sua volta rifornito. Le collisioni di asteroidi nella Fascia Principale, anche se lontane dalle risonanze principali, ma comprese comunque tra 2 e 2,5 UA dal Sole, possono creare continuamente oggetti che vengono inseriti in una numerosa serie di piccole risonanze ricollegabili non solo a Giove, ma anche agli altri pianeti. Anche gli effetti non gravitazionali, tipo Yarkovsky (vedi Capitolo I, paragrafo 3) possono contribuire a trasportare gli asteroidi in alcune di queste piccole risonanze. Con questo meccanismo gli asteroidi possono diventare dei *Mars-crosser* nel giro di alcune centinaia di milioni di anni.

2.1.3 La popolazione

Diamo uno sguardo più ravvicinato alla popolazione dei *NEO* o, per essere ancora più precisi, ai *NEA* (*Near Earth Asteroid*). Infatti, come abbiamo già detto, gli asteroidi rappresentano la maggioranza di questi oggetti. Vorremmo provare a riconoscere qualche caratteristica particolare, riuscire a seguirli nella loro orbita intorno alla Terra e poter fare qualche realistica previsione sul loro futuro (alcuni di loro sono a rischio di impatto?). Di solito gli asteroidi che possono rappresentare un qualche rischio per la Terra sono quelli che si spingono entro l'orbita terrestre e si avvicinano al Sole. I più riconoscibili sono tre classi ai quali è stato dato il nome dei primi esemplari scoperti: *Apollo*, *Amor* ed *Aten*. Essi sono distinti in base ai parametri orbitali. Vediamole in dettaglio:

Classe *Aten*. Hanno un semiasse maggiore orbitale inferiore ad una Unità Astronomica, ma con distanza all'afelio (distanza massima dal Sole lungo l'orbita) maggiore della distanza perielica della Terra, pari a 0,983 UA. Gli *Aten* sono dunque

oggetti che passano parte del loro periodo orbitale all'interno dell'orbita terrestre ma possono anche spingersi ad una distanza maggiore.

Classe Apollo. Al contrario degli *Aten*, gli *Apollo* sono caratterizzati da un semiasse maggiore più grande di quello della Terra, ma con distanza al perielio inferiore alla distanza afelica della Terra, pari a 1,017 UA. Si tratta, quindi, di oggetti che orbitano al di fuori dell'orbita terrestre per la maggior parte del tempo ma che, in alcuni momenti, si spingono anche all'interno.

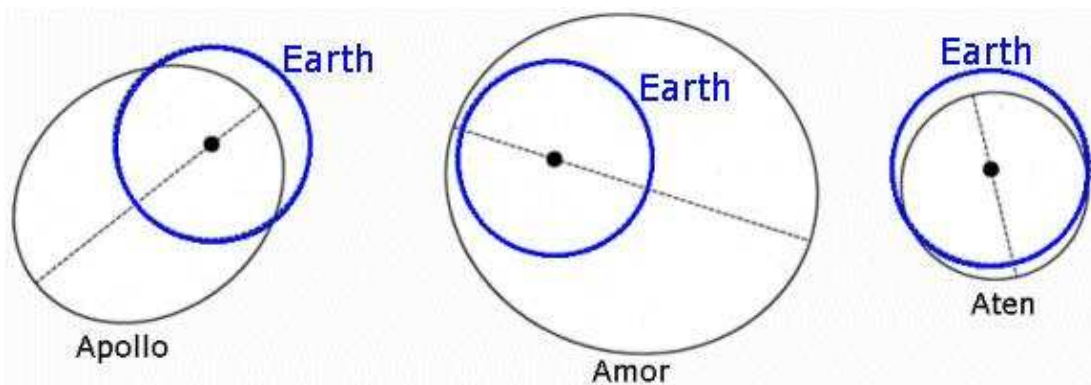


Figura 2.1 – Rappresentazione grafica delle orbite delle diverse classi di NEA in confronto all'orbita della Terra.

Classe Amor. Gli oggetti appartenenti a questa classe hanno orbite caratterizzate da una distanza dal perielio (distanza minima dal Sole) compresa tra 1,017 ed 1,3 UA. Si tratta, cioè, di oggetti che al perielio si spingono nella zona compresa tra le orbite della Terra e di Marte. Non possiamo, però, escluderli dalla lista degli oggetti pericolosi perché, anche se al momento non costituiscono un pericolo reale, dato che essi non intersecano l'orbita terrestre, l'evoluzione dinamica è comunque caotica.

Per un confronto grafico delle orbite delle tre diverse classi si veda la figura 2.1.

Per dovere di precisione dobbiamo anche accennare all'esistenza di una classe supplementare: *IEO* – *Interior-Earth Object* (generalmente indicata come *Classe Atira*) A questa classe appartengono quegli oggetti caratterizzati da un'orbita interamente compresa all'interno di quella terrestre (vale a dire con perielio ed afelio minori di 1 UA). Tale classe, fino a pochi anni fa, era solo definita teoricamente in quanto gli oggetti in essa contenuti risultavano impossibili da vedere, a causa della loro posizione apparente molto vicina a quella del Sole. Solo negli ultimi anni si è riusciti ad identificarne alcuni, ma il loro numero è piuttosto esiguo (16 al 30/09/2015).

Tutti gli asteroidi appartenenti alle classi appena viste subiscono evoluzioni orbitali su tempi molto brevi per cui la suddivisione risulta essere molto meno netta e corrisponde solo ad una situazione transitoria. Ciò significa che un asteroide che appartiene inizialmente ad una classe può subire una variazione di parametri orbitali ed entrare a far parte di un'altra classe. Addirittura alcuni oggetti possono inserirsi su orbite molto allungate, tipo quelle cometarie, ed alcune comete possono assumere caratteristiche orbitali non molto diverse da quelle degli asteroidi. Nel caso delle comete, alcune possono mantenere le loro caratteristiche fisiche evidenti (emissione di gas e relativa formazione di chioma e coda) mentre altre, le più vecchie possono divenire indistinguibili dagli asteroidi.

Per concludere, le orbite dei *NEO* sono essenzialmente caotiche e quindi del tutto imprevedibili su tempi scala anche molto brevi. Ne consegue che per tempi più lunghi di un centinaio di anni è possibile solo definire una stima grossolana della probabilità che uno di essi possa impattare con la Terra. Qualsiasi previsione su tempi lunghissimi è completamente priva di senso.

E' possibile fare una stima del numero di oggetti che fanno parte delle tre classi *Aten Apollo* ed *Amor* o, in maniera ancora più completa, che appartengono, in generale, alla popolazione dei *NEO*? Collegandosi con il sito <http://neo.jpl.nasa.gov/> relativo al *Near Earth Object Programm* della NASA, nella pagina delle statistiche (*discovery statistics*), possiamo accedere ad una serie di dati, analisi statistiche e grafici relativi agli oggetti Near Earth conosciuti. Tali dati vengono aggiornati continuamente (al 30/09/2015 i *NEO* conosciuti sono 13.140 di cui i *NEA* 13.036). Vedremo meglio questo sito nel prossimo capitolo, quando cercheremo di rispondere alla domanda: cosa stiamo facendo, oggi, per prevenire il rischio di impatto?

2.2 Evoluzione orbitale e probabilità di collisioni

L'orbita di un corpo intorno al Sole è descritta dalle tre leggi di Keplero, che predicono una certa stabilità dell'orbita. La teoria, però, come abbiamo già visto, si riferisce al caso ipotetico dei due corpi: l'oggetto in questione ed il Sole. Nel Sistema Solare le cose sono molto più complicate a causa della presenza dei pianeti, soprattutto dei giganti gassosi, che hanno masse tali da perturbare il moto di un asteroide nella sua traiettoria kepleriana. Se volessimo tenere conto dell'insieme di tutti i corpi presenti nel Sistema Solare, non saremmo più in grado di descrivere l'evolversi dell'orbita di un oggetto. Esistono, tuttavia, altri metodi di approccio e si riesce a risolvere il problema mediante l'integrazione numerica. Non possiamo trovare una o più formule capaci di descrivere il moto ma siamo in grado di simulare

il movimento ricostruendo, ad intervalli di tempo relativamente brevi, la posizione reciproca assunta da tutti i corpi interessati. In tal modo si calcolano le perturbazioni reciproche ad un certo istante e si apportano le dovute correzioni alle traiettorie. Poi si fa evolvere il tutto in modo teorico fino al successivo istante di analisi, e così via. Ovviamente avremo bisogno di un computer che possa gestire ed elaborare l'enorme mole di dati che sono necessari a simulazioni di questo tipo. Detto così sembrerebbe un procedimento piuttosto lineare, nella sua complessità, per cui saremmo tentati di dire che le orbite degli asteroidi possono essere calcolate per il prossimo futuro (vicino o lontano che sia). Le cose non stanno esattamente così nessun calcolo potrà prevedere l'esatto andamento della traiettoria di un *NEO*. Quando abbiamo affrontato il concetto di moto caotico abbiamo puntualizzato che lo stato finale di un sistema è talmente sensibile a piccoli cambiamenti delle condizioni iniziali e delle forze che influenzano la traiettoria che la previsione della traiettoria in un futuro lontano diventa praticamente impossibile. Basterà una minima differenza su una cifra decimale per cambiare drasticamente la descrizione della traiettoria futura. Nessuno vieta di eseguire ugualmente il calcolo ma il risultato dovrà necessariamente essere definito come "uno degli scenari possibili". Il margine di incertezza relativo a calcoli di questo tipo ci riporta necessariamente al concetto di probabilità. Quando si parla di probabilità non ci si riferisce ad una proprietà intrinseca del moto orbitale dell'asteroide ma alla imprecisione con cui noi conosciamo le circostanze in cui esso si svolge (le condizioni iniziali del moto e l'entità delle forze che lo influenzano).

2.2.1 Amplificazione di incertezze

Nel caso dell'orbita di un particolare asteroide il calcolo degli elementi orbitali introduce un certo *fattore di incertezza*, vale a dire che, per quanto le tecniche osservative e di misurazione delle posizioni apparenti dell'oggetto nel cielo siano notevolmente migliorate negli ultimi decenni, le misure sono ancor soggette a vari tipi di errore. In altre parole le osservazioni non forniscono il valore esatto degli elementi orbitali degli asteroidi, ma una indicazione di valori all'interno di una *regione di incertezza*, più o meno estesa. A tali elementi orbitali viene associato un insieme di orbite virtuali simili tra loro; tra queste una sola è quella che corrisponde all'asteroide reale, ma noi non siamo in grado di dire quale perché tutte le orbite sono compatibili con le osservazioni di cui disponiamo. Se si rendono disponibili nuove misurazioni dell'asteroide, o perché è stato osservato e seguito nuovamente a distanza di tempo, oppure perché riconosciuto in vecchie immagini di archivio, allora alcune delle orbite virtuali, che non risultano più compatibili con i nuovi parametri, possono essere scartate.

La crescita esponenziale nel tempo dell'errore di predizione ha come conseguenza che la regione di incertezza diventa sempre più grande man mano che il calcolo dell'orbita si estende al futuro. Come abbiamo già visto, un ruolo molto importante, in questo senso, è giocato dagli incontri ravvicinati con i pianeti, che agiscono come *amplificatori di incertezza*: ogni incontro produce un aumento dell'incertezza

orbitale che è tanto maggiore quanto più l'incontro è ravvicinato e la massa del pianeta è grande. In pratica ciò determina un *orizzonte di predicibilità* che non va oltre i primi incontri con i pianeti principali (non eccede pochi decenni) al di là del quale la posizione dell'asteroide lungo la propria orbita diventa completamente indeterminata.

2.2.2 *Incroci di orbite e PHA*

Affinché sia possibile un incontro ravvicinato o una collisione tra la Terra ed un asteroide è necessario che le orbite dei due oggetti si incrocino. Il fatto che la distanza tra le orbite sia abbastanza piccola da permettere un incontro ravvicinato non significa che questo debba necessariamente avvenire; infatti nell'istante in cui la Terra si trova nelle vicinanze del punto di incrocio con l'orbita dell'asteroide, quest'ultimo potrebbe trovarsi in un tratto completamente diverso della propria orbita. In generale l'asteroide può attraversare il punto di incrocio con un certo anticipo o un certo ritardo rispetto alla Terra ed il modo in cui tale differenza di tempo varia da una rivoluzione all'altra è legato al rapporto tra i periodi orbitali dei due oggetti. Possono quindi presentarsi casi diversi: nel caso in cui la Terra e l'asteroide abbiano lo stesso periodo orbitale, la stessa situazione (anticipo o ritardo) si presenterà ad ogni rivoluzione. Potrebbe addirittura sussistere una risonanza di moto medio, cioè i due periodi di rivoluzione potrebbero essere legati da un rapporto numerico semplice $n:m$ (l'asteroide compie n rivoluzioni esattamente nello stesso tempo in cui la Terra ne percorre m); anche in questo caso le stesse configurazioni si ripeterebbero invariate ad intervalli regolari. La risonanza di moto medio può quindi essere una situazione in cui asteroide e Terra hanno ripetuti incontri ravvicinati oppure, inversamente, una configurazione in cui l'asteroide evita ripetutamente ogni avvicinamento. Nel primo caso l'orbita dell'asteroide sarà particolarmente instabile e soggetta a continue perturbazioni e quindi la sua evoluzione sarà particolarmente rapida; anche nel secondo caso la risonanza è comunque un fenomeno temporaneo nella vita di un asteroide, perché il delicato equilibrio su cui si regge è soggetto alle perturbazioni da parte di tutti gli altri pianeti del Sistema Solare. Escludendo il caso particolare delle risonanze, la differenza di tempo con cui l'asteroide e la Terra si presentano nel punto di incrocio, e quindi la loro distanza minima di avvicinamento, varia da rivoluzione a rivoluzione: gli incontri molto ravvicinati richiedono che i due corpi transitino nel punto di incrocio entro un intervallo di tempo molto ridotto e quindi sono rari; molto più numerosi saranno gli incontri a distanza di sicurezza".

I corpi che hanno traiettorie orbitali estremamente vicine a quella della Terra e che, quindi, appartengono alla popolazione per cui il rischio di impatto non è

trascurabile, vengono definiti *PHA*, acronimo di *Potential Hazardous Asteroids*. I *PHA* sono tutti i *NEA* la cui orbita ha una distanza minima rispetto a quella terrestre inferiore a 0,05 UA e sono più brillanti della magnitudine 22. Il che significa che possono passare a una distanza dal nostro pianeta inferiore a 7,84 milioni di chilometri ed avere dimensione superiore a 150 metri. La distanza minima tra le due orbite viene definita *MOID* (*Minimum Orbit Intersection Distance*) ed è considerato come un parametro di attenzione.

Alla luce di quanto detto fino ad ora la domanda che ci poniamo, senza tenere toni allarmistici, non è “se” la Terra verrà colpita da un corpo celeste ma “quando” questo avverrà. La probabilità che eventi particolarmente catastrofici avvengano su tempi scala umani è molto bassa ma non è nulla.

2.2.3 *Frequenza di collisioni ed effetti*

Come abbiamo già accennato, per ottenere la probabilità di impatto di un *NEO* sulla Terra è necessario moltiplicare la probabilità relativa del singolo oggetto per il numero totale di quelli che possiedono dimensioni analoghe. Conoscendo il numero totale di *NEO* esistenti, possiamo ottenere la probabilità di impatto in funzione dell’impattore. Consideriamo, come esempio, il numero di oggetti con diametro superiore al chilometro e supponiamo che siano 1000. Moltiplicando questo numero per la probabilità media (da 0,5 a 4 per miliardo di anni) otteniamo una frequenza di impatto di un oggetto ogni qualche centinaio di migliaia di anni. Il valore varia tra quello più pessimistico di un impatto ogni 200.000-300.000 anni a quello più ottimistico di uno ogni 2 milioni di anni. Come si vede, l’incertezza non è trascurabile. Sapendo che il numero di *NEO* cresce esponenzialmente al decrescere del diametro è facile intuire che impatti con oggetti di dimensione dell’ordine del centinaio di metri sono molto più frequenti mentre sono (fortunatamente) molto rari quelli con oggetti dell’ordine di qualche chilometro.

Nel corso del Congresso Internazionale IMPACT tenutosi a Torino nel giugno del 1999 è stata presentata una proposta per definire in maniera univoca una scala di rischio relativa all’impatto di un *NEO* con la Terra, a cui è stato dato il nome della città ospite. La “*scala Torino*” è costituita da 10 gradi di pericolosità crescente dove vengono considerati sia la probabilità intrinseca di collisione sia le conseguenze che deriverebbero da un impatto (si veda la figura 2.2). Tale scala di valori è stata presentata anche per cercare di facilitare la comunicazione tra i ricercatori, gli organi di stampa ed il pubblico, in modo simile a quanto si fa, per esempio, con i terremoti e la scala Mercalli.

non comporta alcuna conseguenza	0	La probabilità di collisione è zero, o molto al di sotto di quella di un oggetto occasionale qualsiasi non conosciuto. Questa classe si applica anche a oggetti talmente piccoli da non riuscire a raggiungere la superficie terrestre.
	1	La probabilità di collisione è estremamente bassa, circa la stessa di un oggetto occasionale non conosciuto.
necessita un controllo continuo dell'oggetto	2	La probabilità di un incontro ravvicinato è leggermente superiore alla media, ma la probabilità di collisione è molto bassa.
	3	L'incontro è sicuramente ravvicinato. La probabilità di impatto è di almeno 1%. La collisione può causare solo distruzioni locali.
necessita attenzioni particolari e possibili studi di intervento	4	Come il 3, ma le distruzioni sarebbero su scala regionale.
	5	L'incontro è sicuramente ravvicinato. La probabilità di impatto è elevata e la distruzione è su scala regionale.
	6	Come il 5, ma le distruzioni sarebbero su scala globale.
da considerare allarmanti e necessitano preparazione di interventi	7	La collisione ha una probabilità alta. Le distruzioni sarebbero su scala globale.
	8	La collisione è sicura ma le distruzioni sarebbero su scala locale. Questi eventi accadono mediamente fra 1 e 50 volte per migliaia di anni.
collisioni sicure e necessitano interventi	9	La collisione è sicura ma con distruzioni su scala regionale. Ciò accade mediamente tra 1 volta ogni 1000 anni e 1 volta ogni 100000 anni.
	10	La collisione è sicura ma con distruzioni su scala globale. Questi eventi accadono in media non più di una volta ogni 100000 anni.

Figura 2.2 La Scala Torino.

Tuttavia il grado di pericolosità di un impatto con un asteroide è legato a due fattori così distinti (probabilità intrinseca di collisione e conseguenze da impatto) che inevitabilmente porta a generare un po' di confusione (è più grave una catastrofe di scala locale ma relativamente certa o una catastrofe dagli effetti più estesi ma meno probabile?). Nelle tabelle che vengono aggiornate continuamente sui siti di alcuni enti spaziali, nelle quali vengono riportati gli asteroidi near-Earth conosciuti e per i quali si può prevedere l'evoluzione dell'orbita per il prossimo futuro, oltre al valore della scala Torino viene riportato un altro valore che fa riferimento ad un'altra scala di valutazione del rischio: si tratta della *scala Palermo*. Anche quest'ultima scala combina in un singolo valore sia la probabilità di impatto, sia l'energia cinetica che verrebbe liberata nell'impatto stesso, e quindi il danno causato. Un valore 0 indica un rischio equivalente al rischio di fondo (definito come il rischio medio che un altro oggetto maggiore o uguale possa impattare la Terra nello stesso periodo, cioè fino al tempo del possibile impatto). Un valore +2 indica un rischio 100 volte maggiore del rischio di fondo. Si tratta, infatti, di una scala logaritmica più complessa della scala Torino.

Di fatto, come possiamo quantificare gli effetti distruttivi di un impatto di un asteroide sul suolo terrestre? Il parametro fondamentale che descrive la distruttività di

un certo impatto è l'energia cinetica dell'impattore $E_c = \frac{1}{2}mv^2$, vale a dire il prodotto tra la massa dell'impattore ed il quadrato della sua velocità di impatto (diviso 2). La massa dell'asteroide è data dal prodotto tra la sua densità ed il suo volume e su quest'ultimo valore conviene fare alcune piccole precisazioni. Abbiamo già detto che gli asteroidi possono avere composizione chimica diversa e, quindi, anche la densità può cambiare in base al tipo di classe tassonomica a cui appartiene l'asteroide. In generale un asteroide formato da roccia sostanzialmente porosa può avere una densità di 1500 kg/m^3 , una di roccia più densa può arrivare a 3000 kg/m^3 ed una di tipo metallico può arrivare a 7000 kg/m^3 . Invece di considerare l'energia cinetica potremmo riferirci direttamente al diametro dell'impattore. Ovviamente, da quanto appena detto, possiamo fare una semplificazione tale solo se prendiamo valori medi di densità e velocità dell'asteroide. Una trattazione rigorosa che mira ad avere calcoli precisi delle energie in gioco deve, ovviamente, tenere conto in modo preciso dei parametri appena citati, senza applicare alcuna semplificazione. Nel nostro caso, solo per dare un'idea degli effetti generati da un eventuale impatto con un asteroide possiamo semplificare la trattazione. Il segno più evidente di un impatto di un corpo proveniente dallo spazio è senz'altro il cratere che viene prodotto e la sua formazione dipende dalle dimensioni dell'oggetto impattante. Se il corpo che penetra nell'atmosfera terrestre ha dimensioni ridotte esso si disintegra prima di raggiungere il suolo e l'unico segno evidente che possiamo notare è la scia luminosa lasciata nel cielo. Se l'oggetto ha dimensioni più grandi della dimensione critica (vale a dire la dimensione al di sopra della quale l'azione frenante e disgregante dell'atmosfera terrestre non è più sufficiente per distruggere completamente l'oggetto; per i particolari si veda la Tabella 2.1) riuscirà ad arrivare al suolo formando il tipico cratere da impatto e generando gli effetti conseguenti. Se osserviamo la Luna o Marte, risultano evidenti le tracce di impatti con corpi celesti. Infatti i crateri che si sono formati sono rimasti pressoché intatti a testimonianza del bombardamento subito. Anche la Terra ha subito lo stesso tipo di bombardamento ma le tracce di questi eventi sono più difficili da trovare perché l'attività geologica ancora presente sulla Terra unita alla presenza di agenti atmosferici in grado di generare una (lenta) erosione della crosta terrestre hanno parzialmente cancellato i segni di questi eventi estremi. Il meccanismo di formazione dei crateri non è semplice: prima di tutto possono avere dimensioni che vanno dalle 10 alle 20 volte quelle dell'oggetto impattore e possono suddividersi in due gruppi basati sulla loro morfologia (crateri *semplici* o *complessi*). I crateri semplici sono relativamente piccoli ed il rapporto tra profondità e larghezza è molto grande (ha la forma di una scodella). I crateri complessi si formano in seguito ad eventi più energetici e sono più grandi di quelli

semplici. Quello che però risulta comune a tutti gli eventi è che gli effetti distruttivi vanno ben oltre i confini geometrici del cratere. L'impatto di un oggetto di circa 70-80 metri potrebbe distruggere completamente una città di dimensioni medie (per esempio Brescia). Una metropoli verrebbe spazzata via dall'impatto di un corpo di 150-200 metri. Un oggetto di 300 metri sarebbe sufficiente a distruggere una regione mentre uno di 700 metri potrebbe cancellare una piccola nazione. La prima causa di distruzione è l'onda d'urto, seguita da terremoti ed incendi. L'energia liberata viene indicata in megatoni⁶ (per avere un parametro di riferimento la bomba atomica sganciata su Hiroshima nel 1945 ha generato una energia di circa 16 kT) e possiamo quantificare che un corpo di medie dimensioni può generare energia fino a circa 10.000 megatoni. Gli effetti, però, verrebbero notevolmente amplificati se il corpo colpisse uno degli oceani, perché la distruttività aumenterebbe in modo sensibile a causa della generazione di "tsunami". Queste grandi onde si propagherebbero sulla superficie dell'oceano su distanze di migliaia di chilometri a velocità elevatissime e la loro altezza aumenterebbe di 10 o 20 volte in prossimità di una piattaforma continentale. Le conseguenze sarebbero disastrose perché il fronte d'onda riuscirebbe a spingersi per molti chilometri all'interno delle zone costiere investite, con il rischio di grosse perdite di vite umane. Gli effetti di un impatto sarebbero ancora più devastanti se le dimensioni dell'impattore (e quindi l'energia liberata durante l'impatto) fossero maggiori: un oggetto con diametro compreso tra 1,5 e 3 chilometri potrebbe generare una energia dell'ordine di un milione di megatoni. L'effetto principale sarebbe l'immissione in atmosfera di una enorme quantità di polvere sollevata nell'impatto. Tale polvere sarebbe in grado di rendere molto opaca l'atmosfera terrestre ed il clima verrebbe turbato in tutto il pianeta. Ad energie di un ordine di grandezza più elevato, corrispondenti all'impatto con un asteroide di circa 5 chilometri di diametro, l'opacità dell'atmosfera causata dalle particelle di polvere diventerebbe tale da creare una oscurità capace di arrestare la fotosintesi clorofilliana delle piante, con ovvie conseguenze su tutte le specie animali. Eventi così catastrofici non sono certo all'ordine del giorno e si possono verificare una volta ogni decina o centinaia di milioni di anni e comunque solo a causa di oggetti molto grossi.

⁶ 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 PJ ($4,184 \times 10^{15}$ J).

Diametro del corpo impattante (metri)	Energia sviluppata (megatoni)	Intervallo (anni)	Conseguenze
<50	<10	<1	Meteoroidi nell'alta atmosfera, che per lo più non raggiungono la superficie.
75	10	1.000	I meteoroidi ferrosi producono crateri come il Meteor Crater; quelli rocciosi producono esplosioni in aria come a Tunguska; l'impatto distrugge un'area vasta quanto una città.
160	100 - 1.000	5.000	I meteoroidi ferrosi e rocciosi colpiscono il suolo; le comete producono esplosioni in aria; l'impatto distrugge un'area vasta quanto una metropoli (New York, Tokyo).
350	1.000 - 10.000	15.000	L'impatto sulla terraferma distrugge un'area vasta quanto un piccolo stato; l'impatto negli oceani produce piccoli maremoti.
700	$10^4 - 10^5$	63.000	L'impatto sulla terraferma distrugge un'area vasta quanto uno stato medio (come la Virginia); l'impatto negli oceani genera grandi maremoti.
1700	$10^5 - 10^6$	250.000	L'impatto sulla terraferma solleva grandi quantità di polveri con conseguenze a livello globale; viene distrutta un'area vasta quanto un grande stato (California, Francia).
5000	$10^7 - 10^8$	50.000.000	L'impatto sulla terraferma solleva grandi quantità di polveri con conseguenze a livello globale; viene distrutta un'area vasta quanto diversi stati. L'impatto negli oceani genera grandi maremoti.

Tabella 2.1 Riepilogo delle conseguenze di impatti di corpi impattanti di diverse dimensioni (fonte <http://www.vialattea.net>)

2.2.4 Cenni su due grandi impatti del passato

Estinzione dei dinosauri. Per circa 165 milioni di anni la Terra è stata dominata da una forma di vita che ha sempre esercitato un grande fascino sull'immaginario collettivo: i dinosauri. Essi dominavano il pianeta in ogni ambiente, terra, acqua e cielo e si trovavano praticamente in cima alla catena alimentare. Eppure, ad un certo momento della storia (circa 65 milioni di anni fa), sono improvvisamente scomparsi nel nulla lasciando il posto ad altre forme di vita. Cosa è successo?

Per molti anni gli scienziati esperti in diverse discipline hanno cercato di dare una spiegazione plausibile al "mistero" ma solo a partire dall'inizio degli anni '80 che l'ipotesi della caduta di un oggetto celeste (asteroide o cometa) ha preso corpo: un gruppo di scienziati americani stava studiando una roccia nella Gola del Bottaccione, in prossimità di Gubbio. Senza entrare nel dettaglio della loro analisi basti dire che, tra le altre scoperte interessanti, notarono la presenza di uno strato di argilla con un contenuto di iridio (elemento chimico estremamente raro sulla Terra) trenta volte superiore a quello contenuto nei sedimenti adiacenti. Ulteriori ricerche effettuate su altre parti della Terra e su campioni databili all'incirca nello stesso periodo del campione di Gubbio evidenziavano la stessa caratteristica. Gli scienziati avanzarono così la teoria che i valori elevati di iridio (scarso sulla superficie terrestre ma molto abbondante nei corpi celesti) fossero la testimonianza dell'impatto di un grosso meteorite proprio nel periodo della scomparsa dei dinosauri e coincidente con la datazione dei sedimenti analizzati in tutto il mondo. Ma mancava ancora la prova principale a supporto della caduta di un corpo: dov'era il cratere? Per trovarlo bisogna aspettare fino al 1991, quando una strana formazione geologica circolare viene rinvenuta (mediante sofisticate misure di tipo magnetico e gravimetrico) nella penisola dello Yucatan (Messico), sepolta oltre un chilometro sotto la superficie del villaggio Chicxulub. Ulteriori studi stabilirono con grande certezza che la struttura era il residuo di un cratere da impatto la cui età è stimata in circa 65,1 milioni di anni. Il diametro del cratere era di circa 170 chilometri, compatibile con l'impatto di un oggetto di diametro compreso tra i 5 ed i 10 chilometri. L'urto potrebbe aver liberato una energia di circa 100 milioni di megatoni mentre circa 50.000 chilometri cubici di polveri si sarebbero sollevate nell'atmosfera (diffondendosi in tutte le direzioni a causa dei venti) rendendola opaca ai raggi solari. Le conseguenze le conosciamo: la fotosintesi delle piante sarebbe cessata e si sarebbe perso il primo anello della catena alimentare, andando a colpire prima gli animali erbivori e poi i carnivori. Solo alcune specie di animali onnivori riuscirono a sopravvivere nutrendosi con quello che trovavano.

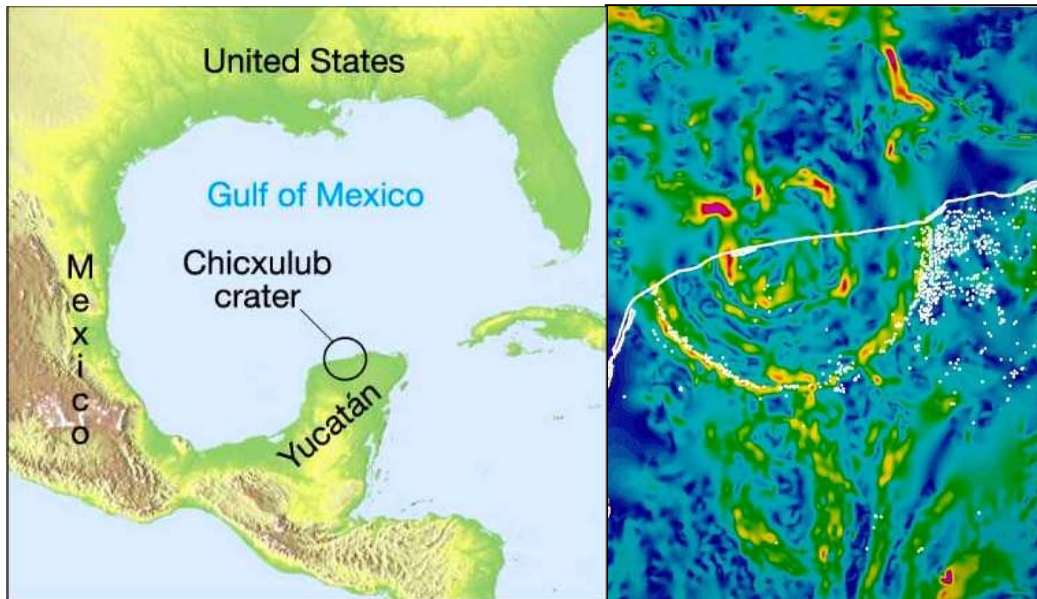


Figura 2.3 A sinistra la posizione del cratere di impatto dell'asteroide caduto 65 milioni di anni fa. Sulla destra la mappa delle anomalie gravitazionali registrate nello Yucatan, in corrispondenza del cratere da impatto. La linea bianca indica la costa della penisola.

Altopiano di Tunguska (Siberia). Martedì 30 giugno 1908, ore 7:14 locali: nel cielo appare una palla di fuoco che lo attraversa da sud-est verso nord-ovest, lasciando dietro di sé una lunga scia infuocata di gas e polveri. Dopo pochi istanti il corpo infuocato punta verso il suolo e nell'aria riecheggia un boato assordante. In pochi secondi oltre duemila chilometri quadrati di foresta siberiana vengono investiti da una micidiale ondata di calore, seguita da una terribile onda d'urto e da una nube di polveri che si alza in quota per decine di chilometri. Per mesi ed anni, dopo l'accaduto, vengono raccolte testimonianze e si fanno rilievi nella zona colpita per cercare di capire l'origine della devastazione. Il minerologo russo L.A. Kulik (1883-1942) fu il primo scienziato ad interessarsi al caso e per tutto il resto della sua vita cercò di dare una spiegazione, anche organizzando una serie di spedizioni volte a studiare in loco le conseguenze dell'evento e a cercare, invano, le prove della caduta di un meteorite. Dopo di lui, a distanza di tempo (solo dopo la fine della Guerra Fredda e del crollo del comunismo sovietico), poterono cominciare a studiare il caso anche scienziati non russi, fra cui una èquipe di italiani, guidata dal Prof. Menotti Galli dell'Università di Bologna. Nel 1991 venne organizzata la prima spedizione italiana che, con difficoltà, riuscì a giungere sul luogo il 21 luglio. Le energie della squadra si concentrarono sull'individuazione di alberi resinosi con età superiore a 110 anni che campionano meticolosamente (senza necessità di abatterli, tranne che in due casi). Al rientro in Italia, e dopo valutazioni approfondite, gli scienziati italiani presentarono la nuova teoria: prima dell'esplosione il meteorite poteva essersi

spezzato in più parti generando altre esplosioni a quote inferiori rispetto a quella principale. Da qui, intrecciando la loro ricerca sperimentale con quella teorica di un gruppo di scienziati americani, si arrivò alla conclusione che il meteorite era, probabilmente, di natura rocciosa e che la dinamica del disastro era perfettamente compatibile con una frammentazione del corpo primario in più corpi secondari. Ulteriori studi ed una seconda spedizione italiana nel 1999 portarono gli scienziati a confermare la teoria del meteorite roccioso. La scoperta di un lago (lago Cheko) di sospetta natura meteoritica sembrava confermare anche la teoria della frammentazione. La ricostruzione finale dei fatti è, attualmente, la seguente: l'asteroide di natura rocciosa di 50-80 metri di diametro esplose ad una altezza di 5-10 chilometri di quota sopra l'altipiano di Tunguska. Un frammento di 1-5 metri sopravvisse all'esplosione e impattò al suolo a 8 chilometri dall'epicentro formando un piccolo cratere, vicino ad una ansa del fiume Kimchu. La temperatura sprigionata nell'impatto provocò lo scioglimento del permafrost allargando le dimensioni iniziali del cratere. Il fiume Kimchu riempì il cratere formando il lago Cheko e cancellando le tracce dell'impatto.

CAPITOLO 3

MONITORAGGIO DA TERRA E MISSIONI SPAZIALI

Nei due capitoli precedenti abbiamo posto l'attenzione sulle caratteristiche e sulla posizione degli asteroidi potenzialmente pericolosi per il nostro pianeta, oltre che chiederci da dove essi provengano e quanto numerosa sia la popolazione degli oggetti vicini alla Terra. Abbiamo anche visto quali sono gli strumenti che ci permettono di prevedere l'evoluzione della loro orbita e se si possono predire eventuali collisioni con la Terra. Da un certo punto di vista ci conforta l'idea che la frequenza di impatto di un oggetto del diametro di 1-2 chilometri è relativamente bassa: una volta ogni 250.000 anni circa. Più alta è la frequenza di impatti con oggetti simili a quello caduto a Tunguska nel 1908: uno ogni 200 anni circa. Ma, nello specifico, come funziona il lavoro di acquisizione dei dati ed i successivi calcoli di probabilità e di evoluzione di orbite? La risposta è una intensa attività di monitoraggio da Terra. Infatti se un corpo potenzialmente pericoloso potesse essere scoperto con un certo anticipo, si potrebbe "tenerlo d'occhio" ed applicare misure preventive per evitare eventuali catastrofi, se possibile, oppure cercare di contenere il più possibile gli effetti (per esempio evitando perdite umane). Esistono alcuni programmi spaziali che hanno lo scopo preciso di monitorare il cielo alla ricerca di nuovi *NEO* e di seguire l'evoluzione delle orbite di quelli già conosciuti. Un grande contributo alla conoscenza degli asteroidi è arrivato anche (e continuerà negli anni a venire) dagli incontri ravvicinati che alcune sonde spaziali hanno avuto con alcuni di essi, permettendoci di acquisire una serie di informazioni che non era possibile ottenere mediante le sole osservazioni da Terra.

3.1 Programmi di monitoraggio e controllo

Il primo progetto di controllo spaziale nacque nel 1980 ad opera di alcuni astrofisici che lavoravano al Lunar and Planetary Laboratory della University of Arizona. Il progetto venne battezzato *Spacewatch* e da allora ha potuto aumentare la sua capacità di ricerca mediante l'acquisizione di strumenti all'avanguardia. Infatti dagli iniziali 20 nuovi oggetti scoperti all'anno sono passati ai quasi 200 di oggi. Grande impulso alla nascita di progetti di osservazione di *NEO* è venuto dalla *NASA* che, al momento,

sta cofinanziando una serie di siti osservativi sparsi un po' ovunque nel mondo, proprio allo scopo di creare una rete globale per l'avvistamento, il riconoscimento e la sorveglianza degli asteroidi. Anche l'ESA, l'Agenzia Spaziale Europea, ha promosso un programma di coordinamento che sostiene l'utilizzo e l'accesso ai dati ed alle informazioni relativi ai NEO in modo da sensibilizzare i politici e gli scienziati dei paesi membri della Comunità Europea a rivedere gli sforzi profusi nell'affrontare il rischio derivante dall'impatto di corpi celesti.

3.1.1 Il Near Earth Object Program della NASA

Nel 1998, all'avvio del programma di coordinamento, la NASA, si era data come obiettivo la scoperta di almeno il 90% dei NEO con dimensione superiore al chilometro. Nel 2005, visto il grande successo ottenuto dai gruppi di ricerca cofinanziati dalla NASA, è stato deciso di ampliare la ricerca spingendosi fino a cercare di rilevare il 90% dei NEO con dimensione superiore a 140 metri. Tutti i dati ed i risultati relativi alla scoperta ed al monitoraggio di tali asteroidi sono riportati nel sito <http://neo.jpl.nasa.gov/neo/>. Nella sezione NEO BASICS del sito vengono spiegate, in vari passaggi, le ragioni che hanno spinto la NASA a promuovere un programma di questo tipo, i gruppi di asteroidi oggetto del monitoraggio e le definizioni fondamentali con le quali si ha a che fare all'interno del sito. Per ogni gruppo di asteroidi vengono specificate alcune caratteristiche fondamentali che li identifica ed i motivi per cui alcuni di loro possono essere considerati pericolosi.

Il lavoro vero e proprio effettuato dai gruppi di ricerca che collaborano con la NASA, sparsi in tutto il mondo, fanno convergere i propri dati allo scopo di effettuare un'unica grande elaborazione. I principali gruppi sono: lo *Spacewatch*, già visto, il Lincoln Near-Earth Asteroid Research (*LINEAR*), il Catalina Sky Survey (*CSS*), il Pans-STARRS1 di Haleakala, Maui, Hawaii, il Near-Earth Asteroid Tracking (*NEAT*), il Lowell Observatory Near-Earth object Search (*LONEOS*), il Japanese Spaceguard Association (*JSGA*) e i due centri italiani, il Campo Imperatore Near-Earth Object Survey (*CINEOS*). Da non dimenticare anche *NEOWISE* (Near-Earth Object Wide-field Infrared Survey Explorer): *WISE* è un telescopio spaziale lanciato nel 2009 e finanziato dalla Planetary Science Division della NASA. Prima di essere messo a riposo nel 2011 (dopo aver esaurito il liquido refrigerante), aveva raccolto oltre 2,7 milioni di immagini a più lunghezze d'onda dell'infrarosso (3,4 4,6 12 e 22 micron) e catalogato più di 560 milioni di oggetti mediante l'uso della Wide-field Infrared Survey Explorer (*WISE*). Nel 2013 è stato rimesso in funzione per altri tre anni per dare la caccia ai NEO più pericolosi per il nostro pianeta (da qui il nome *NEOWISE*). Ogni volta che un nuovo oggetto viene identificato, necessario intraprendere un percorso di follow-up che comprende una serie di osservazioni astrometriche per poter classificare l'oggetto ed essere in grado, nei giorni e nelle settimane successive, di riconoscerlo e seguirlo nel suo moto nel cielo. Questa attività di follow-up è fondamentale per poter definitivamente inserire l'oggetto fra i NEO conosciuti ed evitare di perderlo (soprattutto se molto debole): per questo

motivo viene riconosciuto un grande merito agli scienziati, ma anche ai semplici gruppi amatoriali, che si impegnano per seguire il *NEO* il più a lungo possibile. Oltre ad indagini di tipo orbitale sono importanti anche le osservazioni mirate a stimare le dimensioni dell'oggetto, la forma, le caratteristiche della rotazione (mediante indagini radar) e l'eventuale presenza di satelliti. Infatti è una scoperta abbastanza recente il fatto che anche gli asteroidi possano avere dei satelliti (243 Ida fu il primo *asteroide binario* ad essere scoperto: esso è infatti accompagnato da un piccolo satellite, Dactyl, scoperto durante la missione della sonda Galileo, il 28 agosto 1993).

Quali sono le procedure necessarie per determinare l'orbita di un nuovo asteroide? Le prime tecniche di individuazione dei *NEO* erano legate all'uso della lastra fotografica: in pratica venivano confrontate le immagini relative alla stessa porzione di cielo prese a diversi minuti le une dalle altre. La maggior parte degli oggetti presenti sulle pellicole erano stelle e galassie che rimanevano praticamente nelle stesse posizioni. Poteva succedere che tra una immagine e l'altra si notasse la presenza di corpi che si muovevano in maniera evidente. Da quel momento partiva la fase di individuazione e classificazione dell'oggetto. In tempi più recenti sono stati sviluppati i dispositivi CCD che hanno fundamentalmente preso il posto delle lastre fotografiche per l'acquisizione di immagini. Si tratta di dispositivi digitali che permettono di immagazzinare una grande quantità di immagini e di averle disponibili in ogni momento per poter effettuare confronti. Durante la prima notte di osservazione (la notte della scoperta) vengono eseguite diverse immagini dell'oggetto, sia per assicurarsi della sua reale esistenza (escludendo ad esempio il caso di una piccola macchia registrata dalla pellicola o dal CCD) sia per evidenziare il moto apparente dell'oggetto, consentendo di distinguerlo da una stella fissa o da una galassia e di prevederne la posizione nei giorni seguenti. Le osservazioni effettuate la prima notte forniscono solo una conoscenza vaga degli elementi orbitali, tale da consentire la previsione del moto del nuovo oggetto solo su un arco di pochi giorni: se esso non viene osservato nuovamente entro tale limite di tempo, risulta irrimediabilmente perso. Perciò, se le condizioni meteorologiche e la disponibilità dei telescopi lo permettono, l'asteroide viene osservato nuovamente la notte successiva e forse una terza notte; a questo punto si è in grado di calcolare un'orbita che consentirà di non perdere l'oggetto per una o due settimane. La regola generale dovrebbe essere quella di eseguire nuove osservazioni solo quando sia trascorso un intervallo di tempo opportuno dall'ultima misurazione effettuata stando attenti a non rischiare di perdere l'oggetto. In questo modo si ottengono successivamente orbite sempre più precise potendo aumentare gradualmente la distanza temporale tra le osservazioni. Tale attività di sorveglianza e inseguimento di un asteroide scoperto da poco al fine di migliorare la precisione dell'orbita viene indicata come follow-up. L'importanza dell'attività del *Near Earth Object Program della NASA* (ma anche degli altri enti spaziali) sta proprio nella collaborazione a livello mondiale di diversi

gruppi di ricerca. Senza un simile coordinamento l'efficienza complessiva del sistema sarebbe molto inferiore.

Nel sito della NASA ci sono tabelle e grafici relativi alle scoperte dei *NEA* a partire dal 2005. Prima di vedere in particolare quali sono i dati riportati è bene sapere che i diametri degli asteroidi sono dedotti mediante il calcolo della magnitudine assoluta **H**. Per pianeti, comete e asteroidi si usa una differente definizione di magnitudine assoluta, perché quella usata per classificare la luminosità delle stelle sarebbe così bassa da essere ben poco utile. Per questi oggetti, la magnitudine assoluta (**H**) è la magnitudine apparente che l'oggetto avrebbe se si trovasse ad 1 Unità Astronomica sia dal Sole che dalla Terra, con un angolo di fase di zero gradi. L'angolo di fase è l'angolo misurato al centro di un corpo illuminato tra la sorgente luminosa e l'osservatore (insomma, in questo caso si osserverebbe dal centro del Sole). Questo è fisicamente impossibile, ma è conveniente dal punto di vista del calcolo.

Attraverso la magnitudine assoluta **H** possiamo ricavare il diametro dell'asteroide mediante la semplice relazione

$$D = \frac{1329}{\sqrt{p}} 10^{-0,2H} \quad (1)$$

dove p è l'albedo dell'asteroide⁷. Quindi la conversione di H in un diametro per uno specifico oggetto celeste richiede la conoscenza dell'albedo ma per molti oggetti questa grandezza non è nota, dato che dipende da molti fattori quali la composizione chimica, la forma dell'oggetto celeste (non necessariamente sferica), l'angolo di visuale, la struttura superficiale. Prima di poter calcolare il diametro degli asteroidi è necessario determinare una stima dell'albedo. Gli asteroidi molto scuri, di tipo carbonaceo, hanno albedo molto bassa ($p = 0,06$) mentre asteroidi molto luminosi hanno albedo fino a $p = 0,5$. Per asteroidi di tipo S l'albedo media è di 0,20 quindi possiamo stimare i diametri degli asteroidi partendo da questi dati. Ovviamente la stima del numero di asteroidi con diametro pari o superiore ad un chilometro non è estremamente precisa ma, in ogni caso, queste statistiche sono utili per monitorare i progressi annuali che stiamo facendo nel campo della scoperta di nuovi *NEA*.

Il primo grafico, collegato alla prima tabella (Table 1. *NEAs discovered by site*) riporta il numero di *NEA* scoperti, entro intervalli di 6 mesi, da ognuna delle strutture collegate al programma: possiamo notare che la struttura più attiva, a partire dal 2003, è la Catalina Sky Survey (CSS) la quale copre una grande percentuale di nuovi *NEA* scoperti. L'ultima colonna della tabella riporta il numero totale di *NEA* scoperti fino ad oggi (i dati relativi al secondo semestre del 2015 sono parziali, ovviamente).

⁷ Abbiamo già visto che per albedo si intende il rapporto tra la luce incidente e la luce riflessa. Un corpo perfettamente assorbente ha albedo pari a 0 mentre un corpo perfettamente riflettente ha albedo pari a 1.

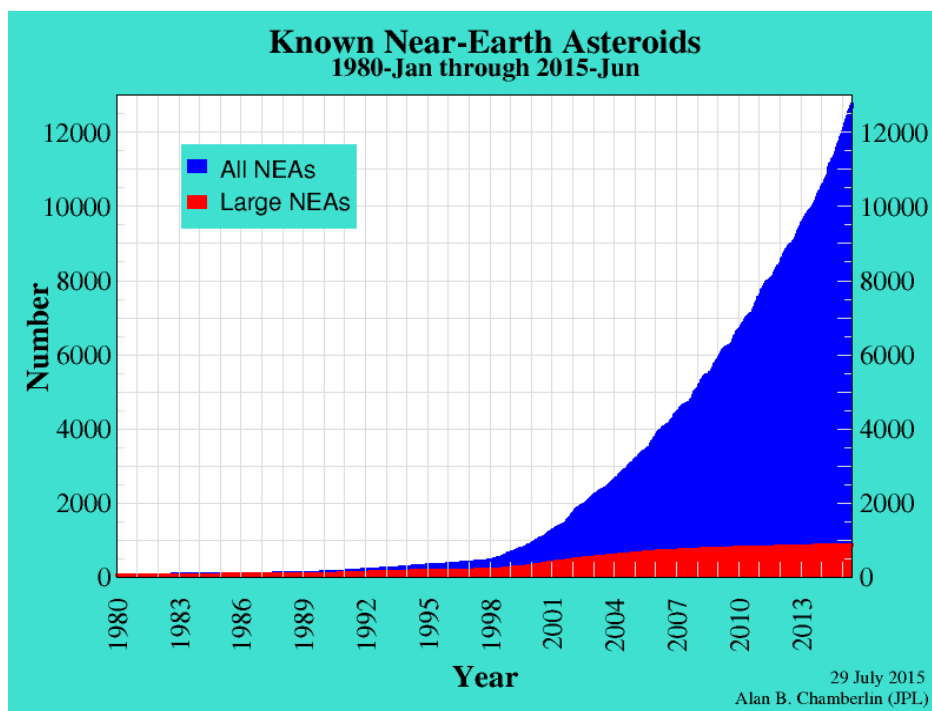


Figura 3.1: evoluzione del numero di NEA conosciuti nel tempo, a partire dal 1980. L'area più scura mostra il numero totale di NEA (indipendentemente dalla dimensione) mentre l'area più chiara mostra il numero di quelli con diametro pari o superiore ad un chilometro (Fonte: sito della NASA <http://neo.jpl.nasa.gov/stats/> [30/09/2015]).

Al 30/09/2015 i *NEA* conosciuti sono 13.036. Il grafico successivo è collegato alla seconda tabella (Table 2. Large *NEAs* discovered by site) e riporta i dati relativi agli asteroidi con dimensione pari o superiore ad un chilometro, scoperti da ogni struttura: al 30 settembre 2015 risultano essere, in totale, 876. In questo caso la struttura più attiva nello scoprire nuovi *NEA* è la *LINEAR*. Il terzo grafico, ancora più interessante, e che riportiamo (vedi Figura 3.1) mostra l'evoluzione del numero di *NEA* scoperti nel tempo, a partire dal 1980. L'area colorata in blu mostra il numero totale di *NEA* (indipendentemente dalla dimensione) mentre l'area rossa mostra il numero di quelli con diametro pari o superiore ad un chilometro. L'ultimo grafico (vedi Figura 3.2) mostra, mediante istogrammi, il numero di *NEA* conosciuti per dimensione. Come già detto, i diametri vengono stimati assumendo una albedo media per i *NEA*.

Di grandissimo interesse è anche l'ultima tabella che mostra il numero totale di *NEO* conosciuti a determinate date.

Per ogni data il numero totale di *NEO* conosciuti viene suddiviso in base alla famiglia di appartenenza (*Amor*, *Aten*, *Apollo*, *PHA*, che abbiamo già visto). Per esempio al 30/09/2015 il numero totale di *NEO* conosciuti è di 13.140 di cui 13.036 esono *NEA* (quindi più del 99% di *NEO* conosciuti sono asteroidi). Di questi 945 appartengono alla classe degli *Aten*, 7.033 alla classe degli *Apollo* e 5.042 alla classe degli *Amor*. Inoltre, di tutti questi "solo" 1.610 vengono definiti *PHA*.

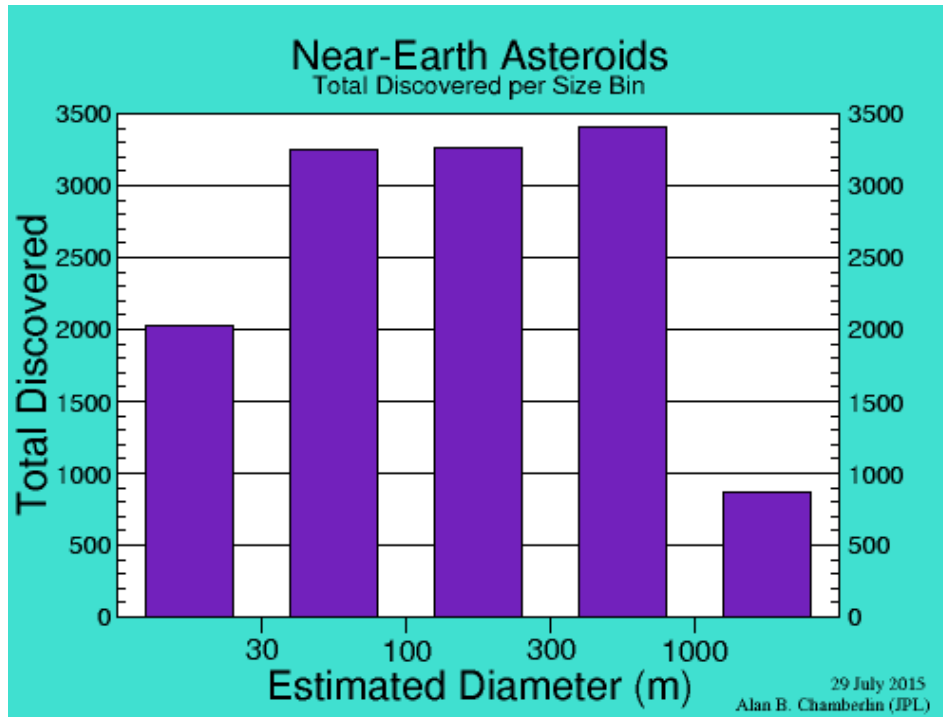


Figura 3.2: grafico ad istogrammi che mostra il numero totale di NEA conosciuti per dimensione. Il primo istogramma rappresenta il numero di NEA con diametro più piccolo di 30 metri. Il secondo rappresenta quelli con diametro da 30 a 100 metri, e così via (Fonte: sito della NASA <http://neo.jpl.nasa.gov/stats/> [30/09/2015]).

La pagina dedicata all'IMPACT RISK riporta una tabella che elenca potenziali futuri eventi di impatto rilevati dal *Sentry* sulla base delle osservazioni attualmente disponibili. *Sentry* è un sistema di monitoraggio di collisione automatico che analizza continuamente il catalogo degli asteroidi per valutare le possibilità di impatto con la Terra nei prossimi 100 anni. Ogni volta che viene rilevato un rischio di impatto non trascurabile il risultato viene immediatamente pubblicato. Ovviamente man mano che nuove osservazioni si rendono disponibili, alcuni oggetti potrebbero essere “espulsi” dalla tabella, in quanto non costituenti più alcun pericolo di impatto. Per questo motivo esiste un elenco di oggetti rimossi, con la data di uscita dalla tabella. La tabella riporta in alto la data dell'ultimo aggiornamento. Per ogni asteroide vengono mostrati il nome assegnato dal *Minor Planet Center*, il periodo (espresso come intervallo fra due anni di riferimento) in cui l'impatto può verificarsi, la probabilità di impatto ed altre informazioni. Ogni riga viene colorata in base al grado di rischio valutato sulla Scala Torino (in azzurro gli oggetti che hanno un diametro inferiore ai 50 metri, in bianco quelli che hanno un rischio 0 sulla Scala Torino e così via). Alla data del 30 settembre 2015 nessun *NEO* supera il grado di rischio 0 della Scala Torino. Inoltre, per ogni oggetto riportato nella tabella c'è un link che rimanda ad una pagina separata che fornisce informazioni tecniche più dettagliate. Il calcolo della probabilità di rischio riportata in tabella è ovviamente il risultato di complessi calcoli matematici.

Il sito della NASA ha ancora moltissime pagine interessanti da studiare ma una analisi completa, in questa sede, porterebbe via troppo tempo. Prima di passare alla descrizione del programma dell'ESA non posso non citare la pagina dedicata alle IMAGES. All'interno di questa pagina ci sono i link ad alcune straordinarie immagini riprese dai satelliti che hanno "incontrato" alcuni asteroidi (vedi il paragrafo relativo alle Missioni Spaziali).

3.1.2 Il NEO Coordination Centre dell'ESA

I rischi provenienti dallo spazio sono numerosi e di diversa natura e possono avere conseguenze negative non solo per la sicurezza della vita umana, ma anche per la sicurezza dei satelliti in orbita, dello spazio aereo e delle infrastrutture (sia nello spazio che a Terra). Fra questi rischi, oltre ai Near Earth Objects, possiamo menzionare anche i *detriti spaziali*⁸ che possono causare problemi, ad esempio, ai satelliti meteorologici e a quelli per le telecomunicazioni e la navigazione con ripercussioni anche di natura economica e strategica, considerati i numerosi servizi e applicazioni utilizzati quotidianamente da una grande parte della popolazione mondiale. L'incremento dei detriti spaziali e la presenza dei NEO hanno dato il via ad una serie di attività finalizzate ad arginare tali rischi. Inoltre, è importante conoscere anche la condizione ambientale della magnetosfera, della ionosfera e della termosfera terrestre in quanto, in tali ambienti, l'attività del Sole e dei venti solari possono influenzare il funzionamento e l'affidabilità dei sistemi e dei servizi spaziali e terrestri. La *Space Situational Awareness (SSA)* è il programma dell'ESA concepito con lo scopo di svolgere servizi di sorveglianza e monitoraggio dei detriti spaziali, dei NEO e dell'attività solare. I tre diversi tipi di pericolo sono stati separati in tre segmenti con tre diversi team che se ne occupano: l'*SST Segment (Space Surveillance and Tracking)* è quello che si occupa della tracciatura dei detriti spaziali e dei sistemi di allerta degli operatori dei satelliti; il *SWE Segment (Space Weather)* si occupa dello studio dell'attività solare ed infine (ed è il caso che ci interessa) il *NEO Segment* si occupa dello studio degli oggetti near-earth. L'attivazione di un programma rivolto 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, lo sviluppo di metodi di deflessione. La chiave di un tale programma sta nella creazione di un centro di coordinamento, chiamato proprio *NEO Coordination Centre*, che utilizza le misurazioni astrometriche raccolte dal *Minor Planet Center*.

⁸ Con il termine *detriti spaziali* o *detriti orbitali* o *spazzatura spaziale* si indica tutto ciò che orbita attorno alla Terra creato dall'uomo e non più utile. Ricadono in questa definizione gli stadi dei razzi, frammenti di satelliti, scaglie di vernici, polveri, materiale espulso dai motori dei razzi, liquido refrigerante rilasciato dai satelliti.

In realtà, come nel caso del JPL della NASA, i dati vengono raccolti dai telescopi e dai sistemi radar sparsi in tutto il mondo che vengono fatti convergere MPC, gestito dalla International Astronomical Union (IAU). Le misure raccolte vengono recuperate dal centro di coordinamento SSA NEO. In caso di previsioni di impatto ad alto rischio, i dati vengono incrociati con il sistema Sentry della NASA. Il NEO CC è situato presso la sede italiana dell'ESA, l'ESRIN (*European Space research Institute*) di Frascati che serve da base centrale di accesso alla rete di sorgenti di dati NEO nell'ambito del programma ESA SSA. Il centro supporta l'integrazione della rete ESA di distribuzione delle informazioni dei NEO. E' anche un punto di riferimento per le attività di studio e ricerca necessarie a migliorare i servizi di allerta sui NEO ed a fornire dati quasi in tempo reale agli istituti scientifici, alle organizzazioni internazionali e agli organi decisionali. All'inizio di quest'anno, dal 13 al 17 Aprile, l'ESRIN ha ospitato la quarta Conferenza sulla *Planetary Defence della International Academy of Astronautic (IAA)*, durante la quale i più grandi esperti mondiali di agenzie spaziali, mondo accademico ed industria hanno presentato le ultime ricerche ed hanno discusso, tra gli altri argomenti, di difesa della Terra rispetto a minacce provenienti dallo spazio, stato delle conoscenze scientifiche degli asteroidi e delle loro caratteristiche fisiche, avvertimento di impatto ed effetti, la risposta civile, l'istruzione. Infine, il centro è collegato in rete con la base dati del NEA dell'Agenzia Spaziale Tedesca (DLR) a Berlino e con la banca dati NEODYS (*Near Earth Objects Dynamic Site*) gestita dalla SpaceDys SRL, una azienda con sede a Cascina, vicino Pisa e formata dallo stesso gruppo di ricerca che ha costruito e gestito NEODYS per 12 anni. Per capire il grande contributo che i ricercatori italiani hanno avuto nello sviluppo del programma dell'ESA per la ricerca e classificazione dei NEO bisogna tornare al 1998 quando, in maniera piuttosto frettolosa, in un comunicato dell'Unione Astronomica Internazionale veniva dichiarato che l'asteroide 1997 XF11 (scoperto pochi mesi prima) avrebbe impattato con la Terra nel giro di pochi decenni. Ovviamente i media di tutto il mondo si gettarono sulla grande notizia non preoccupandosi minimamente di capire come si fosse giunti a calcolare la probabilità di impatto. Calcoli successivi dimostrarono che l'allarmismo creato era (quasi) del tutto infondato ed il cessato allarme si diffuse alla stessa velocità con cui si era diffusa la notizia iniziale. Tutto ciò, oltre alle inevitabili ripercussioni sull'interpretazione del lavoro degli astronomi (che, dal punto di vista dell'opinione pubblica, avevano sbagliato i calcoli), fece nascere l'esigenza di poter usufruire di strumenti matematici ed informatici più "rigorosi" che tenessero conto il più possibile degli innumerevoli effetti perturbativi subiti dagli asteroidi nel loro moto orbitale, soprattutto quelli, come i NEA, che sperimentavano diversi incontri

ravvicinati con i pianeti interni. Tale esigenza fu sentita in maniera particolare all'interno del Dipartimento di Matematica dell'Università di Pisa così che, nel 1999, un gruppo di ricercatori italiani ed americani (Milani, Chesley, Valsecchi) ha risolto il problema del monitoraggio degli impatti con un metodo matematico per la predizione del caos. In quell'anno, quindi, entrò in funzione il sito web *NEODyS*, con la lista di asteroidi che possono impattare la Terra (entro 100 anni). Malgrado il riconoscimento internazionale per il contributo dato, non si ebbe particolare impulso allo sviluppo del programma di monitoraggio fino a quando, nel 2008, l'ESA avviò il già citato programma *Space Situation Awareness (SSA)*. All'inizio doveva riguardare soltanto i detriti spaziali (segmento SST, Valsecchi). Poi vennero aggiunti il segmento Space Weather (SWE, Berilli) e per ultimo, appunto, il segmento NEO. Tornando al team di SpaceDys, l'esperienza di oltre vent'anni nello sviluppo di algoritmi e software per la dinamica spaziale ha permesso loro di creare il prodotto *OrbFit* che viene usato giornalmente dal programma *CLOMON2* per calcolare il livello di rischio per *NEODyS* e da altri progetti.

Anche il sito *NEO CC* dell'ESA <http://neo.ssa.esa.int/> è suddiviso in sezioni ed alcune di esse gestiscono dati di notevole interesse per i paesi membri della Comunità Europea. Innanzi tutto viene data notevole importanza alla comunicazione diretta delle informazioni ai vari stati in modo da poter preparare la cittadinanza ad un eventuale impatto. Infatti viene considerato un fattore fondamentale per la tutela di vite umane (nel caso in cui uno dei *NEO* si trovasse in rotta di collisione con la Terra) la risposta civile, vale a dire le informazioni che le autorità di ogni Stato possono dare ai propri cittadini per prepararsi all'evento. A sua volta l'ESA si assume l'importante compito di analizzare e diffondere le informazioni su probabili impatti alle autorità competenti. A tal proposito si sono già tenute alcune riunioni fra i delegati di ogni nazione per discutere ed eventualmente avviare dei canali adatti al fluire di informazioni di tale importanza (per esempio pensiamo a quelli utilizzati per dare informazioni su forti ondate di maltempo). In questo modo l'ESA ha individuato i "destinatari" di eventuali messaggi di pericolo in modo da innescare reazioni pressoché immediate. Questo obiettivo è riassunto in maniera estremamente chiara in una dichiarazione rilasciata da Nicolas Bobrinsky, responsabile dello Space Situational Awareness dell'ESA: "In caso di minaccia, abbiamo bisogno di stabilire in modo chiaro ruoli e responsabilità per la zona di impatto. Una pianificazione chiara è la chiave per migliorare la sicurezza pubblica".

La valutazione della reale minaccia di impatto rimane uno degli obiettivi più importanti: degli oltre 600.000 asteroidi conosciuti che appartengono al Sistema

Solare, più di 12.000 vengono classificati come *NEO* ma lo sconvolgente impatto avvenuto nel 2013 a Chelyabinsk di un oggetto sconosciuto ha posto drammaticamente l'accento sulla necessità di continuare a ricercare e classificare gli oggetti vicini alla Terra.

Alcune pagine interessanti del sito sono:

- **Tabella dei rischi** (Tabella 3.1) nella quale viene riportata una lista di oggetti con la dimensione (size) in metri, ricavata dalla formula (1) già vista, la data e l'ora previste per l'eventuale impatto (date/time), la probabilità di impatto (IP), il grado di rischio della Scala Palermo (PS), il valore di rischio della Scala Torino (TS), la velocità relativa di impatto (km/s) e da quanti giorni l'oggetto è presente nella lista. Al 30/09/2015 il numero totale di oggetti presenti nella risk list è di 521, tra cui compare anche il famigerato 99942 Apophis: questo asteroide ha causato un breve periodo di allarme nel dicembre 2004, poiché le osservazioni iniziali indicavano una probabilità relativamente alta di collisione con la Terra nel 2029. Le osservazioni successive hanno permesso una determinazione dell'orbita più precisa, abbassando la probabilità di collisione. Infatti nella tabella vediamo che, attualmente, il grado di rischio della Scala Torino è pari a 0.

Object Name	Size [m]	Date/Time	IP	PS	TS	Vel. [km/s]	In list since [days]
410777 2009FD	160.0*	2185-03-29 18:06	1/369	-0.43	n/a	19.41	1742
101955 Bennu	200.0	2196-09-24 07:55	1/10638	-2.32	n/a	12.68	2347
2010RF12	9.0*	2095-09-05 23:50	1/11	-3.11	0	12.29	1760
1979XB	830.0*	2056-12-12 21:39	1/3.7E6	-3.23	0	27.54	12978
2008UB7	71.0*	2060-10-31 19:06	1/10482	-3.29	0	21.57	2466
2010MZ112	460.0*	2041-02-17 04:52	1/729927	-3.39	0	11.31	1847
2010DG77	220.0*	2047-01-12 04:39	1/97087	-3.44	0	11.49	1935
2009JF1	16.0*	2022-05-06 08:12	1/2906	-3.57	0	26.41	2276
2000SG344	46.0*	2071-09-16 00:55	1/2057	-3.62	0	11.27	5429
99942 Apophis	270.0	2068-04-12 15:13	1/531914	-3.67	0	12.62	3838

Tabella 3.1 La lista degli oggetti potenzialmente a rischio di impatto (Fonte: sito dell'ESA <http://neo.ssa.esa.int/web/guest/risk-page> [30.09.2015])

- **Lista della priorità** (vedi Tabella 3.2) vale a dire la pianificazione di osservazioni di *NEO*, soprattutto quelli di recente scoperta, in base all'appartenenza ad una delle seguenti categorie: urgenti (UR), necessarie (NE), utili (US), a bassa

priorità (LP). Oltre alla data di inserimento vengono riportate le coordinate e la magnitudine dell'oggetto e la data della fine di visibilità.

Priority List								
Priority	Object	Inserted	R.A.	Decl.	Elong.	Magn.	Sky uncert.	End of Visibility
UR	2012RB3	2015-09-21	18h34m	-7.0	100	20.9	24246	2015-10-12
UR	2012TT5	2015-09-21	06h40m	-62.3	85	18.9	42259	2015-11-02
UR	2013JR22	2015-09-21	23h47m	22.9	156	20.3	1607	2015-10-25
NE	2015FB36	2015-09-21	20h55m	-45.4	121	21.1	3	2015-10-11
NE	2015FZ344	2015-09-21	23h30m	-6.6	172	21.7	3	2015-09-29
NE	2015OM21	2015-09-21	00h03m	23.4	156	21.3	1	2015-10-11
US	2013VC13	2015-09-21	03h28m	20.8	123	19.3	1	2015-12-14
US	2014MZ17	2015-09-21	22h36m	17.2	154	20.4	1	2015-10-17
US	2015CZ13	2015-09-21	22h36m	-22.0	151	21.4	0	2015-10-05
LP	2015JH2	2015-09-21	00h35m	-12.6	164	21.1	0	2015-10-09
LP	2015KB19	2015-09-21	22h18m	33.8	139	20.3	0	2015-10-26
LP	2015KK122	2015-09-21	21h41m	2.2	147	21.5	0	2015-10-02
LP	2015MF95	2015-09-21	21h35m	-4.1	145	20.1	0	2015-11-01
LP	2015PR	2015-09-21	23h46m	-10.1	170	18.6	0	2015-12-23
LP	2015PS	2015-09-21	22h28m	11.5	155	18.9	0	2016-01-04
LP	2015RQ150	2015-09-21	03h55m	-5.8	120	20.9	1	2015-12-13

Tabella 3.2 Esempio della lista delle priorità. I dati sono estratti da una lista che riporta oltre un centinaio di oggetti da controllare. (Fonte: sito dell'ESA <http://neo.ssa.esa.int/web/guest/priority-list> [22.09.2015])

Recent close approaches to Earth						
1 AU = ~150 million kilometers						
1 LD = Lunar Distance = ~384000 kilometers						
Object Name	Close Approach Date	Miss Distance [AU]	Miss Distance [LD]	Estimated Diameter [m]	H [mag]	Relative Velocity [km/s]
2015SM	2015-Sep-18	0.0103	4.015	9.0*	28.375	5.4055
2015SE	2015-Sep-20	0.0107	4.1808	22.0*	26.359	10.0203
2015SP2	2015-Sep-20	0.0386	15.0163	41.0*	25.033	11.4194
2015SK7	2015-Sep-22	0.0002	0.0692	7.0*	28.79	13.6963
2015SU	2015-Sep-23	0.0379	14.7592	35.0*	25.368	8.9222
2015SV6	2015-Sep-25	0.0059	2.3089	12.0*	27.705	17.969
2015RU36	2015-Sep-26	0.0377	14.6833	38.0*	25.203	12.3624
2008HD2	2015-Sep-29	0.0417	16.2129	41.0*	25.055	12.9688
2015ST6	2015-Sep-29	0.0265	10.3303	56.0*	24.381	18.095

Tabella 3.3 Esempio della lista degli incontri ravvicinati fra la Terra ed alcuni oggetti avvenuti negli ultimi 10 giorni dalla data di rilevamento. I dati sono estratti da una lista che riporta gli incontri avvenuti negli ultimi 30 giorni. (Fonte: ESA <http://neo.ssa.esa.int/web/guest/close-approaches> [30.09.2015])

- **Incontri ravvicinati.** Nella pagina vengono riportate due liste: una relativa agli incontri ravvicinati tra la Terra ed i *NEO* già avvenuti nei 30 giorni precedenti la data di aggiornamento del sito (Tabella 3.3) ed una relativa a quelli che avverranno nei giorni e mesi successivi (fino ad un anno, Tabella 3.4). Per ogni oggetto viene riportata la data dell'incontro, la distanza (in Unità Astronomiche AU ed in Distanze Lunari LD), il diametro approssimativo, la magnitudine e la velocità relativa.

Upcoming close approaches to Earth						
1 AU = ~150 million kilometers						
1 LD = Lunar Distance = ~384000 kilometers						
Object Name	Close Approach Date	Miss Distance [AU]	Miss Distance [LD]	Estimated Diameter [m]	H [mag]	Relative Velocity [km/s]
2015RF36	2015-Sep-30	0.0374	14.5652	96.0*	23.197	4.3301
2015SO2	2015-Sep-30	0.0369	14.3551	69.0*	23.916	5.9258
2015SZ2	2015-Sep-30	0.0034	1.3151	34.0*	25.45	6.139
2015SU16	2015-Oct-01	0.0402	15.6499	43.0*	24.927	9.6025
2000SM10	2015-Oct-02	0.0301	11.7015	50.0	23.721	12.9108
2012CL19	2015-Oct-03	0.0447	17.395	150.0*	22.19	9.5023
2015SR	2015-Oct-03	0.0377	14.6844	52.0*	24.522	11.6768
2015FS332	2015-Oct-04	0.0477	18.5644	900.0*	18.355	21.1478
2009TK	2015-Oct-05	0.0451	17.5501	150.0*	22.267	11.0589
2010SX11	2015-Oct-09	0.0415	16.1581	45.0*	24.829	7.796
2015SZ	2015-Oct-10	0.0467	18.1722	86.0*	23.451	7.6245
2015HR182	2015-Oct-13	0.0476	18.5248	280.0*	20.904	20.2734
2011SE97	2015-Oct-18	0.0307	11.9482	48.0*	24.701	12.8797
2014UR	2015-Oct-18	0.0098	3.8133	20.0*	26.607	4.3975
410777 2009FD	2015-Oct-29	0.0419	16.3006	160.0*	22.134	16.923
2005TH50	2015-Nov-12	0.0278	10.8223	11.0*	28.003	4.1455
413577 2005UL5	2015-Nov-20	0.0153	5.9465	400.0*	20.088	18.9931
2011WN69	2015-Nov-23	0.0446	17.3635	24.0*	26.195	22.6829
2009WB105	2015-Nov-25	0.0386	15.0293	93.0*	23.281	18.8769
2010XA25	2015-Dec-06	0.0114	4.4286	18.0*	26.796	7.579
33342 1998WT24	2015-Dec-11	0.028	10.8948	415.0	17.912	8.5112
2015MW53	2015-Dec-18	0.0463	18.0315	220.0*	21.429	20.0424
1995YR1	2015-Dec-23	0.0435	16.9184	420.0*	20.005	30.4524
2011YD29	2015-Dec-25	0.0222	8.6309	24.0*	26.244	6.9498
2011YE40	2015-Dec-31	0.0358	13.9422	39.0*	25.14	12.7135

Tabella 3.4 Esempio della lista degli incontri ravvicinati che avverranno fino alla fine dell'anno 2015. I dati sono estratti da una lista che riporta gli incontri che avverranno fino ad un anno dalla data di aggiornamento del sito. (Fonte: ESA <http://neo.ssa.esa.int/web/guest/close-approaches> [30.09.2015])

3.2 Missioni spaziali verso asteroidi

Prima di vedere in dettaglio quali sono le maggiori missioni spaziali (terminate o ancora attive) vorremmo richiamare l'attenzione su una missione che ancora non è stata avviata ma che racchiude in sé l'obiettivo principale che la comunità scientifica vuole raggiungere in tempi piuttosto brevi. Supponiamo che un asteroide in rotta di collisione con la Terra venga scoperto con un certo anticipo: quali sarebbero, di fatto, gli strumenti a nostra disposizione per prevenire l'impatto? Purtroppo se le sue dimensioni fossero superiori al chilometro di diametro non avremmo possibilità di deviarlo, con le tecnologie attualmente a nostra disposizione. Se, invece, si trattasse di un oggetto di dimensione più contenuta, ed avendo a disposizione un certo margine di tempo per intervenire, potremmo valutare l'ipotesi di deviarlo dalla sua traiettoria. Proprio per sperimentare la fattibilità di un tale intervento è stata progettata l'ambiziosa missione *Asteroid Impact & Deflection Assessment - AIDA* (tra le altre cose l'annuncio dell'inizio dello studio è stato dato proprio durante la conferenza della Planetary Defence) una missione congiunta tra la NASA e l'ESA, che contribuiranno in modo diverso all'obiettivo principale. L'obiettivo scelto per fare questo "esperimento" è l'asteroide binario (65803) Didymos, un *NEA* composto da un corpo principale del diametro di circa 800 metri e da un corpo secondario che gli orbita intorno ad una distanza di circa 1,2 chilometri e di diametro pari a circa 170 metri e che nel 2022 passerà a soli 0,11 UA dalla Terra. La missione AIDA sarà composta da due parti, la prima delle quali sarà di competenza dell'ESA e prenderà il nome di *Asteroid Impact Mission - AIM*. Il lancio di *AIM* è previsto per ottobre 2020 a bordo di un vettore russo e dopo un viaggio di circa un anno e mezzo raggiungerà l'asteroide affiancandolo nella sua orbita intorno al Sole, effettuando una serie di osservazioni del sistema binario che permetteranno di determinare un modello 3D dei due oggetti, la loro massa ed il loro stato dinamico. Verranno anche studiate le loro superfici mediante una camera infrarossa termica ed un radar ad alta frequenza. Dopo questa prima fase di studio (che dovrebbe durare circa due mesi) la *AIM* rilascerà alcuni *CubeSats* (satelliti miniaturizzati in forma cubica del peso di circa 1,33 kg) ed un modulo di atterraggio per prelevare campioni da analizzare. A questo punto dovrebbe entrare in gioco la seconda parte della missione, curata dalla NASA, che si chiamerà *Double Asteroid Redirection Test, DART*. Il *DART* è un proiettile di circa 300 kg di massa che verrà fatto impattare ad una velocità superiore ai 22.000 km/h contro il corpo secondario. Tale impatto dovrebbe modificare lievemente la velocità dell'asteroide e di conseguenza anche la sua traiettoria orbitale. Circa due settimane prima dell'impatto il veicolo *AIM* sarà posto ad una distanza di circa 100 km dall'asteroide per permettergli di studiare i materiali eiettati durante la collisione

ed analizzare il cratere formatosi. Come già detto si tratta di un progetto ambizioso che potrebbe essere alla portata delle tecnologie di cui disponiamo ma l'ultima parola per la realizzazione della missione verrà data dai ministri europei della ricerca che dovranno decidere se finanziarla o meno.

Prima di arrivare a programmare una missione così ambiziosa, gli enti spaziali di tutto il mondo hanno, di volta in volta, realizzato missioni di avvicinamento e studio di asteroidi per mezzo di sonde senza equipaggio, lanciate in orbita a partire dalla fine del secolo scorso. L'impegno profuso nello studio dei Corpi Minori del Sistema Solare potrebbe apparire esagerato ma è necessario tenere presente la duplice importanza che queste missioni ricoprono: da un lato abbiamo l'opportunità di studiare l'origine e l'evoluzione del Sistema Solare e dall'altro sono necessarie per comprendere fino a che punto la razza umana può spingersi nell'esplorazione spaziale (le missioni verso i corpi minori rappresentano una notevole occasione per raggiungere sviluppi tecnologici di grande rilievo nel campo della robotica e della propulsione). Vediamo quali sono le missioni spaziali che hanno raggiunto e studiato alcuni asteroidi.

Sonda Galileo: è stata la prima sonda ad avvicinarsi ad un asteroide. Lanciata il 18 ottobre 1989 la sonda aveva come obiettivo primario Giove (che raggiunse dopo un viaggio di oltre 6 anni attraverso l'ausilio gravitazionale di Venere e Terra). Il 29 ottobre del 1991 la sonda passò a circa 1.600 chilometri da 951 Gaspra, un asteroide di tipo S, asimmetrico, di dimensioni 12 x 16 chilometri. Vennero riprese diverse immagini dell'asteroide e le osservazioni permisero di calcolare la sua veloce rotazione (meno di sette ore per compiere un giro completo su se stesso) oltre alla presenza di molti crateri da impatto sulla sua superficie. Inoltre è stato misurato un fortissimo campo magnetico che gli scienziati hanno attribuito ad una massiccia presenza di ferro e nichel nel nucleo dell'asteroide. Il 23 agosto 1993 la sonda si è avvicinata fino a 2.400 km da un altro asteroide, 243 Ida. Ida ha un diametro di circa 52 km e la sua superficie è apparsa ancora più craterizzata rispetto a quella di Gaspra. la scoperta più straordinaria è stata l'individuazione di un piccolo satellite di circa 1,5 km di diametro, battezzato Dactyl. Si tratta della prima scoperta in assoluto di un asteroide con un satellite.

NEAR-Schoemaker. La missione Near Earth Asteroid Rendez-vous (NEAR), ribattezzata NEAR-Shoemaker in seguito alla morte del grande geologo planetario E. Shoemaker, tragicamente scomparso nel 1997 in un incidente stradale, è stata la prima della serie di missioni scientifiche del programma Discovery della Nasa. Lanciata il 17 febbraio 1996 aveva come obiettivo raggiungere e studiare in modo

prolungato un asteroide near-Earth. Tra tutti i possibili candidati fu scelto 433 Eros perché, sebbene la sua orbita non incroci mai quella terrestre, era il secondo NEA per dimensioni dopo 1036 Ganymed e il primo ad essere scoperto nel 1898. Gli obiettivi primari della missione erano di determinare dimensioni, forma, massa, densità, moto di rotazione, morfologia e composizione superficiale di Eros. Durante il viaggio di avvicinamento a Eros la sonda ha avuto l'opportunità di visitare un altro asteroide della Fascia Principale: 253 Mathilde. Questo asteroide è formato prevalentemente da materiali carbonacei (è di classe C) ed ha un colore estremamente scuro (riflette soltanto fra il 3 ed il 4% della luce che riceve dal sole). Il primo tentativo di avvicinamento a Eros, nel dicembre del 1998 fallì a causa della mancata accensione del motore che doveva rallentare la sonda. L'operazione fu ripetuta, con successo, il 14 febbraio 2000 e la superficie di Eros fu analizzata da appena 35 km di distanza. Oltre ad ottenere immagini ad altissima risoluzione della superficie (furono inviate a Terra decine di migliaia di immagini) la sonda permise di calcolare le dimensioni di Eros (34 x 13x13 km) e le analisi effettuate dagli spettrometri a raggi x e gamma indicarono che Eros aveva una composizione primitiva e relativamente poco alterata. Sembrerebbe quindi formato da materiale originario del disco proto planetario. Dopo un anno passato a orbitare attorno all'asteroide, il 12 febbraio 2001 venne tentato un atterraggio sulla superficie che avvenne con successo e permise di raccogliere ulteriori dati durante la fase di avvicinamento, che venivano immediatamente mandati a Terra. La sonda continuò a mandare dati anche dopo l'atterraggio e fu definitivamente spenta (con comando da Terra) il 28 febbraio 2001.

Missione Hayabusa. Si tratta di una missione congiunta tra l'ente spaziale giapponese JAXA e la NASA. Fu lanciata nel 2003 ed aveva come obiettivo 25143 Itokawa, un asteroide appartenente al gruppo "Apollo", che raggiunse nel 2005 dopo un viaggio di quasi 300 milioni di km. Oltre ad analizzare l'asteroide con gli strumenti a bordo (da ricordare lo spettrometro ad infrarossi) la sonda avrebbe dovuto anche planarvi sopra recuperando alcuni campioni di rocce per riportarli a Terra. La prima parte della missione fu sostanzialmente un successo, in quanto le analisi della superficie dell'asteroide rilevarono che la composizione mineralogica di Itokawa era molto simile a quella delle meteoriti più comuni recuperate sulla Terra, ovvero **le condriti ordinarie** che provengono proprio da asteroidi di tipo S (dove S, come già visto, sta per rocce silicacee e di cui Itokawa è un rappresentante) e che, per la maggior parte, sono situati nelle regioni interne e centrali della Fascia Principale. Le condriti sono frammenti rocciosi all'interno dei quali si trovano piccoli aggregati sferici, detti **condrule**, che si ritiene abbiano avuto origine durante le primissime fasi

evolutive del Sistema Solare, ma i cui meccanismi di formazione sono ancora sconosciuti. Purtroppo la stessa fortuna non accompagnò la sonda durante il recupero dei campioni: infatti subì notevoli danni durante i vari tentativi di abbordaggio dell'asteroide e, durante la sua permanenza di 30 minuti, avvenuta nel novembre 2005, un malfunzionamento di uno dei dispositivi di frantumazione non permise l'ingresso nella capsula di una grande quantità di materiale, ponendo il dubbio su quel che la sonda potesse aver effettivamente raccolto. Inoltre la capsula con i campioni avrebbe dovuto rientrare sulla Terra nel 2007, ma ciò non avvenne. Con le batterie scariche, il carburante quasi del tutto esaurito ed i motori in avaria, la capsula di rientro dei campioni (insieme alla sonda madre) riuscì a penetrare nell'atmosfera terrestre solo il 13 giugno 2010: la capsula, dotata di scudo termico, atterrò con paracadute in Australia, mentre la sonda madre si incenerì durante la fase di attraversamento dell'atmosfera. La capsula venne recuperata da una delle squadre che avevano seguito la fase di atterraggio e portata presso i laboratori dell'ente spaziale giapponese per essere aperta e per analizzarne il contenuto. Un esame radiografico effettuato prima dell'apertura esclude la presenza di parti solide più grosse di un millimetro. Esaminando l'interno della capsula, si riscontrarono tracce di polvere e gli scienziati cercarono di capire se si trattava di particelle asteroidali o se invece si trattava di contaminazioni terrestri, sfuggite ai rigorosissimi controlli pre-apertura della capsula. Il 26 agosto 2011, i risultati delle analisi sui campioni raccolti sono apparsi in sei articoli su *Science*: gli scienziati suggerivano che i campioni raccolti probabilmente erano parte in origine di un asteroide di dimensioni maggiori. Grazie ai risultati ottenuti dalle analisi delle polveri di Itokawa abbiamo avuto la conferma che gli asteroidi di tipo S e le condriti ordinarie hanno la stessa composizione mineralogica. Dalle polveri è stato inoltre possibile stabilire che in passato questo materiale è stato esposto per lunghi periodi a temperature altissime, di circa 800° C. Sono inoltre stati fatti interessanti confronti fra questa polvere e quella lunare, recuperata nell'ambito delle missioni *Apollo*. Proprio su questo punto c'è un altro confronto da fare, di tipo tecnologico: 40 anni fa, per analizzare i campioni lunari, ne erano necessari chili, oggi bastano granelli di polvere che pesano miliardesimi di grammo per ottenere una mole notevole di informazioni.

Deep Space 1: è una sonda spaziale della NASA, lanciata il 25 ottobre 1998. Fu una delle prime sonde equipaggiate con un nuovo prototipo di motore a ioni. La missione primaria consisteva nel testare nuove tecnologie spaziali ma erano previste anche attività di osservazione e raccolta di immagini dell'asteroide 9969 Braille, raggiunto a luglio del 1999. Questa parte della missione non andò a buon fine: oltre a misurare le dimensioni dell'asteroide ed a verificare l'eventuale presenza di un

campo magnetico, la sonda non riuscì ad effettuare altre operazioni, andando in standby per problemi di software.

Rosetta: interamente progettata e gestita dall'ESA, la sonda fu lanciata il 2 marzo 2004. Il suo obiettivo è studiare l'origine delle comete e le relazioni tra la loro composizione e la materia interstellare, quali elementi fondamentali per comprendere l'origine del Sistema Solare. Per questo ha come obiettivo principale l'indagine dettagliata sulle caratteristiche della cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko, che scorterà nel suo transito vicino al Sole dopo essere entrata nella sua orbita e aver rilasciato un lander sulla sua superficie. L'esplorazione della cometa consiste nella caratterizzazione del suo nucleo e della chioma, la determinazione delle loro proprietà dinamiche, lo studio della morfologia e della composizione. In particolare, lo studio della mineralogia e dei rapporti isotopici degli elementi volatili e refrattari del nucleo fornirà informazioni preziose sulla composizione della nebulosa che, nei modelli correnti, si pensa sia stata all'origine del Sistema Solare. Per raggiungere questi obiettivi la navicella ha orbitato a lungo attorno alla cometa, seguendola nel suo viaggio di avvicinamento (e poi di allontanamento dal Sole) mentre il lander Philae, atterrato sulla cometa, ha il compito di effettuare misure in-situ e di campionare del materiale alla superficie del nucleo per una analisi chimico-mineralogica dettagliata. Nel corso del suo lungo viaggio di avvicinamento alla cometa, il 5 settembre 2008 Rosetta è transitata ad una distanza minima di circa 800 km da un piccolo asteroide della Fascia Principale, 2867 Steins, un oggetto di circa 5 km di diametro e dalla forma di diamante. Appartiene alla poco comune classe spettrale E che raccoglie asteroidi di ridotte dimensioni che orbitano principalmente nella parte interna della fascia. La sua superficie è caratterizzata da un grande cratere di 2,1 km di diametro e da una catena di sette crateri. Sono stati contati 23 crateri con un diametro superiore ai 200 m, testimonianza di una complessa storia di impatti. Successivamente, proseguendo il suo viaggio verso la cometa, il 10 luglio 2010, la sonda ha sorvolato l'asteroide 21 Lutetia, un asteroide, anch'esso della Fascia Principale, di circa 100 km di diametro e di forma irregolare. Il fly-by è avvenuto ad una distanza minima di 3162 km. Si è trattato di un avvicinamento piuttosto importante, poiché Lutetia non è soltanto il più grande asteroide metallico conosciuto ma è anche il primo visitato da una sonda. La composizione di Lutetia lasciava perplessi gli astronomi per cui erano state avviate diverse indagini in vista del volo ravvicinato di *Rosetta* del 2010. Nonostante sia stato classificato come asteroide di tipo M, Lutetia sembra essere piuttosto anomalo perché non mostra molte tracce di metalli sulla sua superficie. Lutetia ha una elevata densità (pari a $3,4 \text{ g/cm}^3$) e la superficie ha una composizione uniforme, che non appare essere stata modellata

dall'acqua. È ricoperto di uno strato di polvere molto fine ed omogeneo. Le temperature medie oscillano tra 63 e 245 K.

La partecipazione italiana alla missione Rosetta è molto forte in quanto proprio il nostro paese ha fornito sofisticati strumenti, sia a per la sonda che per il lander. In particolare, per quanto riguarda la sonda, sono stati forniti il VIRTIS (Visual InfraRed and Thermal Imaging Spectrometer) da parte dell'INAF di Roma (Dott. Fabrizio Capaccioni), l'IAPS GIADA (Grain Impact Analyser and Dust Accumulator) dall'Università "Parthenope" di Napoli (Dott.ssa Alessandra Rotundi) e la WAC (Wide Angle Camera) di OSIRIS dell'Università di Padova (Prof. Cesare Barbieri). A bordo del lander è italiano il sistema di acquisizione e distribuzione dei campioni: Sample Drill&Distribution (SD2) che rappresenta un elemento di elevata miniaturizzazione, condensando in appena 4 kg tecnologie ad altissime prestazioni. SD2 è in grado di resistere a condizioni ambientali proibitive, per penetrare il nucleo della cometa sino a 20 cm di profondità. Un meccanismo sofisticato consente di distribuire i campioni prelevati (diametro di circa 2,5mm) in appositi contenitori in modo da rendere possibile lo studio delle proprietà mediante alcuni degli strumenti a bordo del lander. Il funzionamento del sistema SD2 è regolato da un software sofisticato, installato nel computer di bordo del lander.

Dawn: questa missione fa parte del programma Discovery della NASA. Si tratta della prima sonda ad orbitare intorno a due diversi corpi celesti avendo, infatti, come obiettivi principali due dei maggiori oggetti della Fascia Principale: il pianeta nano 1 Cerere e l'asteroide 4 Vesta. I due corpi celesti hanno caratteristiche peculiari molto diverse tra loro, più precisamente opposte, e questo faceva pensare che si siano formati in regioni diverse del Sistema Solare. Cerere potrebbe essersi formato in un ambiente freddo e "bagnato" e potrebbe avere acqua negli strati sottostanti la superficie mentre Vesta potrebbe essere nato in un ambiente caldo ed asciutto e mostrerebbe tracce di vulcanismo interno. Il 22 luglio 2011 la sonda si inserisce in un'orbita intorno a Vesta a circa 5.200 km di quota e comincia a scandagliare il corpo sottostante. Il risultato della missione su Vesta risulteranno immagini del 90% della superficie e spettri del 63%. Dal 6 marzo di quest'anno la sonda si trova in orbita intorno a Cerere ed alla fine del mese di agosto aveva completato la sua dodicesima rivoluzione sul versante soleggiato di Cerere. A distanza di poco più di due secoli dalla sua scoperta questo pianeta nano verrà mappato con grande precisione da Dawn. La sonda, secondo il sito della NASA, è impegnata in una intensa attività di osservazione e mappatura della superficie dell'asteroide. Per avere una idea del grande risultato già raggiunto, fino a questo momento, basti pensare che

per avere la stessa definizione di immagini dovremmo utilizzare un telescopio di diametro pari a 217 volte quello di Hubble! Attualmente Dawn si trova ad una altezza dalla superficie di Cerere tale per cui la sua fotocamera riesce ad inquadrare delle aree di circa 140 km di lato, meno dell'uno per cento dell'area totale da mappare. I parametri orbitali sono stati scelti appositamente in modo tale da permettere a Dawn di fotografare tutta la superficie in una dozzina di cicli orbitali.. Concludiamo sottolineando che l'Italia ha contribuito alla missione fornendo uno strumento chiamato VIR (Virtual ed Infrared Spectrometer) realizzato da un gruppo di ricercatori dell'Istituto Nazionale di Astrofisica e dalla società Galileo Avionica. Il VIR è uno strumento in grado di misurare quanta radiazione di differenti colori viene riflessa o emessa da un corpo celeste. Analizzerà, quindi, la componente visibile ed infrarossa della radiazione solare riflessa dalla superficie di Cerere (come fatto per Vesta) e la sua intensità al variare della lunghezza d'onda. Ma il vero obiettivo di Dawn è ancora più ambizioso: non si limiterà solo a scattare foto e registrare spettri nell'infrarosso e nel visibile della superficie di Cerere: i cicli di mappatura completa verranno effettuati ciascuno ad un angolo leggermente diverso in modo da ottenere, combinandole tra loro, immagini tridimensionali.

CONCLUSIONI

Per molto tempo gli asteroidi sono stati considerati solo semplici rocce disseminate nello spazio, poco interessanti e per nulla affascinanti, e per i quali non veniva riconosciuta alcuna ragione valida per investire tempo e tecnologie in programmi di ricerca ed osservazione a loro dedicati. Solo negli ultimi decenni, e soprattutto grazie alla spinta data dall'interesse di alcuni pionieri del settore, come Eugene Merle Shoemaker, si è cominciato a rivalutare l'importanza di questi corpi. Come abbiamo visto, la ricerca dell'origine del Sistema Solare ha portato gli scienziati a volgere la loro attenzione al di fuori della Terra perché qualsiasi indagine, per quanto accurata, deve arrestarsi di fronte ad un orizzonte degli eventi terrestri, costituito dal momento in cui l'intero pianeta era poco più di una massa fusa in continua trasformazione. Sconvolgimenti di straordinaria potenza hanno rimescolato la materia facendo perdere completamente le informazioni riguardanti il materiale originario da cui aveva preso forma. I corpi minori del Sistema Solare, quindi, assumono il ruolo di "testimoni" del nostro passato: le loro caratteristiche chimiche ed isotopiche sono state poco modificate (o per niente) da processi di differenziazione e di evoluzione termica su larga scala e quindi conservano ancora oggi, al loro interno, le preziose informazioni relative alla composizione della nebulosa primordiale. Inoltre sappiamo che alcuni di questi corpi minori possono rappresentare un pericolo per i pianeti dei quali incrociano le orbite, ivi inclusa la Terra. Basti guardare la Luna, che porta sulla superficie i segni di una intensa attività di bombardamento da parte di corpi di diverse dimensioni. Anche se la Terra ha in parte cancellato i segni di collisioni con corpi extraterrestri, sappiamo per certo che il nostro pianeta non è stato immune a questo tipo di eventi, a volte anche di grandi proporzioni e con gravi conseguenze. E questo porta ad una domanda: può succedere ancora? La risposta è decisamente affermativa ma non tale da creare un allarme incontrollato. I corpi che possono

rappresentare un reale pericolo di impatto con la Terra sono solo una piccola frazione della famiglia dei Near Earth Object, cioè quelli che, per le loro caratteristiche dinamiche, possono entrare in rotta di collisione con il nostro pianeta. Quindi che cosa è possibile fare e che cosa stiamo facendo per prevenire il rischio rappresentato dagli asteroidi? Il primo passo consiste nella ricerca, individuazione e determinazione accurata della loro orbita al fine di permettere la previsione degli incontri ravvicinati e delle eventuali collisioni. Abbiamo visto che sono già attivi alcuni programmi di ricerca e di monitoraggio e che esiste una rete che mette a disposizione i dati relativi alle osservazioni. A distanza di poco più di cento anni dalla scoperta del primo Near Earth Asteroid (Eros, 1898) la ricerca di questi oggetti non si è mai fermata, inizialmente ad un tasso molto lento (basti pensare che nel 1950 erano conosciuti solo 13 asteroidi e tutti scoperti in modo accidentale!) e poi ad un ritmo sempre più rapido, supportato anche dall'introduzione, alla fine del secolo scorso, delle nuove tecniche di registrazione dei dati (vedi i CCD) e di elaborazione.

A questo punto è necessario fare un passo avanti: conosciamo il pericolo, lo stiamo studiando da diversi anni ed abbiamo sviluppato tecniche matematiche ed informatiche in grado di aiutarci a calcolare e prevedere l'evoluzione delle orbite dei *NEO* per gli anni a venire. In caso di allarme di rischio di impatto, quali sono le azioni che possiamo mettere in atto per evitare un impatto o per mitigarne gli effetti? Attualmente ci sono due tipi di proposte: cambiare l'orbita del *NEO*, in modo da evitare l'impatto, oppure frammentarlo in modo che i frammenti siano piccoli abbastanza da creare danni minimi. La variazione dell'orbita del *NEO* può essere ottenuta a sua volta in due modi diversi: con un metodo veloce o cinetico (nel quale un intercettatore collide con l'oggetto ed il momento risultante fa variare la sua velocità o l'esplosione di una testata all'interno o sulla superficie) o con metodo lento (approcci senza contatto ma protratti nel tempo).

Inoltre è necessario anche identificare le azioni in base al tempo a disposizione: se vi è un precoce allarme di impatto, ci sarà più tempo per poter intervenire; se il rischio di impatto è stato rilevato relativamente tardi, il tempo per intervenire è minore. Va anche detto che esiste il rischio fondato che le tecniche di mitigazione non riscuotano il successo sperato oppure che il *NEO* in oggetto sia talmente grande che, anche scoperto con un certo anticipo, non sia possibile intervenire in alcun modo. E' già stato individuato un certo numero di tecniche per tentare di variare le orbite degli asteroidi: se il corpo si trovasse lontano dalla Terra, la sua traiettoria potrebbe essere modificata con un minimo dispendio di energia, intervenendo sulla sua velocità lungo l'orbita, con il risultato di farlo arrivare nel punto di incontro con la Terra in

anticipo o in ritardo rispetto al momento del transito del nostro pianeta. Con un preavviso di molti anni o decine di anni, una variazione di pochi cm al secondo nella velocità orbitale del *NEO* potrebbe portare al risultato cercato. Esistono diversi approcci lenti, fra i quali possiamo citare, a titolo di esempio: il **rimorchiatore** (un attracco sul *NEO* da parte di un veicolo spaziale equipaggiato con propulsore che lo spinge delicatamente lungo il suo vettore velocità), il **trattore gravitazionale** (una variante del rimorchiatore, permette di evitare l'attracco sul *NEO* semplicemente facendo orbitare la sonda vicino ad esso mantenendolo ad una quota costante: l'attrazione gravitazionale reciproca provocherà una variazione di velocità del *NEO*) o il **laser ablation** (applicare una spinta lenta utilizzando un sistema di proiezione laser sufficientemente intenso da causare l'ablazione superficiale ed espulsione di plasma, la cui forza di reazione si tradurrebbe in una variazione di velocità). Esistono anche due possibili azioni veloci: non-nucleari e nucleari. Il principale approccio non-nucleare è un semplice impatto-speronamento da parte di una sonda, a velocità relativamente alta in modo da fornire una variazione istantanea di velocità del *NEO* dovuta alla variazione di energia e di momento. Le tecnologie ed i sistemi sono essenzialmente gli stessi già usati per l'esplorazione planetaria e solare. Se, invece, il *NEO* è di grandi dimensioni, oppure è piccola, ma il tempo di preavviso è poco, c'è un unico altro modo per cercare di variare l'orbita: usare un dispositivo nucleare. L'enorme energia richiesta potrebbe essere rilasciata da un ordigno nucleare (che può essere milioni di volte più grande rispetto ad un impatto cinetico). Gli ordigni nucleari esistenti potrebbero essere usati apportando piccole modifiche e lanciati dai veicoli attuali. La probabilità di successo nel deflettere un *NEO* con una singola missione, usando una delle tecniche appena viste è, purtroppo, ancora molto bassa per cui la deflessione di un *NEO* non può essere considerata come un'unica missione ma come una campagna di missioni orchestrate e programmate sequenzialmente usando diverse tecnologie .

Da quanto detto appare evidente che sono stati fatti grandi passi nello studio dei Near Earth Object: è cresciuto il numero di oggetti conosciuti ed è aumentata la nostra conoscenza delle loro caratteristiche fisiche e dinamiche. Ma questo non rappresenta un punto di arrivo, piuttosto un punto di partenza: è necessario proseguire nella ricerca e nella catalogazione dei corpi, anche quelli più piccoli, e continuare ad investire tempo nella ricerca di tecniche di deflessione efficaci che possano aumentare le probabilità di successo di eventuali interventi di variazione di orbite.

BIBLIOGRAFIA

Binzel, R.P., Di Martino M., Lupishko D.F., Hahn G.J. e Whiteley R.J., *Physical properties of near-Earth objects*, Pp. 255-271 in Asteroids III (W.F. Bottke, P. Paolicchi, R.P. Binzel, and A. Cellino, eds.). University of Arizona Press, Tucson, Arizona, USA, 2002.

Cellino A., Di Martino M., De Sanctis G., Tanga P. e Zappalà V., *Il rischio asteroidi. Valutazioni scientifiche e misure preventive*, L'Artistica Savigliano, s.l., 2000.

Cellino A., Tedesco E.F. e Zappalà V., *Near-Earth objects: Origins and need of physical characterization*, Pp. 1965-1974 in Meteoritics & Planetary Science 37, 2002.

De Blasi A., Piemontese A. e Stefanelli F., *Dal caso Tunguska a 99942 Apophis*, CLUEB, Bologna, 2008.

Di Martino M., *Gli Asteroidi ed il rischio da impatto*, Masso delle Fate, Signa (FI), 2005.

- *Nani del Sistema Solare. Tra pianetini e comete*. Gruppo B editore Srl, Milano, 2009.

French B.M., *Traces of Catastrophe: A Handbook of Shock-Metamorphic Effects in Terrestrial Meteorite Impact Structures*, cap. 2, LPI Contribution No. 954, Lunar and Planetary Institute, p. 120 , Houston, USA, 1998.

International Academy of Astronautics, *Dealing with the threat to Earth from asteroids and comets*, Ivan Bekey, 2009.

Licchelli D., Zappalà V., *I segreti della luce degli asteroidi – IYL2015*, Osservatorio Feynman, Lecce, 2015.

Manara A., *La Terra nel mirino*, Il Castello, Trezzano sul Naviglio (MI), 2003.

National Aeronautics and Space Administration, *Study to Determine the Feasibility of Extending the Search for Near-Earth Objects to Smaller Limiting Diameters*, capp. 2, 3, 8, August 22, 2003.

Schweickart R.L., *Decision program on asteroid threat mitigation*, Acta Astronautica, 2009, doi: 10.1016/j.actaastro.2009.03.069.

Yeomans D.K., *Near-Earth Objects. Finding Them Before They Find Us*, Princeton University Press, Princeton, New Jersey, USA, 2013.