

# ***ASTEROIDI***

***di Federico Tosi***

***Associazione Reggiana di Astronomia (A.R.A.)***

## *Sommario*

<i>INTRODUZIONE</i> .....	4
<i>§I) STORIA</i> .....	4
<i>§II) TEORIE DI FORMAZIONE</i> .....	8
<i>§III) PREMESSE</i> .....	10
<i>§IV) IL NUMERO</i> .....	10
<i>§V) LE DIMENSIONI</i> .....	11
<i>§VI) CURVE DI LUCE</i> .....	14
<i>§VII) L'ALBEDO</i> .....	15
<i>§VIII) MASSA E DENSITA'</i> .....	17
<i>§IX) CLASSIFICAZIONE TASSONOMICA</i> .....	18
<i>§X) CARATTERISTICHE ORBITALI</i> .....	22
<i>§XI) DISTRIBUZIONE SPAZIALE</i> .....	22
<i>§XII) I PIANETINI TROIANI</i> .....	24
<i>§XIII) RISONANZE SECOLARI</i> .....	25
<i>§XIV) CHIRONE E I CENTAURI</i> .....	27
<i>§XV) EVOLUZIONE COLLISIONALE: PREMESSE</i> .....	29
<i>§XVI) LE FAMIGLIE DINAMICHE</i> .....	29
- <i>FAMIGLIE ASIMMETRICHE</i> .....	31
- <i>FAMIGLIE DISPERSE</i> .....	31
<i>§XVII) ROTAZIONI "UBRIACHE"</i> .....	34
<i>§XVIII) ASTEROIDI DOPPI O BINARI</i> .....	35
<i>§XIX) GLI ASTEROIDI VICINI</i> .....	38
<i>§XX) IL RISCHIO DI UN IMPATTO COSMICO</i> .....	42
- <i>LA SCALA TORINO</i> .....	45
- <i>LA SCALA PALERMO</i> .....	47
<i>§XXI) ESPLORAZIONE SPAZIALE</i> .....	50
<i>§XXII) OSSERVAZIONI AMATORIALI</i> .....	52
<i>§XXIII) TECNICHE DI SCOPERTA</i> .....	56

<i>§XXIV) OSSERVAZIONI ASTROMETRICHE E FOTOMETRICHE .....</i>	<i>59</i>
<i>BIBLIOGRAFIA.....</i>	<i>61</i>

## INTRODUZIONE

Nella nebulosa in cui si originò il Sistema Solare le basse temperature favorirono l'accrescimento dei pianeti giganti a grandi distanze dal Sole, dove era più abbondante la materia allo stato solido che fungeva da nucleo di aggregazione. Le regioni più interne, dove la formazione procedeva più lentamente, risentirono delle forti perturbazioni gravitazionali prodotte in particolare dal massiccio Giove, che ebbero l'effetto di bloccare completamente la crescita di un oggetto di dimensioni planetarie nella zona fra Marte e Giove stesso, dove infatti si trova un gran numero di piccoli corpi: gli *asteroidi*, o *planetini*.

## STORIA

Il primo riferimento agli asteroidi risale a Keplero (1571-1630), che nel suo *Mysterium Cosmographicum* scriveva: “*Inter Iovem et Martem interposui planetam*”. L'opera, pubblicata nel 1596, argomentava sulla possibilità di riprodurre con buona approssimazione, inserendo le orbite dei pianeti conosciuti tra solidi disposti gli uni dentro gli altri, le proporzioni trovate nella realtà. Il modello utilizzava i cinque solidi platonici, gli unici racchiusi da facce tutte uguali con la forma di poligoni regolari, per tentare di individuare una legge in grado di spiegare le distanze planetarie. Ogni sfera, a cui veniva assegnato uno spessore proporzionale all'eccentricità della relativa orbita, inscriveva un solido ed era circonscritta dal seguente in una successione che allontanandosi dal centro comprendeva rispettivamente: ottaedro, icosaedro, dodecaedro, tetraedro e cubo. Quando Keplero mise a confronto i dati sperimentali con quelli previsti dal modello, trovò delle piccole discrepanze, e per spiegarle fece appunto l'ipotesi che l'inserimento di un corpo celeste non ancora scoperto nell'ampio spazio vuoto compreso tra Marte e Giove avrebbe potuto ristabilire un'adeguata proporzione. Fu sicuramente “una soluzione ardita”, come egli stesso l'ebbe a definire, ed infatti questo concetto, accolto con molta diffidenza dai suoi contemporanei e abbandonato poco dopo dallo stesso autore, cadde ben presto nell'oblio.

L'idea che una *divina geometria* sovrintendesse all'ordine del cosmo, già avanzata dagli antichi filosofi greci, fu comunque in seguito ripresa da numerosi autori, e tra questi ne trattò anche il naturalista svizzero Charles Bonnet nel suo popolare libro del 1764, *Contemplation de la Nature*, di tale successo da essere tradotto in altre lingue. Il fisico e matematico Johann Daniel Titius (latinizzazione del cognome Tietz), curatore della versione tedesca dell'opera, inserì una nota nella parte dedicata al Sistema Solare, successivamente ripresa e divulgata dall'astronomo Johann Elert Bode, da cui deriva quella che oggi è universalmente conosciuta come *legge di Titius-Bode*. Secondo tale relazione empirica, pubblicata nella sua forma classica nel 1772, il semiasse maggiore delle orbite planetarie note a quel tempo, espresso in Unità Astronomiche (1 UA equivale alla distanza media Terra-Sole, circa 149,6 milioni di chilometri), si ricavava con buona approssimazione dalla seguente successione matematica:

$$d_n = 0,4 + 0,3 \times 2^n$$

con  $n = -\infty, 0, 1, 2, 4, 5$ , corrispondenti a Mercurio, Venere, Terra, Marte, Giove e Saturno.

A parte lo strano salto da  $-\infty$  a 0 (tutti gli altri esponenti sono numeri naturali), la legge metteva in evidenza la mancanza di un pianeta corrispondente al numero 3, che si sarebbe dovuto trovare a 2,8 UA dal Sole, proprio tra Marte e Giove. Ma tutto ciò sarebbe rimasto probabilmente una curiosità se nel 1781 William Herschel non avesse scoperto Urano, la cui distanza dal Sole era in buon accordo con quella fornita dalla legge di Titius-Bode ponendo  $n = 6$ . Questa scoperta, che al momento sembrò una conferma fondamentale (la successiva scoperta di Nettuno, completamente “fuori posto”, avrebbe poi gelato molti entusiasmi), spinse gli astronomi dell'epoca ad intensificare

le ricerche del corpo corrispondente a  $n = 3$ . Uno dei più attivi nell'organizzare questa indagine fu il barone ungherese Franz Xavier von Zach (1754-1832), astronomo di corte del duca di Sassonia e direttore della Specola di Gotha, che il 21 settembre 1800 si incontrò con altri rinomati astronomi tedeschi a Lilienthal, presso Brema, per concordare le modalità di quella che forse è stata una delle prime ricerche coordinate nella storia dell'astronomia. Il gruppo, chiamato da Zach "*Himmel-Polizei*" (guardia celeste), avrebbe dovuto sorvegliare determinate porzioni di cielo nei pressi dell'eclittica alla ricerca del pianeta mancante. Il successo arrivò abbastanza presto, ma, nonostante l'assiduità delle ricerche, portate avanti con metodicità e organizzate su larga scala, fu ancora una volta per caso che l'oggetto a lungo agognato fece la sua improvvisa comparsa.

A Palermo era allora in funzione un osservatorio astronomico diretto da un abate teatino nato in Valtellina, Giuseppe Piazzi (1746-1826), che dal 1792 stava lavorando alla compilazione di un nuovo accurato catalogo stellare. Piazzi era uno degli astronomi che von Zach contava di avere nella sua "polizia", ma la lettera con l'invito ad aderire al progetto, a causa di eventi bellici, giunse in Sicilia troppo tardi. Mentre passava sistematicamente in rassegna le varie parti della volta celeste, il 1° gennaio 1801, Piazzi notò nella costellazione zodiacale del Toro un punto luminoso di ottava magnitudine non segnato sulle mappe di cui disponeva. Nelle notti seguenti poi osservò con sorpresa che il punto luminoso si spostava lentamente rispetto alle stelle "fisse" in senso retrogrado, con una velocità di circa quattro primi d'arco al giorno, e inizialmente ipotizzò che si trattasse di una cometa; ma il moto apparente del nuovo oggetto sembrava troppo lento e uniforme, ed inoltre non era percepibile intorno ad esso alcuna chioma o nebulosità. Piazzi seguì meticolosamente il corpo celeste fino al 23 gennaio: il giorno seguente si decise finalmente a comunicare la sua scoperta al carissimo amico Barnaba Oriani, direttore della Specola di Brera in Milano. Una lettera analoga la scrisse all'astronomo tedesco Bode, direttore dell'Osservatorio di Berlino nonché coautore della celebre legge prima citata. Purtroppo, l'11 febbraio Piazzi dovette interrompere le osservazioni sia per problemi di salute sia per motivi legati alle condizioni geometriche dell'oggetto, che rendevano di fatto impossibile proseguire la misurazione della sua posizione con una precisione accettabile. Nel corso di 41 giorni esso aveva descritto in cielo un arco di appena 3 gradi; le osservazioni di Piazzi erano state sufficienti a stabilire che la sua orbita era quasi circolare e non allungata come quella di una cometa, ma non bastavano per il calcolo dell'orbita completa. Tuttavia Bode, dopo attento studio, concluse che la lunga ricerca di quello che si credeva il pianeta mancante fra Marte e Giove era giunta al suo epilogo, e chiese a Piazzi di dargli un nome: questi scelse di chiamarlo *Cerere*, o più esattamente *Ceres Ferdinandea*, in onore della dea latina delle messi protettrice della Sicilia e di Ferdinando I Borbone, re delle Due Sicilie.

La notizia intanto era giunta anche al gruppo di von Zach e ad altri astronomi europei, i quali si interessarono subito alla scoperta cercando il misterioso corpo celeste in modo continuativo. Nel corso del 1801 i tentativi di calcolare gli elementi orbitali del nuovo "pianeta", sulla base delle osservazioni di Piazzi, si moltiplicarono. Bode, Zach, Oriani e lo stesso Piazzi si cimentarono nell'arduo compito, tentando con orbite sia circolari che paraboliche: tali orbite presentano una minore difficoltà rispetto all'ellisse, richiedendo la soluzione di soli cinque parametri (in questi casi infatti l'eccentricità è già nota, essendo uguale a 0 per il cerchio e a 1 per la parabola). All'inizio del diciannovesimo secolo molti problemi connessi al calcolo orbitale erano ancora irrisolti, e anche se ottimi lavori erano stati compiuti nella seconda metà del Settecento da grandi matematici come Eulero, Lambert, Du Séjour, D'Alembert, Lagrange, solo per citarne alcuni, molto restava ancora da fare. Infatti, dopo i primi tentativi andati a vuoto, si percepì la necessità e l'urgenza di sviluppare un sistema efficace per la determinazione delle orbite ellittiche, una soluzione che richiedeva qualcosa di geniale e al tempo stesso innovativo.

A quel punto si rivelò provvidenziale l'opera di un giovane e brillante matematico tedesco, Karl Friedrich Gauss (1777-1855), che a 24 anni aveva inventato, apparentemente senza eccessive difficoltà, un nuovo metodo per analizzare le osservazioni e ricostruire da esse i parametri orbitali senza necessità di ipotesi arbitrarie, cioè senza dover presumere a priori il tipo di curva conica descritta dal corpo in questione. Infatti, poiché una conica è determinata da cinque condizioni, e nel

caso dei moti planetari è già noto il fuoco che corrisponde a due condizioni, per ricostruire un'orbita kepleriana (cioè un'orbita semplice, non perturbata) sono sufficienti in teoria tre sole osservazioni effettuate in istanti noti. È possibile infine migliorare l'orbita così ottenuta includendo nella soluzione il riscontro di ulteriori osservazioni: si applica in questo caso il metodo dei *minimi quadrati*, rendendo cioè minima la somma dei quadrati degli scarti tra le posizioni osservate e quelle calcolate.

Grazie al metodo di Gauss fu possibile calcolare effemeridi, ricavate dai dati disponibili per Cerere, esatte al punto tale che in base ad esse lo stesso barone von Zach poté ritrovarlo in prossimità della posizione prevista alla successiva opposizione, il 7 dicembre 1801 e successivamente nei giorni 17 e 31 dicembre, dopo meno di un anno dalla scoperta. La sua ubicazione in cielo differiva da quella calcolata per meno di un terzo di grado, e dopo poco tempo fu definitivamente chiaro che l'orbita descritta era di tipo planetario, con un'eccentricità inferiore a quella delle comete e il semiasse maggiore (stimato in 2,77 UA) vicinissimo a quello previsto dalla formula di Titius e Bode. Fu un trionfo per la meccanica celeste (termine coniato da Laplace) e per Gauss che, insignito del titolo di *principe dei matematici*, nel 1809 pubblicherà, dopo molte insistenze, il suo metodo riveduto e corretto – ancora oggi in uso – nel *Theoria motus corporum coelestium*.

Grande fu però la sorpresa quando il 28 marzo 1802 Heinrich Wilhelm Olbers (1758-1840), medico in Brema e stimato studioso di comete che si era già messo in luce per aver ritrovato Cerere, in modo indipendente da Zach, a un anno esatto dalla scoperta di Piazzi, individuò un nuovo oggetto: *Pallade (Pallas)*, privo di chioma e con caratteristiche dinamiche del tutto simili a quelle di Cerere. Dopo un primo momento di incredulità e forse anche di disappunto, gli scienziati dovettero accettare l'avvenuta scoperta, in quanto l'orbita calcolata da Gauss non lasciava alternative sulla posizione del corpo celeste. Olbers fu subito pronto a fare l'ipotesi che gli oggetti appartenenti a tale zona potessero essere ancora più numerosi, e cominciò così una vera e propria campagna osservativa. Il 1° settembre 1804 Karl Harding, astronomo dell'Osservatorio di Brema, scoprì un terzo asteroide, *Giunone (Juno)*, mentre lo stesso Olbers scoprì *Vesta* il 29 marzo 1807. Olbers e Harding, fra l'altro, erano tra i fondatori della "polizia celeste" voluta da Zach.

La prima fase delle scoperte si era conclusa con l'individuazione degli asteroidi più grossi e quindi più luminosi. Tutti questi oggetti sembravano orbitare nella stessa regione del Sistema Solare, nel vasto anello tra le orbite di Marte e Giove, ed inoltre tutto faceva ritenere che avessero dimensioni molto più piccole di quelle dei pianeti veri e propri, perciò vennero chiamati collettivamente *pianetini* oppure, secondo la denominazione che ne abbiamo dato finora e che venne suggerita nel 1802 da Herschel, *asteroidi*, con riferimento al loro aspetto pressoché puntiforme e quindi difficilmente distinguibile a prima vista da quello di normali stelline (*asteroide* significa proprio "a forma di stella"). I pianetini destarono comunque un grande interesse nonostante le loro modeste dimensioni, e riuscirono addirittura a influenzare la scelta del nome da assegnare ad alcuni elementi del sistema periodico: ad esempio il *cerio* (Ce), scoperto nel 1803 dal chimico svedese Jöns Jacob Berzelius, fu così battezzato in onore del primo asteroide Cerere. E quando William Hyde Wollaston, pochi mesi più tardi, individuò un nuovo metallo appartenente al gruppo del platino, decise di chiamarlo *palladio* (Pd) per ricordare il secondo planetario e accomunare i mondi recentemente trovati dagli astronomi nel cielo con i costituenti ultimi della materia isolati dai chimici sulla Terra.

Dopo la scoperta di Vesta da parte di Olbers, si dovette attendere più di 38 anni per l'inizio della fase successiva, quando Karl L. Hencke, astrofilo di Dresda che aveva dedicato quindici anni alla sua ricerca, l'8 dicembre 1845 individuò finalmente il quinto asteroide, battezzato *Astraea* dal nome della dea della giustizia. L'oggetto successivo, riconosciuto il 1° luglio 1847 sempre da Hencke, venne chiamato *Hebe*. Nel 1868 il numero dei pianetini conosciuti toccava quota 100, ma dieci anni dopo risultava quasi raddoppiato e dopo venti triplicato. Un notevole impulso venne dato dall'astronomo tedesco Max Wolf dell'Osservatorio del Königstuhl di Heidelberg, che il 22 dicembre 1891 scoprì fotograficamente l'asteroide 323 *Brucia*. Con l'applicazione della tecnica fotografica alla ricerca astronomica il ritmo delle scoperte aumentò vertiginosamente: gli asteroidi,

muovendosi sullo sfondo delle stelle fisse, risultavano subito sulle lastre perché lasciavano delle evidenti tracce allungate. A questo punto la sfida era aperta a tutti, astronomi e dilettanti, professionisti e appassionati; visto poi che gli asteroidi più luminosi erano già stati trovati, diventava sempre più difficile individuare i rimanenti, più deboli membri di questa famiglia.

Ai giorni nostri l'uso dei mezzi fotografici è stato accantonato ormai da tempo, e per la ricerca e l'individuazione di nuovi asteroidi ci si avvale esclusivamente di strumenti elettronici altamente sensibili, i CCD (*Charge Coupled Device*, dispositivi a scorrimento di carica), che vengono applicati ai telescopi e collegati a dei computer. La crescente accessibilità al grande pubblico di questa tecnologia ha permesso agli astrofili di contribuire in maniera determinante all'avanzamento delle ricerche sugli asteroidi: prova ne sia il fatto che negli anni '90 si è assistito ad un aumento esponenziale, senza precedenti, del numero di asteroidi scoperti, non solo da parte degli astronomi ma anche e soprattutto da parte di appassionati che pur con strumentazioni modeste possono svolgere un serio lavoro scientifico che poco ha da invidiare a quello condotto nei maggiori Osservatori. Con l'avvento di progetti professionali espressamente mirati alla ricerca automatica di pianetini e comete, come lo *Spacewatch*, il *NEAT*, il *LINEAR* e il *LONEOS*, la possibilità da parte del semplice appassionato di rendersi artefice della scoperta di un nuovo asteroide è stata notevolmente ridimensionata, ma non la sua capacità di compiere preziose misure astrometriche e fotometriche sugli oggetti già noti, in modo da poter accrescere il bagaglio di conoscenze dinamiche e fisiche su questi corpi celesti; un ruolo quest'ultimo per nulla secondario ed anzi ufficialmente riconosciuto in campo internazionale.

L'organo mondiale che si cura di coordinare il lavoro di ricerca e di ratificare le varie scoperte è il *Minor Planet Center* (MPC) con sede presso l'*Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics* di Cambridge, nel Massachusetts (USA); l'MPC è una branca dell'*International Astronomical Union* (IAU, Commissione 20) che si occupa di comete e pianetini. Al 20 febbraio 2003 risultavano catalogati in modo definitivo 55.719 asteroidi, ma allo stato attuale questo numero cresce di 2000 unità al mese. In realtà, finora sono stati osservati almeno 150.000 pianetini, ma solo quelli catalogati in maniera definitiva hanno un'orbita conosciuta con sufficiente precisione, avendo ognuno di questi oggetti già passato almeno quattro opposizioni. Il numero reale dei pianetini del Sistema Solare è comunque di gran lunga maggiore, e, considerando solo i corpi con dimensioni superiori al chilometro, si stima possa essere compreso tra 1,1 e 1,9 milioni nella fascia principale situata tra le orbite di Marte e Giove.

I pianetini dall'orbita conosciuta sono tutti classificati con un numero sequenziale a volte racchiuso tra parentesi tonde, seguito da un nome proprio, il quale per tradizione viene proposto dallo scopritore (diversamente dalle comete, che prendono il nome *dei* loro scopritori). I nomi dei primi asteroidi, per lo più femminili, furono tutti ispirati alla mitologia classica: *Ceres*, *Pallas*, *Juno*, *Vesta*, *Astraea*, *Hebe*, *Iris*, *Flora*, ecc., ma in un secondo tempo si cominciò a spaziare in tutti i possibili campi, dalla mitologia germanica alla storia della Bibbia, dalla geografia alla politica, dalla scienza alla musica, dal mondo dello spettacolo alla sfera del privato; non sono mancati in questo senso i nomi bizzarri ed inconsueti. Attualmente, per ragioni di regolamentazione, la denominazione finale del pianetino non può più essere stabilita direttamente dal suo scopritore, ma deve essere prima vagliata e ratificata da una speciale commissione.

## ***TEORIE DI FORMAZIONE***

Vale la pena di aprire una parentesi anche sulle principali teorie riguardanti la genesi degli asteroidi che sono state proposte dalle loro prime scoperte ad oggi. Già nel 1805, dopo soli quattro anni dalla scoperta di Cerere da parte di Piazzi, Olbers propose un'ipotesi sconvolgente: quella che un pianeta orbitante fra Marte e Giove (battezzato anche *Minerva*) fosse esistito in epoche primordiali, ma fosse poi esploso catastroficamente per ignoti motivi, lasciando al suo posto soltanto una moltitudine di piccoli frammenti vaganti. Quest'ipotesi divenne subito popolare, influenzando l'immaginazione degli scrittori e del pubblico, ma parallelamente si presentarono anche le prime difficoltà per i suoi sostenitori. Innanzitutto l'analisi delle orbite mostrava che queste non potevano essere derivate tutte da un unico evento esplosivo; secondariamente si ignorano i motivi fisici che dovrebbero portare all'esplosione di un intero pianeta (per giunta tutti gli asteroidi messi assieme hanno una massa molto più piccola di quella di un pianeta); infine le meteoriti più comuni, generate in gran parte dalle collisioni fra asteroidi, sono costituite di materiale assolutamente "primitivo", mai riscaldato e compresso come sono invece le rocce che formano l'interno di un pianeta di tipo terrestre.

Tali incongruenze portarono di fatto a sviluppare una teoria alternativa a quella di Olbers, che fu perfezionata negli anni '50 del XX secolo dall'astrofisico sovietico Victor S. Safronov (1917-1999), illustre esponente della scuola russa di planetologia. L'idea era quella che gli asteroidi sarebbero stati i resti non di un pianeta distrutto, bensì "abortito": rifacendosi alla teoria dei *planetesimi*, Safronov suppose che, ai tempi della nebulosa protoplanetaria che generò il Sistema Solare, avesse cominciato a formarsi proprio nella zona che ora ospita gli asteroidi un pianeta, il cui embrione sarebbe rappresentato da Cerere, l'asteroide più grande. La crescita del corpo celeste fu però bloccata da quella più rapida del vicino pianeta gigante Giove, la cui influenza gravitazionale provocò un violento "rimiscolamento" delle orbite dei pianetini, aumentando le velocità con cui ciascuno di questi corpi si muoveva rispetto agli altri e facendo sì che gli impatti anziché costruttivi divenissero distruttivi. Accurate simulazioni eseguite al calcolatore hanno dimostrato che questa sequenza di avvenimenti è effettivamente plausibile.

In tempi più recenti alcuni scienziati hanno apportato modifiche piuttosto significative alla teoria di Safronov, che in un certo qual modo la riavvicinano a quella vecchia di Olbers. In particolare il ricercatore americano George W. Wetherill (*Carnegie Institution of Washington*), tramite numerose simulazioni eseguite al calcolatore, ha fatto notare che l'influenza di Giove potrebbe aver bloccato l'accumulazione del pianeta asteroidale molto più tardi di quanto finora supposto, quando si erano già formati parecchi embrioni planetari grandi come la Luna o anche Marte (cioè dall'1% al 10% della massa terrestre). Un successivo processo di incontri ravvicinati e collisioni reciproche fra questi "quasi-pianeti" li avrebbe poi frammentati ed immessi su orbite instabili, alcune delle quali li avrebbero portati a collidere con i pianeti interni del Sistema Solare, mentre altre li avrebbero spinti all'esterno. Rimane tuttavia da giustificare la composizione "primitiva" della maggior parte degli asteroidi e delle meteoriti osservate, che sembra molto meglio in accordo con la teoria di Safronov.

Cerchiamo dunque di dare una plausibile ricostruzione dei fatti. Per varie ragioni, legate alla temperatura e all'abbondanza di materiale a disposizione, l'accrescimento dei planetesimi "giovani", ossia quelli che avrebbero poi portato alla formazione di Giove, ebbe tempi molto più rapidi di quelli necessari per completare lo stesso processo nelle zone più interne. Tutto ciò che cercava di aggregarsi all'interno dell'orbita di Giove doveva quindi confrontarsi con la presenza "fastidiosa" degli innumerevoli antenati del gigante gassoso. Alcuni di questi avevano già assunto dimensioni come quella della nostra Terra e le loro traiettorie si spingevano all'interno della regione compresa tra Marte e Giove. Lo stesso Marte dovette limitare la propria massa in conseguenza di questa spiacevole presenza che, a causa delle perturbazioni orbitali, riduceva di molto il numero di planetesimi a disposizione per completare la formazione del pianeta. Ma più vicino a Giove i problemi erano ancora peggiori. La formazione di un pianeta era cominciata

secondo le regole del gioco, ma venne presto interrotta dall'intrusione dei sopraccitati corpi perturbatori: non si riuscì ad andare oltre a un oggetto di circa 1000 km di diametro, e furono pochi quelli che superarono i 400 km. Poi le cose precipitarono.

Le perturbazioni causate dagli ospiti indesiderati cominciarono ad aumentare le eccentricità orbitali dei planetesimi che si stavano aggregando tra Marte e Giove, ossia le orbite diventarono sempre più "allungate". Questo implicava un fatto molto importante: quando due planetesimi si incontravano durante la loro traiettoria intorno al Sole, non lo facevano alle consuete basse velocità relative (metri al secondo) che avrebbero comportato un processo di accrescimento, bensì lo facevano con velocità molto maggiori (4-5 km/s). Con queste velocità la conclusione non poteva essere che una: la distruzione completa di entrambi i corpi sub-planetari. Tutto ciò che si era pian piano costruito nella fascia asteroidale venne velocemente "smontato", e nel giro di pochi milioni di anni iniziò una nuova esistenza dominata essenzialmente dagli urti catastrofici. I vari planetesimi si autodistruggevano, riducendosi in sciame di innumerevoli frammenti più piccoli, e la speranza di terminare l'opera di costruzione di un vero pianeta si spense completamente. Solo i più grandi tra essi riuscirono a sopravvivere all'opera distruttiva e rimasero come segno indelebile di un processo drammaticamente interrotto: oggi sono conosciuti con il nome di Cerere, Pallade, Vesta, ecc., ossia come i maggiori tra gli asteroidi della fascia principale. Ma quasi tutti gli altri, da due-trecento chilometri in giù, furono sicuramente frantumati o gravemente danneggiati almeno una volta nella loro esistenza durante i circa 4,5 miliardi di anni di vita del Sistema Solare. I più piccoli furono sminuzzati e ridotti in polvere; i più grandi riuscirono comunque a sopravvivere, producendo però, ad ogni collisione, una nuova miriade di schegge più piccole, pronte a vivere una loro vita autonoma fino al prossimo urto distruttivo. Questa situazione, sebbene molto ridotta ed in un certo senso stabilizzata, permane tuttora, e l'impatto tra asteroidi continua e continuerà ad essere un evento con probabilità non certo trascurabile, anzi, abbastanza quantificabile.

In questa sequenza di avvenimenti esiste tuttavia un lato positivo, almeno per la scienza planetaria di oggi: l'interruzione del processo di accrescimento aveva "congelato" la situazione evolutiva a uno stadio molto primitivo. I frammenti dei planetesimi tra Marte e Giove non ebbero il tempo di innescare i vari processi termici tipici dei pianeti maggiori e la loro composizione chimica rimase per lo più inalterata; essi lasciarono quindi una popolazione di veri e propri fossili delle origini, schegge dei planetesimi primordiali. Oggi la cintura degli asteroidi rappresenta, al pari delle comete, una regione unica per lo studio delle fasi primitive del Sistema Solare: in essi è ancora possibile leggere i primi milioni di anni del nostro sistema planetario, e quindi rappresentano chiavi di lettura fondamentali per la conoscenza di decisivi processi fisici e dinamici non più attivi.

Asteroidi e comete, dunque, come veri e propri campi di ricerca "archeologica", ma non certo, come vedremo tra poco, un insieme di corpi passivi e immuni da susseguenti evoluzioni.

## ***PREMESSE***

Per molti anni dopo la loro scoperta, gli asteroidi rimasero, anche per gli astronomi professionisti, semplici “grosse rocce vaganti” la cui unica caratteristica osservabile era l’orbita. All’inizio del ventesimo secolo, quando si sviluppò impetuosamente l’astrofisica, l’interesse fu rivolto principalmente alle stelle, e pochi pensarono di applicare lo stesso tipo di ricerca agli asteroidi che, anzi, diventarono un oggetto sempre meno di moda, su cui lavorava un esiguo numero di astronomi in maniera quasi isolata. Purtroppo anche in campo scientifico questa propensione perdura sino ai nostri giorni, e non di rado succede che interi settori di ricerca vengano definiti come “ormai superati” e “privi di interesse”. Nel caso degli asteroidi tuttavia si deve riscontrare negli ultimi anni un’inversione di tendenza, anche giustificata – come si avrà modo di vedere – dai rischi indiretti che la loro esistenza comporta per la vita sul nostro pianeta; un fatto, questo, che ha spinto di recente i più importanti enti spaziali al sostenimento di progetti e missioni rivolte proprio all’esplorazione ravvicinata di questi corpi, con ricerche che in pochi anni e con spese relativamente modeste possono produrre un’ingente mole di dati conoscitivi. Senza contare che gli stessi asteroidi si prefigurano sempre più come la chiave indispensabile per capire meglio i tempi e i modi della formazione della Terra e degli altri pianeti.

Un’altra premessa, breve quanto doverosa, è di carattere “tecnico”. Tradizionalmente erano stati definiti *asteroidi* o *pianetini* quei piccoli oggetti le cui orbite sono comprese fra Marte e Giove. Il progresso nella conoscenza e nella comprensione della realtà fisica ha causato fatalmente anche una revisione critica delle vecchie denominazioni: il nome “asteroide” viene dato oggi a tutti quegli oggetti che:

- non sono identificati come veri pianeti,
- non sono satelliti di qualche pianeta,
- non hanno caratteristiche di attività tipiche delle comete.

Lo studio degli asteroidi, così come quello delle comete, viene condotto di solito in due direzioni: quella *dinamica* e quella *fisica*. Lo studio stesso non si esaurisce in una classificazione, ma riguarda soprattutto i processi fisici che hanno prodotto la popolazione attuale e governano la sua evoluzione nel tempo. Per lo studio dinamico è necessario conoscere con precisione gli elementi orbitali dell’oggetto a un dato istante, per poter prevedere l’evoluzione degli stessi parametri nel tempo in base alla teoria delle perturbazioni. Lo studio fisico invece si propone l’obiettivo di far luce sulle proprietà mineralogiche dell’oggetto; a tale scopo è necessario utilizzare strumenti sufficientemente potenti per poter eseguire della buona spettroscopia, ancora il migliore metodo investigativo. Diamo dunque inizio alla parte che riguarda la descrizione fisica di questi corpi celesti, con le loro particolarità e peculiarità.

## ***IL NUMERO***

Secondo i risultati ottenuti da una serie di osservazioni degli asteroidi della cintura principale effettuate nell’infrarosso dal satellite europeo ISO (*Infrared Space Observatory*) tra il 1996 e il 1997, il numero di asteroidi che popolano la regione di spazio compresa tra le orbite di Marte e Giove sarebbe molto superiore a quanto finora creduto. Dalle circa 30.000 osservazioni effettuate nel corso della *ISO Deep Asteroid Search* (IDAS) risulta infatti che il numero di pianetini con dimensioni superiori a 1 km è compreso tra 1,1 e 1,9 milioni, circa il doppio delle più ottimistiche stime precedenti basate su osservazioni ottiche, che valutavano in 700-900 mila il numero di questi oggetti nella fascia principale degli asteroidi.

IDAS è stata la prima ricerca sistematica di oggetti della fascia principale effettuata nell’infrarosso. Poiché sarebbe praticamente impossibile osservare la fascia degli asteroidi nel suo complesso e

contare tutti i componenti della popolazione, sono state selezionate alcune sue regioni e si sono utilizzati dei modelli teorici per estrapolare i dati relativi all'intera fascia. È risultato che nella regione centrale della cintura la densità di asteroidi con diametro superiore a 1 km è di circa 160 per grado quadrato (un'area di cielo corrispondente a quattro volte quella della Luna piena). L'estrapolazione dei dati osservativi ottenuti da ISO ha quindi permesso di valutare tra 1,1 e 1,9 milioni il numero di questi oggetti.

La discrepanza tra questi risultati e quelli derivati dalle osservazioni ottiche è dovuta al fatto che gli asteroidi sono più facilmente visibili nell'infrarosso. Per un telescopio ottico la luminosità di un asteroide dipende dalla luce solare che la sua superficie riesce a riflettere: maggiori sono le dimensioni dell'oggetto, maggiore è lo specchio di riflessione. Ma questo metodo può incorrere in valutazioni errate. La luminosità degli asteroidi può infatti variare nel giro di pochi minuti, rendendoli di difficile osservazione e di imprecisa valutazione. Al contrario, la luminosità nell'infrarosso è funzione della temperatura, cioè non dipende dalla sua visibilità ottica bensì da quanta luce solare l'oggetto è stato in grado di assorbire. Per esempio, consideriamo due sfere delle stesse dimensioni localizzate l'una accanto all'altra nella fascia degli asteroidi, di cui una nel visibile riflette la luce che la colpisce dieci volte più efficacemente dell'altra. Vista con un telescopio ottico, la prima apparirà dieci volte più luminosa. Per ISO invece ambedue le sfere sarebbero visibili: anzi, la sfera più scura apparirebbe più luminosa nell'infrarosso, a causa della sua più alta temperatura dovuta al fatto che ha assorbito una maggiore quantità di luce solare.

In realtà, anche il satellite a infrarossi può incorrere in distorsioni che non permettono di quantificare esattamente il numero e le dimensioni degli asteroidi: un oggetto di piccole dimensioni potrebbe assorbire una grande quantità di luce e, per questo, apparire più grande del reale. Come risulta dalla distanza dei valori estremi della stima (1,1-1,9 milioni), l'errore nella valutazione è relativamente alto e il modo migliore per ottenere una precisa relazione tra il numero degli asteroidi che popolano la fascia principale e le loro dimensioni sarebbe quello di riuscire a combinare osservazioni quasi simultanee della stessa zona di cielo sia nel visibile che nell'infrarosso, ottenendo così differenti tipi di informazione tra loro complementari. Prendendo comunque il valore medio della stima dell'IDAS, risulterebbe che vi siano 1,5 milioni di oggetti con dimensioni superiori al chilometro nella fascia principale, un valore circa doppio rispetto a quanto estrapolato in precedenza dalle sole osservazioni ottiche, sebbene anche questa valutazione non possa essere considerata definitiva.

## ***LE DIMENSIONI***

Gli asteroidi appaiono, anche con i più potenti telescopi ottici terrestri, come semplici puntini luminosi sui quali è impossibile discernere qualsiasi dettaglio. L'astronomo americano Edward E. Barnard fu il primo a misurare direttamente le dimensioni degli asteroidi negli anni 1894 e 1895, facendo uso di un micrometro a fili, uno strumento di grande precisione normalmente impiegato negli studi visuali sulla separazione delle stelle doppie. I risultati stabilirono che Cerere era il più grande, con un diametro stimato di circa 800 km, e comunque tali misure furono possibili solo per i quattro asteroidi maggiori, le cui dimensioni angolari apparenti (tutte inferiori al secondo d'arco) cadevano, anche se per poco, entro i limiti del potere separatore dei più potenti telescopi dell'epoca. Questi valori rimasero i migliori disponibili fino a quando, nei primi anni '70, furono introdotte nuove tecniche di misura, ma fin dall'inizio fu chiaro che i risultati ottenuti in questo modo erano assai approssimativi per l'effetto della turbolenza atmosferica (*seeing*), che non consente di utilizzare al massimo le potenzialità risolutive degli strumenti ottici limitandole in molti casi a qualche decimo di secondo d'arco.

Un metodo più accurato è quello basato sulle *occultazioni stellari*, il cui meccanismo non è molto diverso da quello delle eclissi solari, anche se sono naturalmente differenti le dimensioni e gli spostamenti apparenti sulla volta celeste dei diversi corpi coinvolti. Talvolta può capitare che un

pianetino nel suo orbitare passi davanti a una stella; per ciascun osservatore la stella risulterà occultata per un tempo che è direttamente proporzionale alle dimensioni del corpo transitante. Una singola osservazione in questo caso ha poco significato: devono essere numerosi gli osservatori che rilevano l'evento, dislocati il più possibile in maniera uniforme lungo l'ombra dell'asteroide. Disponendo quindi di una serie di osservatori che rilevino il tempo durante il quale la stella rimane occultata, diventa possibile risalire alla forma e alle dimensioni dell'ombra in quel momento: quello che si ottiene è il profilo medio del corpo così come esso risulta orientato in quell'istante, il che ancora non basta per dare una forma tridimensionale all'asteroide. Tuttavia, combinando opportunamente osservazioni anche di altro tipo, a tale forma si può risalire con una discreta approssimazione. La bontà della ricostruzione risulterà direttamente proporzionale al numero delle "corde" rilevate e quindi degli osservatori distribuiti lungo il percorso dell'ombra: quanto maggiore è il numero di "corde" e precisa la loro misurazione, tanto più definita sarà la ricostruzione del corpo occultante. Anche le occultazioni non osservate possono essere utili, sia per la stima delle dimensioni che per il miglioramento degli elementi orbitali degli asteroidi: infatti, quando l'ombra dell'asteroide non passa nella regione prevista, significa che le effemeridi erano errate e i parametri orbitali vanno corretti di conseguenza. Purtroppo il metodo delle occultazioni, che in linea di principio sarebbe efficacissimo, trova i suoi limiti principalmente nella precisione delle previsioni (in pratica fornisce spesso solo stime approssimative o limiti inferiori, non dati definitivi, e comunque solo per asteroidi con diametro superiore a 30 km), nella difficoltà di reperire stelle *ad hoc* nei cataloghi, nonché nella coordinazione di osservazioni in differenti paesi. Perciò questa tecnica, peraltro intrapresa sistematicamente solo in tempi recenti, è poco operante, e le occultazioni asteroidali, dipendendo da una serie di condizioni esterne, sono coltivate soprattutto a livello amatoriale, da gruppi locali di astrofili favoriti dalla maggiore elasticità dell'organizzazione e dalla distribuzione capillare sul territorio.

Una tecnica sicuramente più professionale, sebbene altrettanto sporadica, è quella dell'*interferometria a macchie (speckle interferometry)*. Essa viene condotta generalmente con telescopi riflettori di grande diametro, e si basa sull'acquisizione, a lunghezza d'onda e banda passante fissate, di un gran numero di pose estremamente brevi (inferiori a 1/100 di secondo) dell'oggetto inquadrato. Questo, per effetto della turbolenza atmosferica, apparirà sempre distorto: da un'esposizione all'altra, la forma della distorsione ed il numero e la posizione delle repliche cambia in continuazione, in modo casuale. La tecnica *speckle*, grazie all'uso del calcolatore, isola l'informazione di ogni singola breve esposizione e seleziona, in un gran numero di riprese (anche qualche migliaio), solo quella comune a tutte le immagini. Integrando queste informazioni è possibile ricostruire l'intrinseca immagine dell'oggetto, depurata dallo sparpagliamento casuale dovuto alla turbolenza. Questo metodo, spesso usato per risolvere stelle doppie molto strette e per fare misure di fotometria relativa anche in condizioni di *seeing* pessimo, è stato applicato con successo anche ad un numero limitato di asteroidi (ma tutti di grande diametro): a parte una tendenza sistematica a sottostimare le dimensioni reali, i risultati ottenuti sono stati decisamente buoni.

I due metodi che di gran lunga hanno consentito la determinazione accurata della maggior parte dei diametri asteroidali sono stati quello *radiometrico* e quello *polarimetrico*: entrambi sono in grado di ricavare l'*albedo* dei pianetini (vedere oltre), un parametro indispensabile per risalire alle loro dimensioni, ma mentre il primo metodo concerne l'emissione infrarossa, il secondo si basa sulla polarizzazione della luce solare riflessa. È significativo il fatto che tutti e due i sistemi diano risultati compatibili entro un errore del 5%, e in buon accordo anche con gli sporadici risultati ottenuti tramite le occultazioni. Talvolta perfino il telescopio spaziale Hubble della NASA si è cimentato nell'osservazione di asteroidi, con esiti piuttosto interessanti. Anche disponendo solo di osservazioni ottiche condotte a terra, una stima sufficientemente accurata del diametro medio di un pianetino non è particolarmente difficile da ottenere, a patto di conoscere alcune circostanze fisiche e geometriche relative all'oggetto in esame.

Il risultato finale è che i pianetini sono oggetti di dimensioni molto piccole in confronto ai pianeti: Cerere, il più grande della fascia principale, ha un diametro medio di 950 km, Pallade di 533 km, Vesta di 525 km. Il quarto asteroide per dimensioni è 10 Hygiea, che ha un diametro di 410 km. Vi sono poi due asteroidi con diametri compresi fra 300 e 400 km, e circa 24 con diametri tra 200 e 300 km. In totale, sono 30 gli asteroidi con dimensioni maggiori di 200 km, e circa 200 quelli con diametri compresi tra 100 e 200 km, per scendere gradualmente ai più piccoli, che misurano poche decine di metri e rappresentano probabilmente i resti di antiche collisioni, come vedremo più avanti. Riportando in un grafico il numero di asteroidi conosciuti in funzione delle loro dimensioni, si ottiene una distribuzione delle dimensioni che segue grosso modo una legge di potenza del tipo  $D^{-\alpha}$ , ossia una distribuzione di asteroidi il cui numero cresce in modo esponenziale al diminuire del diametro  $D$  (espresso in chilometri). A titolo di esempio, se ci fosse un solo oggetto di 100 km ce ne dovremmo aspettare 10 da 10 km, 1000 da 1 km e così via: l'esempio fatto si riferisce a un esponente  $\alpha$  uguale a 2, ma può variare a seconda del tipo di legge di potenza considerata. In base alle attuali conoscenze si può stimare che, nella fascia principale compresa tra Marte e Giove, il numero di asteroidi di diametro superiore a 10 km sia proporzionale a  $D^{-2,5}$ , mentre è proporzionale a  $D^{-3,3}$  per quelli più piccoli di 10 km. Ciò implica che probabilmente nella fascia asteroidale esistono miliardi di frammenti dalle dimensioni dell'ordine del centinaio di metri, sebbene gran parte della massa complessiva sia concentrata nei pochi oggetti maggiori.

Soltanto questi ultimi hanno una vaga forma sferoidale; la maggior parte dei pianetini presenta piuttosto una forma oblunga e al più approssimabile a quella di un ellissoide a tre assi (o "ellissoide di Jacobi", dal nome del matematico che ne studiò le caratteristiche), ma spesso, ed i più piccoli in particolare, mostrano notevoli irregolarità superficiali, crateri e cicatrici della loro passata evoluzione collisionale, come mostrano ad esempio le immagini degli asteroidi 951 Gaspra e 243 Ida ottenute nei primi anni '90 dalla sonda spaziale Galileo, e quelle dell'asteroide 253 Mathilde ottenute dalla sonda NEAR nel 1997. Tale situazione può essere ricondotta al fatto che solo sugli asteroidi più grossi la gravitazione diventa la forza predominante, livellando le strutture su grande scala e producendo forme di equilibrio simmetriche.

Al crescere della massa totale di un corpo, infatti, le pur deboli forze gravitazionali fra i suoi elementi costituenti vanno via via sommandosi e ogni parte di esso finisce per essere attratta in modo sensibile da tutte le altre. La materia che forma il corpo tende perciò ad assumere la forma più compatta possibile, ossia quella che minimizza le distanze reciproche (senza far crescere oltre un certo limite la densità e la temperatura media): è facile convincersi che, per motivi di simmetria, questa è la forma sferica. Sulla superficie possono certo restare piccole "grinze" (catene montuose, vulcani, ecc.) o depressioni (crateri, *canyon*), che resistono alla "livella gravitazionale" grazie alla rigidità della crosta, dovuta alle forze di stato solido. Ma se queste strutture crescessero troppo le rocce si spezzerebbero o si deformerebbero sotto il proprio peso, rigenerando una forma che approssima quella sferica. È per questo motivo dunque che i pianeti e i loro satelliti maggiori, che possiedono una massa sufficiente a generare forze gravitazionali significative, hanno tutti una forma sferoidale, mentre la stessa cosa non si può dire per oggetti più piccoli come gli asteroidi.

## ***CURVE DI LUCE***

Il metodo migliore per ottenere il periodo di rotazione di un oggetto roccioso come un asteroide è quello di osservarne le variazioni di luce: poiché la luminosità del pianetino varia principalmente in relazione all'estensione della superficie illuminata dal Sole che esso ci mostra, osservazioni eseguite nell'arco di alcuni giorni possono facilmente ricondurre a una buona determinazione del periodo rotazionale, e fornire più in generale informazioni preziose sulla morfologia globale dell'asteroide. Tali informazioni sono quindi desunte dall'analisi della cosiddetta *curva di luce*, un grafico che mette in relazione la magnitudine dell'oggetto – ossia la sua luminosità apparente – con il tempo.

La variazione periodica della magnitudine degli asteroidi fu notata solo a partire dal 1901, allorché E. Oppolzer, mentre era intento ad effettuare misure sull'asteroide 433 Eros nell'ambito della campagna per la determinazione accurata della parallasse solare e quindi della distanza media Terra-Sole, osservò per la prima volta i cambiamenti di luminosità del pianetino. Per alcuni anni comunque restò il dubbio, nella comunità scientifica, di sapere se la variazione di luce fosse una caratteristica comune a tutti i pianetini o tipica del solo Eros, dal momento che i primi strumenti di misurazione della luce di un astro presentavano tutti un ampio margine di errore; per questo motivo l'analisi sistematica delle curve di luce degli asteroidi fu intrapresa solo a partire dai primi anni '50. Ai giorni nostri questi studi vengono condotti generalmente con degli apparecchi chiamati "fotometri fotoelettrici"; come indica il nome, si tratta di strumenti che misurano la luce, e il principio del loro funzionamento è il seguente: la luce viene fatta giungere su una cellula fotoelettrica (*fotocatodo*), dove i fotoni in arrivo "strappano" un certo numero di elettroni, che una cospicua differenza di potenziale accelera su di un anodo. Qui essi giungono moltiplicati, grazie a una serie di urti contro elettrodi sistemati in modo opportuno (*dinodi*); dal numero degli elettroni "strappati" si può ricavare alla fine un valore molto preciso dei fotoni in arrivo e quindi della luce che ci perviene dall'astro puntato. L'accuratezza della misura si attesta più o meno entro 1/100 di magnitudine, scarto ritenuto più che soddisfacente per le osservazioni. Naturalmente questo genere di dispositivi, a parte l'elevato costo, presentano l'inconveniente dell'ingombro, del peso e della complessità di gestione, il che fa sì che siano usati quasi esclusivamente da professionisti; i dilettanti invece devono necessariamente ripiegare sui CCD amatoriali, che permettono lo stesso tipo di ricerca ad un costo più contenuto.

La tipica curva di luce di un asteroide è una curva periodica, cioè si ripete nel tempo con un periodo corrispondente al periodo di rotazione sinodica dell'asteroide, e la regolarità è data dal fatto che normalmente l'oggetto ruota attorno a un asse fisso in maniera uniforme (ma esistono alcune eccezioni, come si vedrà più avanti). Poiché la forma degli asteroidi non è necessariamente simmetrica, una tipica curva di luce di un pianetino presenta per lo più due distinti massimi e minimi per ogni ciclo, a seconda che l'oggetto ruotando volga all'osservatore terrestre le due superfici di area massima e di area minima. Non sono peraltro rarissimi i casi anomali, con curve di luce dotate di più di due massimi o minimi per ciclo, o magari dall'andamento decisamente asimmetrico: per queste la spiegazione comunemente accettata fa appello a forme geometriche molto diverse da quella "liscia" di un ellissoide, oppure alla presenza sulla superficie di enormi crateri da impatto. In grafici normali, comunque, il periodo di rotazione del pianetino è dato dalla distanza fra le ascisse di due identici massimi o minimi. Qualora non sia possibile determinare l'intera curva di luce nell'arco di una notte, lo stesso periodo si può in ogni caso ottenere grossolanamente prendendo nella curva di luce la distanza fra l'ascissa del minimo e quella del massimo (o viceversa) e moltiplicando questo scarto temporale per 4; studi fotometrici più accurati possono poi portare alla determinazione finale. Si è visto in tal modo che i periodi di rotazione degli asteroidi possono variare da qualche decina di minuti a diversi giorni o addirittura settimane, nei casi più rari, sebbene la maggior parte di essi ruoti in tempi compresi fra le 4 e le 12 ore. Calcoli teorici indicano che se un asteroide ruotasse più velocemente potrebbe perdere materiale dalla

superficie; inoltre si può osservare che, all'interno di una certa classe, i pianetini più grandi e più densi ruotano più rapidamente.

Sembrirebbe a questo punto facile dedurre la forma di un asteroide dalle sue variazioni di luce; in realtà bisogna tenere presente il ruolo di primaria importanza che gioca l'inclinazione dell'asse di rotazione rispetto alla direzione pianetino-Terra. Se infatti la differenza fra massimo e minimo della curva di luce dipende in prima analisi dalla forma più o meno elongata dell'oggetto che si osserva (la differenza di una magnitudine corrisponde ad un rapporto di circa 2,5 fra i due assi dell'asteroide perpendicolari a quello di rotazione), l'ampiezza della variazione è diversa, nelle varie opposizioni, in relazione alla posizione relativa di queste due direzioni. A titolo di esempio possiamo dire che se un asteroide si presenta a noi con una visione polare, ossia con l'asse di rotazione diretto verso la Terra, esso potrà magari anche essere un corpo molto allungato, ma in tali condizioni non presenterà alcuna variazione di luminosità. Lo stesso oggetto potrà invece raggiungere una rilevante ampiezza nella curva di luce qualora si presenti sotto una visione equatoriale, ossia con l'asse di rotazione perpendicolare alla linea di vista. Ma naturalmente questi sono due casi limite, e di conseguenza per diverse posizioni relative della Terra e del pianetino l'asse di rotazione di quest'ultimo può formare angoli diversi con la linea visuale. Ciò comporta che per osservazioni fatte in anni diversi la curva di luce può variare sensibilmente la propria ampiezza, e solo quando si sarà determinato in maniera inequivocabile in che modo cambia l'ampiezza della curva in funzione della mutua posizione dei due corpi, sarà possibile, con adeguati calcoli matematici e geometrici, risalire alla direzione "assoluta" dell'asse rotazionale, condizione indispensabile per conoscere la vera forma dell'oggetto. In questo caso i risultati mostrano che, al contrario delle rotazioni ordinate della maggior parte dei pianeti principali, gli assi di rotazione degli asteroidi sembrano essere orientati piuttosto casualmente nello spazio, un fatto che può essere ricondotto alle frequenti collisioni subite da questi oggetti durante la loro storia.

## ***L'ALBEDO***

È stata l'analisi delle curve di luce a dimostrare che la stragrande maggioranza dei pianetini sono da considerare allungati e di forma certamente non regolare: infatti un ideale asteroide di forma sferica non presenterebbe alcuna variazione di luminosità, essendo costante l'area della superficie rivolta verso l'osservatore. Se accogliamo allora l'ipotesi di una forma ellissoidale, le variazioni crescono in funzione del rapporto tra i due semiassi maggiori del pianetino (ossia quanto più esso è ellittico, tanto più la variazione è grande). Le tipiche variazioni di luminosità sono comprese tra alcuni centesimi di magnitudine e 1-2 magnitudini, ma il livello di questi estremi può differire in relazione – oltre che alla forma – anche al diverso potere riflettente o alla differente rugosità superficiale presenti nelle varie parti dell'oggetto.

Il *potere riflettente* (o *albedo*, o *riflettività*) è un coefficiente numerico dato dal rapporto tra la quantità di radiazione solare riflessa e quella ricevuta. Naturalmente tale radiazione può essere considerata come suddivisa in varie componenti, ossia in diversi intervalli di lunghezza d'onda (infrarosso, visibile, ultravioletto, ecc.), come avviene nella maggior parte dei casi, oppure integrata nel suo complesso.

In realtà si osserva che normalmente le variazioni luminose sono troppo grandi o troppo simmetriche per poter essere attribuite soltanto a differenze di albedo locali, e quindi a difformità presenti sulla superficie del pianetino. Tale convinzione è oltretutto avvalorata dalle osservazioni in diversi colori, che non mostrano in genere variazioni superiori all'errore strumentale. Più esattamente dovremmo dire che gli asteroidi sono corpi irregolari e in parte "macchiati", ma il contributo di queste "macchie", quando ve ne sono, è molto piccolo se paragonato a quello della forma. Tuttavia la conoscenza dell'albedo di un pianetino si dimostra essenziale, tra le altre cose, per stimarne le dimensioni, e questo parametro può essere determinato in diversi modi. Particolarmente interessanti in questa sede sono i metodi *radiometrico* e *polarimetrico*, già citati

precedentemente in relazione al fatto che hanno consentito la determinazione accurata dei diametri di un gran numero di asteroidi. Diamo dunque di seguito una breve spiegazione di entrambi i metodi, cominciando col primo, quello radiometrico.

L'idea su cui si basa questa tecnica è che gli asteroidi in generale emettono non solo radiazione solare riflessa alle lunghezze d'onda della luce visibile, ma anche radiazione termica corrispondente alla loro temperatura superficiale. È noto infatti che qualsiasi corpo emette radiazione elettromagnetica in modo dipendente dalla sua temperatura. Corpi a temperature elevate, come le stelle, irradiano alle lunghezze d'onda della luce visibile, mentre corpi a temperature più basse irradiano prevalentemente a lunghezze d'onda maggiori, a partire dal vicino e medio infrarosso (l'occhio umano non è sensibile alla radiazione a queste lunghezze d'onda, ma molti sensori utilizzati in astronomia lo sono). In una situazione stazionaria, l'energia incidente su un oggetto che non viene riflessa deve essere assorbita e poi reirradiata, per lo più sotto forma di radiazione termica che è essenzialmente infrarossa, e l'asteroide stesso può essere con buona approssimazione assimilato a un corpo nero in equilibrio termico con la luce solare che lo illumina. Per quanto si è detto in precedenza, gli asteroidi irradiano sia radiazione termica infrarossa sia luce solare riflessa alle lunghezze d'onda visibili. In ultima analisi, sia la radiazione termica di un oggetto sia la quantità di luce solare che esso riflette dipendono entrambe dalle sue dimensioni e dal suo potere riflettente. Infatti un oggetto "scuro", che riflette di meno, assorbe maggiori quantità di energia dal Sole, e di conseguenza si scalda di più (è più luminoso se osservato nell'infrarosso) che non un corpo "chiaro" delle stesse dimensioni. Osservando dunque simultaneamente la luminosità dell'oggetto nell'infrarosso termico (a lunghezze d'onda attorno ai 10 micron, dove si ha il massimo dell'irraggiamento) e nel visibile (tra 0,4 e 0,8 micron), dal confronto è possibile risalire alle sue dimensioni e alla sua riflettività superficiale. Con questo "trucco", i planetologi sono riusciti in passato a misurare indirettamente le dimensioni di circa 2500 pianetini.

La tecnica polarimetrica, invece, si basa sul fatto che la superficie di un asteroide polarizza la luce solare che riflette, cioè obbliga le onde luminose ad oscillare esclusivamente lungo un piano. Il grado di polarizzazione muta in funzione dell'angolo di fase (angolo Sole-asteroide-osservatore), e sembra essere correlato con l'albedo: tanto maggiore è il cambiamento nella polarizzazione con il variare dell'angolo di fase, tanto più scura è la superficie dell'asteroide. Misurando le proprietà di polarizzazione della luce proveniente dagli asteroidi, ed utilizzando questa relazione, tarata in laboratorio con campioni di rocce e meteoriti, è così possibile ottenere ancora una volta una misura dell'albedo. Tale metodo richiede però un gran numero di osservazioni in tempi diversi (e quindi a fasi diverse del pianetino), ed è perciò più complesso della radiometria.

Il coefficiente di albedo varia di norma tra 0 e 1, estremi che stanno a significare rispettivamente l'assorbimento totale e la riflessione totale della radiazione in arrivo; quindi dire che un pianeta – ad esempio Venere – ha un'albedo visuale pari a 0,65 significa dire che esso riflette nel visibile il 65% della luce solare che riceve. Nel caso di Venere tale valore elevato non è dovuto alla riflessione operata da una superficie solida, bensì a quella determinata dalla sua densa atmosfera, che lo rende altresì luminosissimo alle osservazioni compiute da terra. Se si considerano invece gli asteroidi, che sono corpi assolutamente privi di atmosfera per via della loro debolissima gravità superficiale, si può notare che la loro albedo è di gran lunga inferiore, e varia generalmente tra 0,02 e 0,5 circa, il che equivale a dire che possono riflettere dal 2% al 50% della luce solare: per avere un'idea, basti pensare che l'albedo della neve fresca è circa 1, mentre quella del carbone è circa 0,05. Un valore medio di 0,15 li pone in ogni caso tra gli oggetti più scuri che si possono incontrare nel Sistema Solare, e il diverso potere riflettente alle varie lunghezze d'onda dà luogo alla differenza di colorazione, strettamente connessa alla composizione chimica, che come si vedrà sta alla base della loro classificazione.

## *MASSA E DENSITA'*

La massa è, tra i vari parametri fisici, quello che viene in mente per primo di voler conoscere; purtroppo la stima della massa di un corpo celeste è sempre molto difficile e, nel caso degli asteroidi, si riesce a valutare solo quella degli oggetti più grandi tramite la teoria delle perturbazioni. Infatti, dal momento che i maggiori asteroidi della fascia principale (Cerere, Pallade e Vesta) causano perturbazioni, sull'orbita di Marte, nell'ordine di 50 metri in tempi scala di 10 anni o meno, si possono usare queste deviazioni rispetto all'orbita teorica e imperturbata per stimare le masse di questi tre asteroidi. Si trova così che Cerere possiede circa l'1,18% della massa della Luna, Pallade lo 0,43% e Vesta lo 0,41%. Si deve tuttavia rilevare che, sebbene il numero di pianetini sia sterminato, la loro massa globale è quasi tutta contenuta proprio negli oggetti più grandi; pertanto possiamo dire che, come si era già accennato all'inizio, tutti gli asteroidi del Sistema Solare riuniti assieme hanno una massa attuale molto minore di quella di un pianeta, che viene valutata in appena 0,0007 volte la massa della Terra, ovvero il 6% di quella della Luna (un ragionevole limite superiore potrebbe essere posto in 1 millesimo della massa terrestre). Naturalmente questo non esclude la possibilità che in passato in quella zona vi fosse molta più materia, come viene anzi in parte suggerito dall'esame dei modelli evolutivi.

Dalle misure di massa e da quelle di diametro, in genere noto con maggiore precisione, si possono ottenere tramite il rapporto massa/volume anche stime di densità media. Queste mostrano che la densità degli asteroidi può variare da 1 g/cm<sup>3</sup> (pari a quella dell'acqua) a 8 g/cm<sup>3</sup>, anche se i valori tipici risultano compresi tra 2 e 3,5 g/cm<sup>3</sup>. Ad esempio, riferendoci ancora a una volta ai tre maggiori asteroidi della fascia principale, risulta che Cerere ha una densità media di 2,3 g/cm<sup>3</sup>, Pallade di 3,4 g/cm<sup>3</sup> e Vesta di 4,0 g/cm<sup>3</sup>. Per confronto, la densità media della Terra è di 5,52 g/cm<sup>3</sup>, a causa del fatto che il nostro pianeta presenta un nucleo semifluido costituito da elementi metallici "pesanti". La densità media è un parametro fisico molto importante, che può fornirci informazioni sia sulla composizione che sulla struttura complessiva di un oggetto: anche nel caso dei pianetini, la maggior parte dei quali non presentano una struttura stratificata, le differenze di densità possono essere agevolmente ricondotte alla composizione chimica.

Finora le migliori misure di questo dato fisico sono state ottenute dalla deflessione subita dalle sonde spaziali Galileo e NEAR che sono transitate in prossimità di questi oggetti. Tali incontri sono però molto rari, e, anche nel caso di passaggi ravvicinati tra asteroidi, le deviazioni che questi subiscono sono così piccole da essere molto difficili da misurare. Nel caso invece di asteroidi doppi o binari il periodo di rivoluzione del satellite fornisce una misura della massa del corpo principale e quindi, conoscendo le sue dimensioni, della densità media.

Dalle stime di densità media emerge pure un'altra cosa: sugli asteroidi maggiori la velocità di fuga (velocità necessaria per sfuggire al campo gravitazionale di un oggetto dotato di massa) è dell'ordine delle centinaia di metri al secondo, ma scende sensibilmente nel caso dei corpi più piccoli. Per questi ultimi può valere la seguente regola approssimata: la velocità di fuga dell'oggetto espressa in metri al secondo è circa pari, come valore numerico, al suo raggio in chilometri. In altre parole, a un ipotetico astronauta che si trovasse sulla superficie di un pianetino del diametro di pochi chilometri sarebbe sufficiente un balzo un po' energico per sollevarsi dal suolo senza ricadere, e perdersi per sempre nello spazio.

## CLASSIFICAZIONE TASSONOMICA

Lo studio fisico della superficie degli asteroidi viene condotto con parecchie tecniche diverse, i cui nomi sono stati finora parzialmente accennati: fotometria, spettroscopia, interferometria a macchie (*speckle interferometry*), radiometria e polarimetria. Le misurazioni vengono integrate su tutta la zona visibile a un dato istante, ossia normalmente un intero emisfero o una sua parte significativa, limitandosi allo studio delle caratteristiche globali.

L'uso della spettroscopia nello studio dei pianetini risale al 1929, quando N.T. Bobrovnikoff (*Lick Observatory*) applicò ad alcuni asteroidi i metodi già propri della spettroscopia stellare, scoprendo le differenze tra lo spettro di Vesta e quello di altri pianetini. Il principio era semplicissimo, e cioè che le rocce e i minerali differiscono nelle loro proprietà di riflettere la luce: la luce riflessa da un asteroide può essere scissa in componenti di diversa lunghezza d'onda, ed è possibile valutare l'entità relativa di queste componenti. Inizialmente si progettò di confrontare le proprietà di riflessione così ottenute con quelle, misurabili in laboratorio, relative a diversi tipi di meteoriti (seguendo in ciò l'idea, da sempre presente nello studio di questi corpi, che le due classi di oggetti celesti fossero intimamente collegate), con lo scopo di poter trarre delle precise conclusioni sulla composizione chimica degli asteroidi, o almeno della loro superficie. In realtà si scoprì ben presto che interpretare gli spettri di riflessione delle superfici solide era cosa tutt'altro che banale, e in ogni caso non garantiva il grado di precisione sperato. Infatti l'inevitabile alterazione chimica delle meteoriti, indotta dallo *shock* termico conseguente all'interazione con l'atmosfera terrestre, non consente di ricostruire con attendibilità il loro spettro originario; a ciò si deve aggiungere il non aver considerato due caratteristiche degli asteroidi (irregolarità della struttura e rapida rotazione intorno al proprio asse) che rendevano problematica la registrazione corretta dello spettro stesso.

Solo negli anni '50 fu iniziato, da Kuiper e Gehrels (Università dell'Arizona), uno studio astrofisico degli asteroidi con lavori di fotometria fotoelettrica basati sul sistema standard UBV, che misura la luminosità apparente di un oggetto contemporaneamente in tre bande diverse, centrate attorno alle lunghezze d'onda dell'ultravioletto vicino, del blu e del visibile (verde), ottenendo in questo modo indicazioni sul "colore" della luce. Bisogna peraltro sottolineare che nel nostro caso quello che interessa non è tanto il colore della luce inviataci dagli asteroidi, quanto le differenze fra questo e quello tipico della luce solare diretta: le grandezze che si ottengono, dette *indici di colore*, prendono il nome di U-B e B-V, e ci dicono in sostanza qual è la lunghezza d'onda per cui gli asteroidi studiati riflettono meglio la luce.

Tali indagini consentirono di poter operare una prima grossolana distinzione in due gruppi diversi: uno nel quale i colori erano rossastri e la luminosità relativamente elevata e l'altro in cui colori più neutri si accompagnavano ad una bassa luminosità. Altri studi pionieristici condotti nella prima metà degli anni Settanta confermarono che, salvo alcuni pianetini non frequenti, la fascia principale poteva essere divisa in due classi fondamentali di asteroidi diversi per composizione superficiale. Si trovò comunque che la composizione chimica e mineralogica di questi oggetti era in generale molto differenziata, tanto che dall'analisi delle proprietà spettrofotometriche furono riconosciuti una decina di diversi gruppi, detti *tassonomici* e indicati con lettere maiuscole dell'alfabeto, cui oggi si attribuisce solo un valore empirico anche se le denominazioni (o meglio le sigle) usate riflettono chiaramente l'impostazione originaria. La classificazione prevedeva dunque la distinzione degli asteroidi nelle seguenti classi: C, S, M, E, R, U, F, P, D, A. Tra queste, sono tuttavia le prime due quelle preminenti: la C e la S.

La tassonomia attualmente considerata più degna di nota è quella scaturita dalla tesi di dottorato di David J. Tholen (1984) e si basa sui dati relativi ad osservazioni in otto colori su un campione di 589 asteroidi, iniziata da Zellner e collaboratori nel 1979. Essa prevede una suddivisione in 14 classi; a queste ne è stata aggiunta un'altra (K) per opera di Bell e Tedesco (1989) a seguito dell'osservazione della famiglia di Eros, ed altre due (J e O) da Shui Xu ed altri (1995) a seguito

dell'osservazione di piccoli asteroidi della fascia principale. Tuttavia la vecchia classificazione non è mai stata del tutto abbandonata, e per semplicità è quella che considereremo a seguire.

I pianetini del tipo tassonomico C (dall'inglese *Carbonaceous*) rappresentano la netta maggioranza della popolazione della fascia asteroidale: hanno un colore neutro e un'albedo molto bassa, compresa fra 0,02 e 0,08, pertanto sono molto scuri (sono infatti detti molto spesso *dark asteroids*); ricchi di carbonati, minerali opachi e fotoassorbenti, si suppone abbiano una composizione quasi del tutto simile a quella di certe rare meteoriti note come *condriti carbonacee* (in particolare le classi CI e CM). Gli asteroidi del tipo tassonomico S (da *Stony*, ossia roccioso) presentano invece le caratteristiche spettrali dei corpi composti prevalentemente da rocce silicacee: alta riflettività (albedo media compresa fra 0,15 e 0,25), bande di assorbimento nell'infrarosso imputabili alla presenza di composti di minerali come l'*olivina* e il *pirosseno*, e una colorazione spiccatamente rossastra che viene attribuita all'abbondanza relativamente alta di metalli quali il ferro e il nichel.

I pianetini del tipo fisico S sono oggi indicati da molti scienziati come i corpi progenitori delle *condriti ordinarie*, le meteoriti più comuni che si possono trovare sul nostro pianeta, sebbene questa origine, inizialmente, non fosse pienamente confermata dagli esami di laboratorio, che mostravano sottili ma evidenti differenze negli spettri relativi ai due oggetti (*paradosso spettrofotometrico*). Per esempio, era diverso il rapporto olivine/pirosseni e inoltre non si riusciva a conciliare il debole arrossamento degli asteroidi S con il colore sostanzialmente neutro delle condriti ordinarie. Quello che è certo è che un campione di oltre mille asteroidi di tipo S mostra un ampio spettro di colori: a un estremo c'è il rosso-bruno che caratterizza gli oggetti di maggiori dimensioni; tale colorazione si attenua al diminuire delle dimensioni ed infatti all'altro estremo troviamo il 10% degli asteroidi più piccoli, con dimensioni dell'ordine del chilometro e un colore del tutto simile a quello delle condriti ordinarie. Procedendo negli studi, gli asteroidi di tipo S sono stati suddivisi in ben 7 sottoclassi: tra queste, quella che più si avvicina per composizione alle condriti è la sottoclasse IV, a cui appartiene anche l'asteroide Eros.

In generale si osserva che più piccole sono le dimensioni degli asteroidi di tipo S, più il loro colore tende ad essere simile a quello delle condriti ordinarie. Poiché gli oggetti più piccoli sono anche considerati più giovani, cioè originatisi a seguito di impatti recenti, esiste il fondato sospetto che qualche tipo di processo di "invecchiamento" (ad esempio la lunga esposizione a vari agenti quali radiazioni solari, raggi cosmici, microimpatti da parte di polveri interplanetarie, ecc.) possa essere responsabile dell'incremento di luminosità alle lunghezze d'onda maggiori (arrossamento) della superficie degli asteroidi più grandi e più antichi; un'ipotesi confermata anche da esperimenti di laboratorio. Questo processo – detto *weathering*, per usare la terminologia degli specialisti – avrebbe l'effetto di "imbrunire" tali superfici alterandone la composizione chimica e "mascherandone" le caratteristiche spettrali originarie in modo tanto più sensibile quanto più grande e massiccio è l'oggetto in questione. Da vecchia data esisteva il sospetto che le superfici dei corpi planetari privi di atmosfera subissero trasformazioni con il tempo, e un primo indizio di ciò fu riscontrato nelle immagini dell'asteroide 951 Gaspra riprese dalla sonda Galileo in viaggio verso Giove. I numerosi crateri da impatto presenti sulla sua superficie apparivano infatti di colore diverso a seconda della loro età: i più giovani, che mostravano il materiale fresco messo alla luce dall'impatto, erano grigiastri, mentre quelli più antichi presentavano un arrossamento più o meno forte.

Chiusa questa parentesi, per quanto riguarda le altre categorie possiamo dire che con la lettera M si indicano pianetini piuttosto rari dalle caratteristiche intermedie fra gli S e i C, che presentano alcune somiglianze spettroscopiche con le *sideriti*, ossia con le meteoriti metalliche ricche di ferro e nichel (da qui la sigla M, che sta appunto per "metallici"); tale composizione è stata anche suggerita dall'alta riflettività presentata nei confronti delle radioonde inviate dalle antenne radar. Questi oggetti occupano di preferenza una zona intermedia della fascia asteroidale, ed hanno una velocità di rotazione molto alta. Con la lettera E sono indicati asteroidi con albedo assai elevata (0,4 e più) presumibilmente composti da *enstatite*, un silicato di magnesio appartenente al gruppo dei pirosseni. Gli asteroidi del gruppo R sono costituiti da silicati ferrosi, presentano di regola una

colorazione “rossa” e un'albedo maggiore di 0,16; assieme ai precedenti pianetini del gruppo E predominano nel bordo più interno della fascia principale. Alla classe U appartengono oggetti “ibridi” dalle caratteristiche non perfettamente delineate e che sicuramente non possono rientrare negli altri tipi tassonomici, come l'asteroide Vesta. Gli asteroidi del gruppo F sono tipici della regione esterna della fascia principale, hanno una bassa albedo e un colore tendente al blu. Altri pianetini indicati con la lettera P denotano una riflettività decisamente modesta, hanno un colore più rossastro e anch'essi popolano la zona esterna alla fascia degli asteroidi ma interna all'orbita di Giove. Quelli del gruppo D, ancora più scuri (albedo 0,03-0,04) ed arrossati, sono relativamente abbondanti tra gli asteroidi più lontani, e in particolare caratterizzano la famiglia dei *Troiani* (vedere oltre), situati sull'orbita di Giove. Gli asteroidi del tipo A, infine, sembrano composti principalmente da olivina, un minerale assai comune nel mantello della Terra.

Si sarà osservato finora che la distinzione fra i vari gruppi tassonomici corrisponde anche a una diversa distribuzione spaziale degli stessi. L'esempio più evidente è dato dai pianetini del tipo S, che occupano di preferenza la parte interna della fascia principale, diversamente da quelli più numerosi del tipo C, che orbitano nella zona esterna. Questa regolare variazione di composizione con l'aumentare della distanza dal Sole potrebbe riflettere la variazione in composizione della nebulosa da cui si è condensato il Sistema Solare, e quindi si potrebbe pensare che gli asteroidi rappresentino un campione delle sue condizioni primordiali. Tuttavia questa ipotesi pecca di eccessiva semplificazione, dal momento che molte classi indicherebbero gradi diversi di alterazioni termiche; quindi si deve piuttosto ritenere che la composizione cambi con la distanza dal Sole a causa del fatto che i vari corpi, la cui velocità di formazione era in origine diversa, sarebbero stati sottoposti a un diverso grado di riscaldamento, e di conseguenza a una differenziazione più o meno marcata. Anche la riflettività tende a calare con l'aumentare della distanza: gli asteroidi con l'albedo più alta si trovano vicino al bordo interno della fascia principale, mentre quelli più distanti hanno in media un minor potere riflettente. Questo fatto è di nuovo collegato alle condizioni nella nebulosa solare primordiale, in particolare alla diminuzione della temperatura col crescere della distanza dal Sole: i materiali più scuri, ricchi di carbonio e acqua, si sono potuti condensare nelle regioni più fredde e lontane dalla stella, mentre i materiali rocciosi brillanti erano meno volatili e sono potuti rimanere all'interno delle regioni più calde e vicine al Sole.

Il fatto che la distribuzione delle classi mostri un gradiente composizionale con la distanza eliocentrica ha portato a identificare tre super-classi per cercare di interpretare in modo più adeguato la corrente tassonomia: si differenziano in tal modo i gruppi *igneo*, *metamorfico* e *primitivo*.

Gli oggetti del gruppo primitivo si collocano nella zona esterna della fascia principale (tipi tassonomici C e D): essi subirono qualche tipo di evento di riscaldamento ma in modo assai limitato. L'acqua potrebbe pertanto essere presente solo come ghiaccio e la bassa temperatura non consentirebbe le reazioni di idratazione per le quali è necessaria la presenza di acqua liquida, e dunque la fusione del ghiaccio. Gli oggetti del gruppo metamorfico popolano la regione compresa tra la parte centrale e quella esterna della fascia principale, e sono stati riscaldati quanto basta per mostrare cambiamenti spettrali indicatori della presenza di acqua allo stato liquido. Gli oggetti del gruppo igneo, infine, occupano la zona più interna della fascia principale ed hanno probabilmente subito processi di fusione.

In effetti si osservano corpi che furono completamente fusi nel corso della loro storia: un esempio classico è quello del grande asteroide 4 Vesta, che possiede una crosta basaltica spiegabile solo ammettendo che questo pianetino subì un episodio di fusione completa accompagnato da *differenziazione*, vale a dire il fenomeno per cui i materiali più pesanti, come i metalli, sprofondano nel nucleo interno, mentre i materiali più leggeri, come i basalti, vengono a galla in superficie. Altri esempi sono suggeriti dalla presenza di asteroidi con composizione prevalentemente metallica; anche questi oggetti dovrebbero essere i nuclei ferrosi di corpi progenitori differenziati, che perdettero in seguito gli strati più esterni per effetto delle collisioni.

Naturalmente l'esistenza di asteroidi fusi richiede a sua volta l'esistenza di meccanismi in grado di fonderli. Uno dei più noti è legato alla presenza di *isotopi radioattivi instabili*, come l'isotopo 26 dell'alluminio. Tali isotopi decadono spontaneamente in tempi scala variabili da elemento a elemento, e producono calore. In un corpo planetario di dimensioni sufficientemente cospicue il calore si accumula e produce una fusione dell'interno: questi processi hanno sicuramente interessato tutti i pianeti maggiori, inclusa la nostra Terra, e sono stati responsabili del magma primordiale da cui si sono andati formando i pianeti solidi del Sistema Solare. Non è invece chiaro il motivo per cui Cerere, l'asteroide più grande della fascia principale, mostri una composizione primitiva che non venne probabilmente mai influenzata da fenomeni significativi di riscaldamento.

## ***CARATTERISTICHE ORBITALI***

Le orbite degli asteroidi presentano una casistica molto ampia. Esse non sono in genere né circolari né accuratamente disposte sul piano dell'eclittica (il piano che contiene l'orbita della Terra): le eccentricità tipiche sono comprese tra 0,05 e 0,3, con un valor medio di 0,15, mentre le inclinazioni vanno normalmente da 0 a 35 gradi con un valore caratteristico di 8-10 gradi. Questi valori medi non escludono ovviamente la presenza di oggetti con orbite molto più circolari e meno inclinate, o viceversa: si hanno infatti a volte orbite ellittiche molto schiacciate (con  $e > 0,3$ ) simili quasi alle orbite cometarie, con inclinazioni che in alcuni casi possono oltrepassare i 60°, sebbene la maggior parte di essi giaccia comunque in prossimità dell'eclittica.

Per questo motivo si comprende come uno dei passi fondamentali nello studio dei pianetini sia indubbiamente costituito dall'analisi della distribuzione di questi ultimi all'interno del Sistema Solare: la zona popolata dagli asteroidi si è rivelata un vero e proprio "zoo dinamico" animato da complessi meccanismi che ne regolano il funzionamento; un eccellente banco di prova per le sofisticate teorie della meccanica celeste, cioè di quel ramo della fisica matematica che si occupa di calcolare le orbite dei corpi celesti e poi studiarne le variazioni nel corso del tempo. Nel caso degli asteroidi, che hanno massa praticamente trascurabile se confrontata a quella dei pianeti, l'evoluzione dinamica può essere indagata sotto l'effetto delle perturbazioni prodotte proprio dai pianeti maggiori. Cominciamo quindi con l'esaminare la distribuzione degli asteroidi nello spazio.

## ***DISTRIBUZIONE SPAZIALE***

La distribuzione dinamica più interessante da studiare riguarda senza dubbio il numero di asteroidi in funzione del semiasse maggiore dell'orbita, ovvero della distanza media dal Sole durante una rivoluzione: la quasi totalità degli asteroidi, come tutti sanno, ha orbite comprese fra quella di Marte, che ha una distanza media dal Sole di circa 228 milioni di chilometri (pari a 1,5 UA), e quella di Giove, situata a 778 milioni di chilometri dal Sole (5,2 UA). Si osserva però che ben il 95% di essi si concentra in una regione più stretta del Sistema Solare, compresa tra circa 2,1 e 3,6 UA dal Sole: la cosiddetta "*fascia principale degli asteroidi*", che potremmo immaginare come un anello largo 224 milioni di chilometri ed altrettanto spesso: il volume che ne risulta, circa  $10^{26}$  km<sup>3</sup> (ovvero 30 UA<sup>3</sup>), è troppo vasto perché anche la presenza di tutti questi oggetti messi assieme possa realmente riempirlo. Ed infatti all'interno di questa zona la distribuzione non è omogenea: nel 1866 l'astronomo americano Daniel Kirkwood si accorse che in corrispondenza di alcuni valori del semiasse maggiore  $a$  dell'orbita si evidenziavano profonde lacune, zone pressoché prive di oggetti che da lui presero il nome di "*lacune di Kirkwood*" (è da notare che all'epoca erano solo una novantina gli asteroidi scoperti e catalogati). Ricordando che il semiasse  $a$  è legato dalla terza legge di Keplero al periodo dell'orbita stessa, si è scoperto che le lacune si trovano in corrispondenza di orbite *risonanti* con quella di Giove, ovvero i cui periodi di rivoluzione stanno in rapporti numerici semplici con quello del pianeta gigante: 1/4, 1/3, 2/5, 3/7, 1/2, 3/5, ... (ma è altresì valida la dicitura: 4:1, 3:1, 5:2, 7:3, 2:1, 5:3, ...). Ad esempio, la risonanza 1/4 sta a significare che per un periodo del corpo più esterno quello più interno ne completa quattro. Queste risonanze prendono il nome di *risonanze di moto medio*, ed il loro effetto è in un certo senso analogo alle spinte ripetute su un'altalena o un pendolo: se le spinte avvengono allo stesso punto di ogni oscillazione, possono aumentare l'energia del moto. In assenza di tali risonanze le perturbazioni sarebbero invece casuali, e farebbero crescere e diminuire in egual misura l'orbita di un asteroide, cosicché col tempo non si accumulerebbe alcun effetto netto. Le risonanze di moto medio con Giove sono più importanti rispetto a quelle con gli altri pianeti, poiché Giove è il pianeta più grosso e il più vicino agli asteroidi.

Fisicamente la risonanza fra due corpi implica che dopo un certo numero (piccolo) di periodi orbitali le stesse configurazioni spaziali si riproducono con grande precisione: fra i pianetini e

Giove si ripetono quindi piuttosto frequentemente situazioni di congiunzione durante le quali la distanza fra essi è minima e l'attrazione gravitazionale per contro massima. Mentre per la grande differenza di massa Giove non risente affatto della presenza degli asteroidi, questi ultimi vengono invece puntualmente influenzati dalla sua vicinanza, e l'interesse nello studio delle risonanze sta in questo caso nel fatto che la perturbazione dovuta proprio al pianeta gigante può combinarne di tutti i colori: l'orbita asteroidale può restare bloccata in una configurazione di equilibrio stabile per miliardi di anni; oppure può oscillare come quella di un pendolo, variando periodicamente tutti i suoi parametri orbitali con diverse ampiezze; od ancora può improvvisamente "impazzire", subendo variazioni rapide e imprevedibili ("caotiche") di eccentricità e di inclinazione che alla fine possono portare a un incontro ravvicinato con un pianeta, o anche alla fuga definitiva dal Sistema Solare. Le lacune di Kirkwood appaiono dunque come zone "proibite", che vengono accuratamente evitate poiché le corrispondenti orbite sono caotiche e instabili: ad esempio i semiassi maggiori compresi tra 2,48 e 2,52 UA dal Sole, dove si verifica la risonanza 1/3 con Giove, delimitano una vasta regione caotica in cui si può avere forte aumento dell'eccentricità su scale di tempo dell'ordine del milione di anni. Viceversa a volte si incontrano dei raggruppamenti di oggetti che viaggiano su orbite favorite in perfetta sincronizzazione col pianeta gigante: a quest'ultima categoria appartengono per esempio, nella regione semivuota tra il confine esterno della fascia principale e l'orbita di Giove, gli asteroidi del gruppo "Hilda" (risonanza 2/3, semiasse di circa 3,98 UA) e del più ristretto gruppo "Thule" (risonanza 3/4, orbite quasi circolari e poco inclinate, a 4,28 UA dal Sole). Una situazione analoga si può riscontrare negli anelli di Saturno, che non sono omogeneamente distribuiti nel piano equatoriale del pianeta bensì presentano anch'essi dei "gap di risonanza" a distanze ben determinate, in cui vi è la quasi totale assenza di materiale (basti pensare alla divisione di Cassini e alla divisione di Encke, ambedue visibili dalla Terra). Non è ancora del tutto chiaro il motivo per cui le risonanze dovrebbero corrispondere a zone vuote piuttosto che a zone piene di oggetti; pare che esse siano in grado di assicurare una certa stabilità a pochi oggetti mentre, forse anche a causa della zona di forte instabilità dinamica circostante, tendano a dissipare rapidamente – probabilmente tramite collisioni – gli addensamenti che superino un certo livello. In effetti, i sopraccitati gruppi Hilda e Thule, caratterizzati da risonanze stabili, sono costituiti da pochi asteroidi, a riprova di questa tesi.

Con un'immagine abbastanza pittoresca, potremmo dire che la fascia degli asteroidi assomiglia un po' a un tavolo da biliardo: nella maggior parte dei casi i moti che vi si svolgono sono regolari e prevedibili, ma qualche volta si può "finire in buca" e allora succedono cose strane e inusuali. I confini e la struttura di alcune lacune (la 1/3 e la 2/5) sono relativamente ben compresi e riprodotti tanto dagli esperimenti numerici che dalle teorie analitiche: fin dagli anni '70 si sospettava che queste lacune potessero servire da "vie di fuga" per i frammenti asteroidali casualmente caduti al loro interno in seguito al cambiamento di velocità indotto da un impatto. Oggi sappiamo che queste risonanze contengono varie regioni caotiche, che portano, su tempi scala di qualche decina o al più centinaia di migliaia di anni, a drastiche variazioni di eccentricità fino a valori sufficienti a causare incontri ravvicinati con i pianeti. Sono stati anche osservati oggetti molto vicini ai bordi delle lacune, che potremmo definire "sull'orlo del precipizio" per la loro situazione precaria: le loro orbite, integrate numericamente nel passato e nel futuro, restano stabili solo per un limitato periodo di tempo dell'ordine di pochi milioni di anni, dopodiché "cadono" nella lacuna e nei sopraccitati tempi scala la loro eccentricità cresce progressivamente fino a causare incontri ravvicinati con pianeti, farli cadere dritti nel Sole, trasformare le loro orbite in tipo cometario o addirittura espellerli dal Sistema Solare su traiettorie iperboliche. Molte volte basta una minima differenza nel semiasse maggiore, dell'ordine del millesimo di Unità Astronomica, per far scivolare un oggetto dalla stabilità al caos.

## ***I PIANETINI TROIANI***

Un'interessante peculiarità è rappresentata dai cosiddetti pianetini *Troiani*: questi sono in risonanza 1/1 con Giove e descrivono la sua stessa orbita, mantenendosi però divisi in due gruppi (a volte denominati rispettivamente, e più propriamente, *Greci e Troiani*) che lo precedono e lo seguono di 60 gradi, in modo da formare con Giove stesso e col Sole dei triangoli equilateri che ruotano rigidamente intorno al vertice rappresentato dal Sole.

La possibilità della loro esistenza era stata predetta dal matematico Giuseppe Luigi Lagrange sulla base del *problema dei tre corpi*: si tratta di un problema classico della meccanica che si prefigge di studiare il moto di tre punti materiali posti in un sistema isolato e soggetti solo alla reciproca forza gravitazionale. Come in seguito avrebbe dimostrato il matematico francese Henri Poincaré, normalmente questo problema non ha soluzione esatta. Ma può ammetterla se si suppone, ad esempio, che una delle tre masse sia molto minore delle altre due: sulla base di questa ipotesi, la soluzione analitica trovata da Lagrange nel 1772 identificava due punti di equilibrio nei vertici dei suddetti triangoli rotanti. In tali punti, indicati con  $L_4$  e  $L_5$  e detti "di librazione", il campo gravitazionale combinato di Giove e Sole, che hanno una massa enormemente maggiore rispetto a quella dei Troiani, consente una configurazione stabile, e l'orbita seguita da questi ultimi è allora perfettamente individuabile in quanto restano permanentemente confinati nelle zone vicine ai punti di librazione lagrangiani.

All'epoca di Lagrange gli asteroidi non erano stati ancora scoperti, e il suo risultato rimase, come egli stesso l'aveva definito, una "curiosità matematica", un brillante teorema di meccanica celeste. Grande fu la sorpresa quando il 22 febbraio 1906, all'Osservatorio di Heidelberg, fu scoperto 588 Achilles, il primo asteroide che oscillava in vicinanza del punto lagrangiano  $L_4$  del sistema Sole-Giove trovandosi quindi su un'orbita eliocentrica simile a quella del pianeta gigante ma percorsa anticipandolo di  $60^\circ$  rispetto all'astro. Achilles fu presto accompagnato da altri corpi dinamicamente simili, orbitanti in prossimità sia di  $L_4$  che di  $L_5$ . A questi asteroidi vennero dati nomi mitologici tratti dall'Iliade, quindi divennero noti collettivamente come "Troiani" (o meglio "Greci" e "Troiani", con i Greci vittoriosi che precedono Giove, mentre i Troiani lo seguono).

Si pensa che questi oggetti siano costituiti dal materiale primordiale, relativamente poco alterato, da cui si aggregarono i corpi che formano il nostro sistema planetario. Essi sono più lontani dal Sole rispetto agli asteroidi della fascia principale, ed hanno superfici mediamente più scure (appartengono al tipo tassonomico D): perciò rimasero una sparuta pattuglia rispetto alla moltitudine di asteroidi "normali", almeno finché, negli anni '70 e '80, apposite campagne osservative non mirarono specificatamente alla loro scoperta. Oggi sono catalogati 1564 Troiani, di cui 962 orbitanti in prossimità del punto lagrangiano  $L_4$  e 602 vicino al punto  $L_5$  (i motivi di questa disparità sono al momento sconosciuti). Ragionevoli estrapolazioni indicano comunque che vicino a  $L_4$  e  $L_5$  si muovono in realtà sciami di asteroidi sempre più numerosi al calare delle dimensioni, con una popolazione totale dello stesso ordine di quella della fascia principale.

Ma torniamo a considerazioni di meccanica celeste legate al problema dei tre corpi. Nel caso di orbite perfettamente circolari ed in assenza di perturbazioni esterne (se si è cioè rigorosamente nel caso di tre corpi isolati), l'asteroide può rimanere permanentemente in uno dei due punti di librazione, cosicché i tre oggetti orbitano mantenendo immutate le posizioni reciproche come se fossero tre punti di un corpo rigido. Se le orbite non sono perfettamente circolari o non complanari, e se intervengono anche perturbazioni provocate da altri pianeti (ad esempio Saturno), l'asteroide effettua attorno al proprio punto di librazione delle oscillazioni periodiche con periodo uguale a quello di rivoluzione, quindi di fatto i pianetini Troiani occupano due regioni lenticolari (a forma di "banana") simmetriche rispetto a Giove. D'altra parte, la stabilità delle orbite oscillanti attorno ai punti  $L_4$  e  $L_5$  del sistema Sole-Giove viene a cadere se si considerano ampiezze di oscillazione significative (come quelle di parecchi Troiani reali) e se si tiene conto di vari altri effetti. Studiosi come Harold Levison e i coniugi Eugene e Carolyn Shoemaker hanno analizzato l'evoluzione delle

orbite dei Troiani su tempi che arrivano all'età del Sistema Solare, trovando che i due sciami di pianetini starebbero lentamente "evaporando" e che fra qualche miliardo di anni si saranno drasticamente ridotti: quanto maggiore è infatti l'ampiezza con cui un Troiano oscilla rispetto all'orbita stabile con periodo esattamente pari a quello di Giove, tanto più presto (ma si tratta sempre di centinaia di milioni di anni) l'orbita viene destabilizzata dalle perturbazioni ed alla fine diventa indistinguibile da quella di una cometa a corto o medio periodo (cioè con periodo fino a 200 anni). Levison e coautori naturalmente hanno anche dedotto che gli sciami di Troiani inizialmente fossero più numerosi, comprendendo corpi che sono sfuggiti e, dopo qualche milione di anni di comportamento cometario, sono stati eliminati da una collisione con un pianeta o con il Sole, oppure espulsi dal Sistema Solare dopo un incontro ravvicinato con Giove. Eventi collisionali si hanno dunque anche fra gli asteroidi Troiani, e a questo proposito qualche ricercatore ha avanzato l'ipotesi che parte delle comete della famiglia di Giove non siano che ex-asteroidi perduti dai due sciami di Troiani.

Anche attorno a Marte sono stati trovati pianetini "troiani": si tratta dei sei asteroidi 5261 Eureka, 1998 VF31, 1999 UJ7, 2001 DH47, 2001 FG24 e 2001 FR127, quasi tutti situati in prossimità del punto lagrangiano  $L_5$  del sistema Sole-Marte. E un troiano è stato individuato addirittura intorno a Nettuno: è l'oggetto 2001 QR322, orbitante nel punto  $L_4$  del lontano pianeta. Analoghe ricerche sono state affrontate anche per gli altri pianeti del Sistema Solare, senza dare finora esiti positivi.

## ***RISONANZE SECOLARI***

Recentemente, lo studio delle risonanze ha fatto grandi progressi grazie all'impiego congiunto delle tradizionali tecniche analitiche della meccanica celeste e delle integrazioni numeriche al calcolatore: oggi l'evoluzione di un'orbita risonante può essere simulata numericamente su un periodo di milioni di anni, e interpretare i risultati di questi "esperimenti numerici" è divenuto ormai più difficile che non il realizzarli. Si sono così scoperti dei processi molto sottili, legati a tipi diversi di risonanze. Uno di questi è stato studiato da un gruppo di ricercatori dell'Osservatorio della Costa Azzurra (presso Nizza), e lo si può riassumere schematicamente come segue.

Per effetto delle perturbazioni planetarie, le orbite asteroidali cambiano continuamente di orientazione nello spazio tridimensionale: si ha contemporaneamente una precessione (ossia una lenta rotazione attorno al polo dell'eclittica) del piano orbitale e una precessione della direzione del perielio (cioè una rotazione dell'orbita sul suo proprio piano). Quando il periodo di uno di questi due moti di precessione – tipicamente, alcune decine di migliaia di anni – coincide con il periodo corrispondente per Giove o Saturno, si ha una cosiddetta "risonanza secolare". Infatti, a causa delle loro perturbazioni reciproche, anche le orbite planetarie hanno un moto di precessione tale per cui, ad esempio, la posizione del perielio dell'orbita di Giove fa un giro completo in 300.000 anni e quella del perielio di Saturno in circa 50.000. Le risonanze secolari intervengono allora quando c'è un rapporto razionale tra le frequenze di precessione delle orbite degli asteroidi e dei pianeti.

Le tre risonanze secolari più importanti e meglio studiate sono state denominate:  $\nu_5$  (*nu-5*),  $\nu_6$  (*nu-6*) e  $\nu_{16}$  (*nu-16*). La prima, la  $\nu_5$ , ha luogo quando la precessione della longitudine del perielio dell'asteroide ha lo stesso periodo di quella di Giove; analogamente si parla di risonanza secolare  $\nu_6$  quando il perielio si sposta come quello di Saturno. L'ultima, la  $\nu_{16}$ , avviene quando la precessione del nodo ascendente dell'asteroide, che implica una rotazione dell'orbita nello spazio, è commensurabile con quella di Saturno.

Gli effetti di queste risonanze si manifestano soltanto su tempi scala di milioni di anni, ma i progressi nella velocità di calcolo dei computer hanno recentemente permesso di realizzarne uno studio quantitativo sistematico. Ponendo in grafico l'inclinazione orbitale in funzione del semiasse maggiore, si vede che le risonanze secolari corrispondono a chiare lacune: gli asteroidi le evitano. Una di esse, proprio la  $\nu_6$ , è all'origine del bordo interno della fascia principale, a circa 2,1 UA di semiasse maggiore, mentre la  $\nu_{16}$  limita soprattutto le inclinazioni degli oggetti nel Sistema Solare

interno. In definitiva, le risonanze secolari rappresentano possibili vie di fuga per piccoli asteroidi o frammenti che vi dovessero orbitare in corrispondenza. Inoltre le risonanze tradizionali di moto medio (quelle delle lacune di Kirkwood) e quelle secolari sono state studiate a fondo per comprendere gli effetti dinamici connessi: esse possono sovrapporsi e influenzarsi a vicenda, creando complicati arcipelaghi di regioni stabili in mari caotici e viceversa.

Si osserva in generale che nelle risonanze secolari l'aumento di eccentricità è inesorabile ed estremamente regolare, mentre nelle risonanze di moto medio, in particolare la  $1/3$  e la  $2/5$  con Giove, l'evoluzione è fortemente irregolare e mostra salti caotici. In entrambi i casi, comunque, l'eccentricità può diventare molto grande e addirittura tendere a 1, portando l'asteroide a collidere con il Sole.

## ***CHIRONE E I CENTAURI***

Sempre in riguardo alla considerevole varietà di orbite, si deve rilevare che non tutti gli asteroidi restano confinati nella fascia principale, ma molti di essi, durante il loro percorso, se ne allontanano anche notevolmente. Vi sono infatti diversi esempi di asteroidi transgioviani (cioè la cui orbita, almeno in parte, si spinge al di là di Giove, verso il Sistema Solare esterno): fra i tanti è possibile citare 944 Hidalgo, che ha il perielio nella fascia principale ma giunge all'afelio a quasi 9,6 UA; 2060 Chirone, la cui orbita è situata in gran parte fra Saturno ed Urano; 5335 Damocles, che, con un'ellisse molto schiacciata, passa da un perielio situato in prossimità dell'orbita di Giove a un afelio che si spinge oltre l'orbita di Nettuno (per la loro forte eccentricità e inclinazione e per le loro dimensioni ridotte, 944 Hidalgo e 5335 Damocles sono probabilmente comete estinte). Sono stati scoperti addirittura diversi asteroidi transnettuniani, come 5145 Pholus e 7066 Nessus, pianetini assai distanti dalla superficie scura ed arrossata. Su Chirone in particolare è possibile spendere qualche parola.

Scoperto il 1° novembre 1977 dall'astronomo americano Charles T. Kowal all'Osservatorio di Monte Palomar, sulla base di lastre esposte il 18 e 19 ottobre dello stesso anno, fu classificato inizialmente come asteroide, per via delle sue dimensioni (allora non ancora definite con precisione, ma stimate dell'ordine di qualche centinaio di chilometri) decisamente superiori a quelle delle comete, e proprio perché al momento della scoperta esso non presentava alcuna attività che potesse far pensare ad una natura cometaria. D'altra parte si trovò che la sua orbita ellittica, situata, come si è detto, fra Saturno e Urano, era di tipo caotico, più simile a quelle delle comete a corto periodo che a quelle più regolari degli asteroidi: era dunque possibile che tale corpo celeste provenisse originariamente da regioni molto remote del Sistema Solare, e poi, su scale di tempo di centinaia di migliaia di anni, si fosse lentamente avvicinato al Sole fino al punto che conosciamo, dove tuttavia rimane soggetto all'azione perturbatrice dei grossi pianeti, in particolar modo Saturno.

Il colpo di scena avvenne nel 1988, quando, riosservando l'asteroide, ci si accorse che la sua luminosità era aumentata, e che attorno al "nucleo" solido si era sviluppata una debole chioma gassosa estesa per decine di migliaia di chilometri, tanto che Chirone fu indicato come il capostipite dei cosiddetti *Centauri*, una famiglia che al momento annovera 125 corpi ambigui dalle caratteristiche intermedie fra gli asteroidi e le comete, e il cui semiasse maggiore è compreso entro l'orbita di Nettuno. Le dimensioni della chioma di Chirone però non rimanevano costanti, e dopo l'iniziale aumento scemavano del tutto quando l'oggetto, il 14 febbraio 1996, giungeva al perielio (contrariamente a quanto ci si dovrebbe attendere nel caso di una cometa). Nel frattempo, il corpo celeste era stato al centro anche di altri studi che, attraverso la misurazione della sua emissione termica, permettevano di giungere alla determinazione del suo diametro, stimato in 168 km.

Probabilmente dunque Chirone è ricoperto da uno strato di ghiacci e polveri di spessore variabile, dove le rigidissime temperature (nell'ordine dei 200 gradi sotto lo zero centigrado) non permettono la vaporizzazione del materiale volatile ghiacciato in superficie, ma dove di tanto in tanto si verificano dei "getti" (simili ai *geyser* terrestri) che rompono in certi punti la crosta più esterna liberando i gas sottostanti. Fenomeni simili sono stati riscontrati su Tritone, il maggiore dei satelliti di Nettuno, e sulla cometa di Halley.

Solo composti estremamente volatili come l'azoto molecolare ( $N_2$ ), il monossido di carbonio (CO) e il metano ( $CH_4$ ) sarebbero potuti sublimare nel sottosuolo generando poi la chioma osservata. Ed essendo possibile valutare con una certa approssimazione in che misura tali composti sono presenti su Chirone, si trae nuovamente la conclusione che esso percorre l'attuale orbita solo da pochi milioni di anni: se fosse sempre stato dov'è ora, avrebbe già esaurito ogni forma di attività cometaria, e per il medesimo motivo non poteva nemmeno trovarsi più vicino al Sole, dove la sublimazione degli elementi volatili sarebbe stata ancora più rapida. Pertanto, Chirone e probabilmente anche gli altri Centauri non possono che essere provenuti dalla fascia transnettuniana

di Edgeworth-Kuiper e, stando a considerazioni dinamiche, sembra che l'attuale orbita di Chirone diverrà instabile entro un milione di anni, portando il cometoide ad avvicinarsi sempre più al Sole.

Le dimensioni relativamente piccole dei Centauri, dell'ordine del centinaio di chilometri, e la grande distanza dal Sole, rendono problematiche le osservazioni dedicate allo studio delle loro caratteristiche fisiche. Normalmente ci si limita all'analisi del loro spettro nel vicino infrarosso, che misura la luce solare riflessa dalla superficie e fornisce preziose informazioni sulla composizione chimica della stessa. Ma nel 1998 il telescopio spaziale Hubble (HST), grazie anche a una fortunata coincidenza, ha permesso di accertare che uno di questi gelidi e remoti pianetini ha una superficie dall'aspetto completamente diverso passando da un emisfero all'altro. Oggetto delle osservazioni dell'HST, nell'ambito di un programma di studio di 10 Centauri, è stato 8405 Asbolus, un corpo del diametro di un'ottantina di chilometri che orbita attorno al Sole tra Saturno e Urano.

Le prime osservazioni mostrarono uno spettro relativamente brillante che presentava complicate bande di assorbimento; lo spettro ottenuto dopo mezza rotazione dell'asteroide appariva invece completamente diverso, in quanto del tutto simile a quello raccolto tre mesi prima con il telescopio Keck. Il primo spettro appariva del tutto incomprensibile. Le superfici degli oggetti ghiacciati presenti nel Sistema Solare, come confermano anche gli esperimenti di laboratorio, vengono arrossate e annerite dalle reazioni chimiche indotte sui ghiacci dalla radiazione ultravioletta solare, dal vento solare e dai raggi cosmici. Il ghiaccio "fresco", non esposto alla loro azione per un tempo sufficientemente lungo, appare invece bianco e brillante: la luce riflessa dalle regioni in cui questo è presente finisce con il dominare lo spettro.

Dalla ricostruzione dell'aspetto di Asbolus si è dunque constatato che, mentre una faccia appare del tutto normale, cioè con caratteristiche simili a quelle riscontrate in altri oggetti di questa famiglia, l'altra mostra i segni di un probabile recente impatto (avvenuto forse non più di 10 milioni di anni fa) che ha messo alla luce i ghiacci freschi sottostanti la superficie. Naturalmente l'HST non è stato in grado di fotografare direttamente il cratere, ma i dati raccolti sulla sua composizione superficiale mostrano una chimica complessa. Restando nel campo delle ipotesi puramente speculative, una collisione con un altro piccolo corpo cosmico, oltre a scavare un vasto cratere, dovrebbe aver riscaldato i materiali superficiali inducendo processi chimici negli idrocarburi presenti. Il confronto tra lo spettro infrarosso della luce solare riflessa dall'emisfero più brillante con quelli ottenuti in laboratorio su un vasto campionario di ghiacci non ha fornito alcuna indicazione sulla possibile composizione di questa faccia di Asbolus. Infatti, anche se gli spettri raccolti hanno qualche somiglianza con quello del ghiaccio d'acqua, in certe zone ne differiscono notevolmente, e ciò potrebbe essere dovuto alla presenza di sostanze mai incontrate in precedenza nel Sistema Solare.

## ***EVOLUZIONE COLLISIONALE: PREMESSE***

Si è detto all'inizio della trattazione che i pianetini dal diametro apprezzabile sono relativamente pochi: nella fascia principale ogni cubo ideale con lato di cento milioni di chilometri contiene in genere un solo asteroide più grande di 100 km, ed anche le distanze medie fra oggetti più piccoli sono piuttosto cospicue e si misurano in milioni di chilometri. Si può dire quindi che la cintura degli asteroidi è abbastanza affollata se ci riferiamo a termini di paragone astronomici, dove le distanze si misurano spesso in anni luce, mentre ragionando in termini terrestri non si deve pensare a questa zona come a un'arteria di grande traffico nell'ora di punta. In altre parole, se un'ipotetica navicella spaziale fosse di passaggio nella fascia degli asteroidi, la collisione con uno di essi resterebbe un evento altamente improbabile: una prima prova indiscutibile a questo proposito si ottenne negli anni 1973-74, quando le due sonde spaziali *Pioneer 10* e *Pioneer 11* della NASA, dirette verso Giove, attraversarono la fascia principale uscendone indenni dopo 7 mesi, e registrando sulla propria superficie solo l'impatto di pochi micrometeoriti. Ma il discorso si fa diverso quando invece della nostra navicella, che trascorrerebbe in quella regione solo poco tempo, prendiamo in esame gli asteroidi stessi, che orbitano lì da alcuni miliardi di anni: in questo caso la probabilità di uno scontro fra due oggetti non è più trascurabile, e anzi si può vedere come questa "storia collisionale" sia l'elemento determinante per capire l'evoluzione nel tempo della fascia asteroidale. È proprio dagli urti catastrofici, infatti, che si sono generati i pianetini più piccoli di forma irregolare e una gran quantità di detriti minori i quali vanno ad accrescere il materiale eclittico che talvolta arriva anche sulla Terra sotto forma di meteoriti. Dall'analisi di queste ultime vengono poi estrapolate informazioni preziosissime sulla condizione del Sistema Solare primordiale, che altrimenti rimarrebbero inaccessibili per il fatto che allo stato attuale le missioni spaziali rivolte direttamente agli asteroidi costituiscono ancora una netta minoranza. Le collisioni catastrofiche tra asteroidi nel passato sono state favorite proprio dalla loro notevole varietà di orbite, percorse con velocità relative comprese tra circa 2 e 10 km/s, con un valor medio di 5 km/s che rappresenta anche la velocità tipica (e critica) con cui avvengono gli impatti nella fascia principale.

## ***LE FAMIGLIE DINAMICHE***

In precedenza si è parlato della distribuzione del semiasse maggiore dell'orbita, e dei valori tipici di eccentricità ed inclinazione; ha senso ora domandarsi se non ci siano anche delle relazioni di qualche tipo fra tali grandezze. Proprio a questo proposito è da rilevare un'interessante fenomenologia collegata alla dinamica degli urti, che porta alla formazione delle "famiglie dinamiche" di asteroidi, scoperte dall'astronomo giapponese Kiyotsugu Hirayama nel 1918 e il cui studio costituisce tuttora un problema in discussione.

Analizzando la distribuzione dei circa 950 pianetini allora conosciuti in uno spazio tridimensionale nel quale le coordinate erano il semiasse maggiore ( $a$ ), l'eccentricità ( $e$ ) e l'inclinazione ( $\sin i$ ), ossia i parametri orbitali più stabili, Hirayama scoprì interessanti addensamenti di oggetti: si trattava di gruppi di asteroidi le cui orbite, anche se orientate in modo differente, presentavano elementi – ossia coordinate di questo spazio – molto simili. Tenendo conto del fatto che, diversamente dal semiasse maggiore, l'eccentricità e l'inclinazione di un'orbita asteroidale non sono costanti (o quasi) nel tempo, ma subiscono forti variazioni su scale di tempo che vanno da 10.000 a 100.000 anni a causa dell'attrazione dei pianeti maggiori, primi fra tutti Giove e Saturno, egli comprese la necessità di "depurare" eccentricità e inclinazione da queste variazioni periodiche e riportarsi a "elementi propri" che fossero costanti nel tempo. Per ottenere cioè una distribuzione statistica significativa, era necessario sostituire i valori di eccentricità e inclinazione *osservati* con i relativi valori *medi*, o per meglio dire con valori meno dipendenti dall'istante specifico in cui si studia l'orbita; in termini pratici l'operazione veniva svolta impiegando complesse tecniche matematiche di meccanica celeste.

Alla fine, dopo aver applicato questa correzione a tutti gli asteroidi conosciuti, Hirayama notò molto più chiaramente che nello *spazio degli elementi propri* (comodissimi sono i diagrammi che riportano l'eccentricità o l'inclinazione in funzione del semiasse maggiore) esistevano effettivamente zone in cui la concentrazione di oggetti era molto elevata (veri e propri addensamenti) e zone quasi completamente spopolate (strette fasce parallele agli assi dell'eccentricità e dell'inclinazione o di entrambe). Le zone vuote raffiguravano evidentemente le risonanze di moto medio, mentre le concentrazioni furono chiamate "famiglie", sottintendendo che gli asteroidi membri di una stessa famiglia avevano avuto probabilmente un'origine comune, forse di tipo "esplosivo", che aveva spezzato in decine o centinaia di grossi frammenti un asteroide primordiale.

Il termine *famiglia* ha in sé una duplice possibile valenza: dal punto di vista dinamico indica un gruppo di asteroidi dotati di elementi propri molto simili; dal punto di vista fisico va correlato ad una vera e propria origine comune, indicando pertanto un insieme di frammenti provenienti dalla distruzione di un corpo progenitore. Non necessariamente, però, questi due significati devono coincidere. È questo il motivo per cui sono state proposte anche nomenclature alternative (quali *clan*, *cluster*...), riservando il termine *famiglia* solo per i pianetini per i quali coincidono le analisi fisiche e quelle dinamiche.

Per comprendere meglio quale potrebbe essere stata l'origine delle famiglie di asteroidi, bisogna appellarsi ai modelli collisionali. I dati di partenza che occorre conoscere per "simulare" uno scontro distruttivo tra asteroidi sono relativamente pochi e semplici: innanzitutto la massa dei due asteroidi in procinto di collidere, poi la loro velocità relativa, ed infine la direzione di impatto. Quest'ultimo parametro può essere tralasciato in quanto meno importante per una descrizione generale e sommaria; in realtà altri parametri potrebbero giocare ruoli determinanti (la densità degli oggetti, la loro forma, ecc.), ma per avere un quadro semplice ed esauriente è sufficiente prendere in considerazione i primi due, ossia le masse e la velocità: un dosato "cocktail" di queste grandezze può fornire la chiave fondamentale per capire cosa potrà avvenire durante e dopo l'impatto. Per convenienza si considera la situazione come se l'asteroide bersaglio (il più grosso) fosse fermo e l'asteroide proiettile (il più piccolo) viaggiasse alla velocità relativa tra i due. In tal caso l'energia di impatto è proprio l'energia cinetica del proiettile, ed è data dal prodotto tra la massa di quest'ultimo e il quadrato della sua velocità, il tutto moltiplicato per un fattore 0,5:

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

Quando si descrivono modelli statistici è necessario cercare di considerare, per quanto possibile, valori medi delle grandezze in gioco. Per questo scopo si considera solitamente che nella fascia principale la velocità "media" di incontro fra due asteroidi, come già accennato, si aggiri attorno ai 5-6 chilometri al secondo. Rimane allora variabile soltanto la massa del proiettile: quanto maggiore sarà quest'ultima, tanto maggiore sarà l'energia liberata. Per valutare però i "danni" effettivi causati al bersaglio è ancora necessario sapere quanto esso sia grande. È ovvio, infatti, che una stessa energia impartita dal proiettile avrà effetti più o meno catastrofici a seconda di quanto grande è l'asteroide colpito. Si usa allora dividere l'energia di impatto per la massa del bersaglio: questa grandezza viene chiamata *energia specifica*, ed è proporzionale al rapporto tra la massa del proiettile e quella del bersaglio, nonché al quadrato della velocità relativa tra i due:

$$E_s = \frac{1}{2} (m/M)v^2$$

essendo  $m$  la massa del proiettile,  $M$  quella del bersaglio e  $v$  la velocità relativa. L'energia specifica fornisce il vero parametro per valutare il tasso di distruzione che ci si può aspettare nel bersaglio, indipendentemente dalle dimensioni in gioco.

Iniziamo ora a vedere cosa succede quando l'energia specifica raggiunge valori molto elevati, distinguendo due casi principali.

## - FAMIGLIE ASIMMETRICHE -

Se in un impatto l'asteroide bersaglio è molto grande e comunque le dimensioni dei due oggetti sono di gran lunga differenti (rapporto di massa 1:10 o superiore), oppure il proiettile colpisce con velocità relativa piuttosto bassa (diciamo minore di 5 km/s), nel punto centrato avviene una violentissima esplosione, che tende a scavare nel bersaglio un enorme cratere e contemporaneamente diviene il centro di propagazione di un intenso impulso di onde d'urto sismiche. I maggiori di questi crateri possono costituire veri e propri "bacini da impatto" come i mari lunari, e l'urto può essere tale da formare linee di frattura interne, che unendosi provocano la disgregazione dell'oggetto-bersaglio da cui viene espulso nello spazio interplanetario un nugolo di frammenti. Se l'asteroide bersaglio ha un diametro superiore a 150-200 km, la sua massa è sufficiente a generare forze gravitazionali significative: le diverse parti del bersaglio saranno allora attratte le une verso le altre, secondo un processo che prende il nome di *autogravitazione*. L'effetto più evidente di questa autogravitazione è che l'allontanamento reciproco dei frammenti espulsi sarà frenato, e la maggior parte di questi tenderà a ricadere sul corpo principale, sul frammento più grande rimasto intatto, dove, cementati solo dalle deboli interazioni gravitazionali, andranno a ricostituire in qualche modo un corpo unico un po' più piccolo di quello originario. Il bersaglio così ricostruito però non sarà più un vero corpo "solido", bensì un cosiddetto "*rubble pile*", ossia un ammasso di macerie di varie dimensioni tenute insieme solo dall'autogravitazione del frammento principale. Nel contempo, saranno pochi i resti che dopo l'urto avranno acquisito la velocità di fuga necessaria per sfuggire al campo gravitazionale dell'asteroide maggiore. Questi ultimi saranno inoltre addensati nella direzione da cui era provenuto il proiettile, e, una volta resisi indipendenti, cominceranno a seguire orbite simili e vicine a quella del corpo genitore sul quale sarà concentrata la maggior parte della massa, dando così origine ad una "*famiglia asimmetrica*".

Attualmente si pensa che molti asteroidi siano formati non da pezzi unici di roccia, bensì piuttosto da aggregati liberi di materiali. Forme allungate e periodi di rotazione superiori alle 4 ore sono indizi basilari – sebbene non sufficienti – per poter sospettare che gli oggetti osservati siano dei *rubble piles*: questi ultimi, infatti, sono caratterizzati da una minore forza di gravità e non possono ruotare troppo velocemente, poiché in tal caso i detriti di cui sono composti si allontanerebbero e si disperderebbero nello spazio. Oppure, se la velocità di rotazione attorno al proprio asse fosse sufficientemente elevata, il pianettino, come nel caso di un fluido, potrebbe separarsi in due componenti coorbitanti, dando origine a un asteroide binario formato da due oggetti di dimensioni paragonabili.

## - FAMIGLIE DISPERSE -

Se invece il bersaglio è piccolo o il proiettile impatta con un'alta velocità relativa (maggiore di 5 km/s), od ancora le dimensioni dei due asteroidi che collidono sono paragonabili, l'energia cinetica del proiettile è sufficiente a frantumare completamente il bersaglio: molti frammenti raggiungeranno la velocità di fuga e verranno espulsi in tutte le direzioni, formando una "*famiglia dispersa*" nella quale il corpo centrale sarà piccolo e avrà raccolto solo pochi resti. Successivamente, col passare del tempo, acquisteranno importanza le perturbazioni planetarie, che agiscono però in modo tale da modificare l'orientazione delle orbite, lasciando pressoché inalterati i valori di semiasse maggiore, eccentricità e inclinazione. Così, in tempi di milioni di anni, le lievi differenze iniziali fra le orbite vengono accentuate, e i membri della famiglia si trovano ad orbitare su ellissi simili nella forma ma sparpagliate nello spazio, tutte racchiuse – o per meglio dire

*inviluppate* – in un toro (cioè una “ciambella”) delimitato da due circonferenze centrate sul Sole, di raggio uguale rispettivamente alla distanza perielica e afelica.

Va notato che gli asteroidi che appartengono a una stessa famiglia normalmente sono molto lontani fra loro nello spazio ordinario, tuttavia i loro elementi orbitali “ricordano” ancora un’epoca remota in cui tutti i corpi ebbero origine nella stessa regione di spazio, da cui si allontanarono con velocità relative variabili, ma comunque contenute nell’ordine di alcune centinaia di metri al secondo (molto minori quindi della loro comune velocità intorno al Sole, che mediamente è di circa 20 km/s). In sostanza, quanto più i componenti di una famiglia sono raggruppati, cioè realmente vicini nello spazio, tanto più essa è giovane, e recente l’impatto che l’ha generata. Quando le velocità di espulsione non sono troppo grandi (tipicamente sono dell’ordine di 0,01-0,1 km/s), la famiglia può rimanere riconoscibile anche dopo centinaia di milioni di anni: nei casi migliori, confrontando la velocità di diffusione di una famiglia dispersa con l’estensione della famiglia stessa, si può stimare con un’incertezza dell’1% l’età dell’evento collisionale.

Le tre famiglie disperse più importanti, che comprendono ciascuna circa 200 oggetti, hanno preso il nome del maggiore asteroide che ne fa parte: *Koronis* (con un semiasse maggiore di circa 2,86 UA), *Eos* (semiasse maggiore di circa 3,01 UA) e *Themis* (semiasse di circa 3,13 UA, vicino al bordo interno della risonanza 1/2 con Giove). A queste si deve aggiungere la famiglia di *Flora*, i cui numerosi componenti hanno però orbite soggette a perturbazioni a lungo periodo che rendono difficile valutarne il grado reale di somiglianza reciproca. Vi sono poi un’altra ventina di famiglie meno evidenti a prima vista, ma che si possono “estrarre” rispetto a una distribuzione di fondo di natura casuale grazie a raffinate tecniche di tipo statistico (i cosiddetti *metodi di clustering*). Queste famiglie sono associate ad alcuni fra i maggiori asteroidi, come Vesta ed Eunomia: nel caso di Vesta sono state osservate alcune decine di piccoli asteroidi con elementi orbitali molto simili, che fanno pensare a frammenti espulsi da un grande cratere da impatto generatosi per l’appunto su Vesta in seguito a una collisione catastrofica. L’analisi degli spettri infrarossi eseguita su questi oggetti mostra inoltre che la loro composizione di pirosseno è identica a quella riscontrata su Vesta e pure identica a quella di certe rare meteoriti basaltiche rinvenute sulla Terra, che si pensa provengano proprio da tale asteroide. A ulteriore sostegno di questa tesi vi sono le osservazioni di Vesta effettuate dal telescopio spaziale Hubble della NASA sul finire del 1994 e nel maggio del 1996, che confermano la presenza sull’asteroide di un gigantesco bacino da impatto e altri crateri da cui avrebbero avuto origine tutti i vari frammenti più o meno massicci. Questi ultimi poi si estendono fino alla risonanza 1/3 con Giove, sede ben conosciuta di perturbazioni caotiche, in cui l’eccentricità di un’orbita può essere modificata in modo significativo; non risulterebbe impossibile a questo punto che alcuni di essi siano stati spinti verso l’interno del Sistema Solare, dove avrebbero potuto collidere anche col nostro pianeta.

L’analisi delle proprietà fisiche (dimensioni, forma, rotazione, composizione) degli asteroidi appartenenti ad una stessa famiglia è potenzialmente molto importante, perché permette di comprendere in modo specifico il tipo di collisione che ha generato la famiglia stessa, e anche di tentare di ricostruire il corpo originale, analizzandone, per esempio, la struttura interna. Le tre famiglie maggiori, quelle di Koronis, Eos e Themis, derivano rispettivamente da corpi di circa 100, 200 e 300 km di diametro, con struttura omogenea (ossia priva di un nucleo, un mantello e una crosta) e chimicamente differenziati (come nel caso dei maggiori pianeti). Si è però scoperto che la composizione dei tre asteroidi originali non era la stessa: rocce ricche di silicati per Koronis ed Eos, di composti del carbonio per Themis. Altre famiglie sembrano invece generate da corpi con una struttura interna stratificata, che si riflette in una diversa composizione degli attuali membri del gruppo.

Oltre alle collisioni catastrofiche, che hanno comunque una frequenza relativamente bassa, bisogna ricordare che in generale gli asteroidi subiscono nel corso della loro esistenza un gran numero di impatti di piccole proporzioni. Infatti, dato che l’abbondanza dei potenziali proiettili cresce molto rapidamente al diminuire delle loro dimensioni, per ogni collisione catastrofica deve avvenire un gran numero di impatti meno distruttivi, ma pur sempre capaci di scavare, frammentare e

sminuzzare il terreno dell'asteroide bersaglio. In questo modo, dai crateri prodotti dal continuo bombardamento meteoritico vengono espulsi polvere e frammenti, che ricadono sulle zone circostanti: il risultato, dopo molto tempo, è uno spesso strato di roccia finemente frammentata e poco compatta, che prende il nome di *regolite* e ricopre tutta la superficie del pianetino. La stessa regolite è presente anche sulla Luna (è la polvere sulla quale hanno lasciato le proprie orme gli astronauti americani), ma mentre sulla Luna il suo spessore è variabile da zona a zona ed è comunque di alcuni metri al massimo, si pensa che sugli asteroidi possa essere ben maggiore, anche di qualche chilometro, a causa del processo collisionale molto più intenso che ha luogo in quella regione del Sistema Solare; perciò quella degli asteroidi è stata ribattezzata "mega-regolite".

## ***ROTAZIONI “UBRIACHE”***

Quando un asteroide di forma irregolare subisce una collisione a velocità di diversi km/s da parte di un altro asteroide più piccolo, si può presumere che la rotazione del bersaglio venga disturbata e che per un certo periodo di tempo essa resti, per così dire, “ubriaca”. In altre parole, ciò avviene quando un corpo di forma molto allungata ruota attorno a un asse che non coincide né con il suo asse di simmetria, né con un asse perpendicolare a questo; in tal caso la direzione dell’asse di rotazione non è costante ma varia continuamente. Lo stesso dovrebbe valere per i frammenti generati da collisioni distruttive, come si ritiene siano la gran parte degli asteroidi esistenti, e comunque questo moto anomalo e bizzarro non dura in eterno, anche in assenza di influenze esterne: i continui sforzi e le deformazioni a cui esso sottopone l’interno del corpo dissipano energia, finché, gradualmente, si ripristina uno stato di rotazione regolare che pone fine a tutti gli attriti interni. È presumibile che le collisioni adatte a provocare questa rotazione “ubriaca” in passato non siano certo mancate, ma allora ci si dovrebbe chiedere come mai gli astronomi (e astrofili) che osservano assiduamente le curve di luce dei pianetini hanno sempre visto curve periodiche, ripetitive, da cui si deduce in maniera univoca un periodo di rotazione determinato.

La risposta venne data nel 1973 dai due astrofisici Burns e Safronov, i quali affrontarono il problema dal punto di vista quantitativo, calcolando una formula secondo cui il tempo necessario a “regolarizzare” la rotazione era direttamente proporzionale al cubo del periodo di rotazione ed inversamente proporzionale al quadrato delle dimensioni dell’asteroide. Siccome all’epoca tutti gli asteroidi per cui esistevano curve di luce di buona qualità avevano dimensioni considerevoli (parecchie decine di km come minimo) e ruotavano piuttosto rapidamente (in meno di un giorno), risultava che il suddetto tempo andava da 100 mila a 100 milioni di anni, e quindi era relativamente breve se confrontato all’età del Sistema Solare o anche alla frequenza delle collisioni abbastanza violente. Di conseguenza, stando alla formula, la rotazione “ubriaca” si regolarizzava rapidamente, e per questo motivo non doveva sorprendere che le curve di luce osservate fossero periodiche.

In tempi più recenti, tuttavia, si sono andati accumulando indizi tesi a dimostrare che le cose possano andare diversamente nel caso di alcuni asteroidi dalle curve di luce peculiari: un esempio lampante è fornito dal pianetino 4179 Toutatis, un piccolo corpo dall’aspetto molto irregolare con un periodo di rotazione sicuramente lungo (parecchi giorni) ma non univocamente determinabile, la cui curva di luce appare chiaramente non periodica. Applicando la formula di Burns e Safronov a questo oggetto, si è trovato che nel suo caso il tempo di regolarizzazione è molto più lungo dell’età del Sistema Solare, quindi Toutatis non ruota in modo regolare semplicemente perché gli attriti interni non hanno avuto abbastanza tempo per smorzare tale rotazione “ubriaca”. Questo caso però rappresenta sicuramente un’eccezione alla norma: applicando la stessa formula a tutti gli asteroidi dalla curva di luce ben conosciuta, si è ugualmente scoperto che la quasi totalità dei pianetini esaminati hanno dimensioni e periodi di rotazione così proporzionati da far sì che la rotazione “ubriaca”, qualora avvenga, non possa durare più di 100 milioni di anni.

## ***ASTEROIDI DOPPI o BINARI***

I modelli collisionali hanno anche portato a ipotizzare asteroidi doppi o binari, la cui esistenza è stata poi confermata con tecniche diverse. Come caso particolare, infatti, in un urto può accadere che uno o più frammenti, oppure lo stesso pianetino proiettile, acquistino una velocità sufficiente a farli diventare satelliti dell'asteroide più massiccio. Ma può anche darsi che alcuni frammenti, dopo l'urto, vengano espulsi simultaneamente in una sola direzione, come un vero e proprio "getto", e si allontanino dal bersaglio con una velocità anche piuttosto elevata, mantenendo però le velocità *tra loro* assai prossime sia in grandezza che in direzione: in questo caso se la differenza di velocità risulta inferiore alla reciproca velocità di fuga i due frammenti resteranno "catturati" in orbita l'uno intorno all'altro, formando un sistema binario.

Le condizioni più favorevoli per la formazione di tali sistemi si hanno per asteroidi di medie dimensioni, fino a 100 km di diametro: se fossero troppo grandi tutti i frammenti ricadrebbero su di essi, mentre nel caso opposto la totalità dei resti si allontanerebbe indefinitamente. In alternativa, se la collisione avviene abbastanza fuori centro, cioè "di taglio", il proiettile cede al bersaglio una grossa quantità del momento angolare (la grandezza fisica che misura "quanta rotazione" possiede un corpo, e si conserva, ossia rimane costante nel tempo, in assenza di disturbi esterni): dopo la collisione ciò che resta del bersaglio può trovarsi a ruotare troppo velocemente per potersi riaggregare in un corpo singolo, scindendosi quindi in due o più componenti separate, le quali avranno presumibilmente dimensioni abbastanza simili e saranno molto vicine (si parla praticamente di un sistema quasi a contatto). Quest'ultimo modello sembra più appropriato per spiegare l'esistenza di oggetti doppi con diametro superiore ai 100 km, che difficilmente possono essere interpretati come frammenti di corpi maggiori.

In generale, durante la dispersione dei frammenti è del tutto possibile che alcuni tra i più grandi "catturino" frammenti più piccoli. Questo può causare sia la ricaduta dei più piccoli su quello più grande, sia una loro eventuale sistemazione in orbita attorno al "fratello" maggiore. In realtà, le simulazioni dei vari modelli costruiti per riprodurre questi meccanismi non possono ancora darci la quantificazione del problema: in altre parole essi ci dicono che il fenomeno ha buone probabilità di accadere, ma non quale frequenza possa realmente avere.

La presenza di un satellite comporta necessariamente un effetto di marea, che tende a rallentare sensibilmente la rotazione del corpo celeste "primario" (nel nostro caso l'asteroide osservabile direttamente). Ovviamente quest'effetto di marea è tanto più efficace quanto più i due corpi sono vicini e di massa comparabile, e alla fine, se il tempo necessario non è più lungo dell'età del Sistema Solare, la coppia può divenire completamente "sincronizzata": in altre parole, la rotazione di entrambi i corpi rallenta finché il periodo di rotazione raggiunge il periodo di rivoluzione, stabilizzandosi poi su questo valore. Questo potrebbe contribuire a spiegare il corto periodo di rotazione di alcuni oggetti di piccole dimensioni. Quanto alla stabilità delle orbite degli asteroidi binari rispetto alle perturbazioni esterne, la meccanica celeste permette di arrivare a una semplice conclusione: ogni corpo solido orbitante nella fascia degli asteroidi può mantenere intorno a sé per un tempo indefinito satelliti fino a una distanza orbitale massima pari a un centinaio di volte le proprie dimensioni: quindi un asteroide grande 100 km può avere satelliti fino a distanze di circa 10.000 km, ma anche un macigno di 1 metro potrebbe avere un satellite entro un raggio di 100 metri! A distanze superiori a quella limite, la forza mareale di origine solare farebbe sfuggire il satellite; gli effetti dovuti ai pianeti in questo caso sono molto minori, e diventano rilevanti solo nell'eventualità di incontri ravvicinati che possono destabilizzare il sistema.

L'esistenza di asteroidi dotati di satelliti è un argomento dibattuto sin dalla metà degli anni '70 e suggerito:

a) dall'analisi delle curve di luce, del tutto simili in certi casi a quelle di stelle binarie ad eclisse;

- b) dal fatto che alcuni asteroidi possiedono periodi di rotazione molto lunghi;
- c) dall'esistenza di crateri da impatto doppi sulle superfici planetarie;
- d) da eventi cosiddetti "supplementari" osservati durante le occultazioni di stelle brillanti da parte di alcuni asteroidi.

La conferma dell'esistenza di asteroidi doppi si è avuta solo in tempi relativamente recenti, poiché le osservazioni dirette al telescopio, sia visuali che fotografiche che CCD, non sono adatte allo scopo. Dapprima quindi furono usati metodi indiretti, tra i quali il primo è stato quello delle occultazioni stellari: quando un asteroide, nel suo moto apparente sulla volta celeste, si trova a passare davanti a una stella luminosa, ne scherma la luce, e un suo eventuale satellite può causare un'occultazione secondaria visibile a poca distanza da quella principale. Tali studi vengono condotti generalmente con dei fotometri fotoelettrici, e si trova così che gli asteroidi doppi presentano delle curve di luce abbastanza simili a quelle delle stelle binarie ad eclisse: in questo modo, in passato, è stata suggerita (ma non confermata) la duplicità di asteroidi come 216 Kleopatra, 532 Herculina e 624 Hektor.

Anche senza le occultazioni stellari, le curve di luce consentono talvolta di identificare un satellite dell'asteroide maggiore: ad esempio quando si verifica una piccola attenuazione periodica della luminosità sovrapposta alla normale oscillazione fotometrica dovuta alla rotazione, indizio questo della presenza di un corpo secondario che eclissa ad intervalli regolari quello principale. È il caso dei pianetini 45 Eugenia, 3671 Dionysus, 1991 VH e 1994 AW1, tutti e quattro indicati come asteroidi binari.

Un'altra tecnica è quella del radar: un'antenna emette verso l'oggetto osservato un potente fascio di onde radio ad alta frequenza, e l'analisi della radiazione riflessa (raccolta dalla stessa o anche da un'altra antenna) permette di ricavare la posizione e la velocità del "bersaglio", una stima delle sue dimensioni e del suo stato di rotazione e, nei casi più favorevoli, anche informazioni sulla sua struttura così dettagliate da permettere la ricostruzione al computer di vere e proprie immagini radar ad alta risoluzione. La limitazione principale di questa tecnica, come si può intuire, è che la sua efficacia diminuisce rapidamente con l'aumentare della distanza tra l'antenna e il corpo osservato, e anche le antenne più grandi e potenti del mondo come quella di Arecibo a Portorico (305 metri di diametro) e quella di Goldstone nel deserto californiano di Mojave (70 metri) possono ottenere un'eco radar abbastanza intensa da ricostruire dettagli superficiali solo se la distanza dalla Terra è al massimo di pochi milioni di chilometri. Per questi motivi la ricerca radar fatta sugli oggetti della fascia principale degli asteroidi permette solamente di ottenere informazioni "globali" sulle proprietà superficiali e il moto di rotazione di questi, mentre gli stessi studi indirizzati verso asteroidi più vicini come i NEA (vedere più avanti) hanno consentito di definire delle immagini di indubbio valore scientifico. Oggetto di questo tipo di studi sono stati, in passato, i pianetini 4769 Castalia, 4179 Toutatis, 216 Kleopatra, 1999 JM8, 1998 WT24 e 1999 KW4.

L'avvento di telescopi di nuova generazione, con aperture sempre maggiori e ottiche adattive che permettono di ridurre drasticamente il disturbo indotto dalla turbolenza dell'atmosfera, ha permesso negli ultimi anni di estendere la ricerca di asteroidi doppi anche all'osservazione ottica. Nel 2000, utilizzando il telescopio Keck di 10 m di diametro situato presso l'Osservatorio di Mauna Kea (Hawaii), è stato individuato il primo asteroide binario di dimensioni ragguardevoli: si tratta di 90 Antiope, che prima della scoperta era considerato un corpo unico del diametro di 125 km ma che in realtà è costituito da due componenti separate le cui dimensioni sono di circa 80 km e che, a una distanza di soli 170 km, orbitano attorno al centro di massa del sistema con un periodo di 16,5 ore. Sempre con il Keck è stata evidenziata la presenza di una luna attorno a 87 Sylvia, un asteroide di 280 km di diametro che ha un satellite grande 7 km a una distanza di circa 1200 km, e a 121 Hermione, un asteroide grande 209 km che pare avere un satellite di 13 km di diametro a una distanza di almeno 630 km. Con il telescopio franco-canadese-hawaiano (CFHT) di 3,6 m sempre situato sul Mauna Kea è stato invece possibile immortalare un satellite in orbita attorno all'asteroide 762 Pulcova: questo pianetino ha un diametro di circa 170 km, mentre le dimensioni

del compagno, distante 800 km, non superano i 15 km. Lo stesso telescopio ha permesso di scoprire anche altri asteroidi doppi: 22 Kalliope e 45 Eugenia, con compagni rispettivamente di 35 e 13 km; e un asteroide binario addirittura nella fascia di Edgeworth-Kuiper, situata oltre l'orbita di Nettuno: si tratta del TNO codificato 1998 WW31, costituito da due componenti di 120-150 km di diametro, caratterizzate dall'eccentricità più alta (0,8) mai registrata in tutto il Sistema Solare. Inoltre, nell'anno che è seguito all'annuncio della duplicità di 1998 WW31, altri 6 TNO si sono rivelati doppi. Con la tecnica dell'ottica adattiva, che ha permesso di effettuare queste scoperte, è possibile avere immagini di qualità analoga a quelle ottenute dal telescopio spaziale "Hubble", che pure ha fattivamente contribuito alla scoperta di nuovi asteroidi binari.

Resta tuttavia fuori discussione il fatto che in questo campo i risultati più sorprendenti sono stati finora quelli ottenuti dalla sonda spaziale Galileo che, diretta verso Giove, incontrava il 28 agosto 1993 l'asteroide 243 Ida: dalle immagini inviate a Terra risultava chiaramente una piccola luna che, distante circa 90 km dal centro del corpo principale, vi orbitava attorno con un periodo di circa 20 ore. Il satellite, subito ribattezzato *Dactyl*, aveva un diametro medio di 1,5 km e una forma molto vicina a quella sferica.

È dunque certo che gli asteroidi doppi esistono, e molto probabilmente sono anche numerosi. Ma la vera quantificazione del problema, come già detto, rimane purtroppo una questione aperta. Essi potrebbero rappresentare solo una piccola percentuale della popolazione totale, come invece essere un prodotto collisionale ricorrente. Può anche darsi che i sistemi doppi si ottengano con frequenza notevole, ma che la loro durata, a causa dell'instabilità orbitale del sistema, sia piuttosto breve. Altre evidenze osservative sono quindi necessarie sia per ragioni statistiche che per ragioni legate alla comprensione dei meccanismi di formazione e di mantenimento.

## GLI ASTEROIDI VICINI

Come già accennato, non tutti i pianetini popolano la fascia principale: una piccola parte di essi presenta semiassi al di fuori dell'intervallo indicato o elevate eccentricità orbitali, cosicché non possono essere contenuti entro questa regione. Infatti non solo essi possono incrociare l'orbita di Marte, ma, in numero sempre più decrescente, anche quella della Terra, di Venere e perfino di Mercurio. Uno dei casi più estremi è rappresentato dall'asteroide 3200 Phaethon, scoperto dal satellite per astronomia infrarossa IRAS nel 1983: al perielio esso si avvicina a meno di 21 milioni di km dal Sole, ben all'interno dell'orbita di Mercurio, mentre l'afelio si trova nella fascia principale.

In generale, con il termine *Near-Earth Objects* (NEO) si intendono tutti quei corpi minori, asteroidi e comete, che si trovano a passare nei pressi dell'orbita terrestre durante il loro moto di rivoluzione attorno al Sole; si è assunto che questa distanza minima non debba essere superiore a 0,3 UA (circa 45 milioni di km). Quando invece si parla solo di asteroidi allora si utilizza più correttamente il termine *Near-Earth Asteroids* (NEA). Gli *Earth-Crossing Asteroids* (ECA) o *Earth-Grazing Asteroids* (EGA), in particolare, sono quei NEA che possono intersecare la sezione di cattura della Terra a causa di perturbazioni a lungo termine dovute ai pianeti, e quindi hanno una possibilità "fisica" di collidere con il nostro pianeta. Dunque i NEA, e in modo particolare gli ECA, rappresentano un potenziale pericolo per la Terra.

I NEA si suddividono convenzionalmente in tre classi, in base alla combinazione di due parametri orbitali dinamici attuali, il semiasse maggiore e l'eccentricità, che determinano a loro volta la distanza perielica e afelica; i nomi dei tre gruppi derivano dal primo asteroide scoperto avente le caratteristiche comuni agli altri componenti della categoria. Gli asteroidi del tipo *Amor* hanno distanze perieliche variabili tra 1,017 e 1,3 UA; dato che la Terra orbita fra le 0,983 e le 1,017 UA dal Sole, essi possono attraversare l'orbita di Marte, e solo approssimarsi esternamente a quella terrestre. Gli oggetti *Apollo* hanno il semiasse maggiore dell'orbita superiore a 1 UA mentre il perielio si trova sempre a distanza minore di 1,017 UA, di conseguenza tagliano tutti l'orbita della Terra sebbene abbiano un periodo orbitale più lungo di un anno. Infine gli *Aten*, scoperti a partire dal gennaio 1976, sono i NEA più rari: passano la maggior parte del tempo nella zona di spazio interna all'orbita terrestre, incontrandola solo nei pressi del loro afelio, quando raggiungono la distanza di poco più di 1 UA dal Sole; dato che i loro semiassi maggiori sono in media più corti di quello della Terra, il loro periodo orbitale risulta minore di un anno.

Riassumendo in sintesi,

- gli *Amor* hanno  $1,017 < q \leq 1,3$  UA
- gli *Apollo* hanno  $a \geq 1,0$  UA e  $q < 1,017$  UA
- gli *Aten* hanno  $a < 1,0$  UA e  $Q \geq 0,983$  UA

essendo  $a$  il semiasse maggiore,  $q$  la distanza perielica e  $Q$  la distanza afelica. Da questo semplice schema risulta evidente che solo gli Apollo e gli Aten possono intersecare effettivamente l'orbita terrestre; i primi si trovano di solito esternamente ad essa, mentre i secondi sono spesso localizzati al suo interno.

Al 20 febbraio 2003 risultavano conosciuti 2223 NEA, così suddivisi: 1010 asteroidi Amor, 1041 Apollo e 172 Aten. La scoperta di questi ultimi è tuttavia condizionata da un effetto di selezione. In linea di principio, gli oggetti Aten sono osservabili all'opposizione, in direzione cioè opposta a quella del Sole, che rappresenta la configurazione geometrica ideale per l'osservazione di piccoli corpi. Il problema è però che gli Aten passano all'opposizione relativamente di rado, mentre per la maggior parte del tempo sono osservabili a distanze angolari dal Sole non più grandi di 40 o 50 gradi. Questo significa che normalmente gli Aten sono visibili bassi sull'orizzonte durante il

crepuscolo, in condizioni quindi che ne limitano fortemente la visibilità pratica: ecco perché finora sono stati scoperti solo circa 170 oggetti appartenenti a questa classe.

Recentemente sono state effettuate integrazioni numeriche di un grande numero di NEO, Aten e non solo, e si è scoperto che nel corso della loro evoluzione la maggior parte degli oggetti attraversa fasi durante le quali l'orbita diventa interamente interna rispetto a quella della Terra. Se ne deduce che deve esistere una nuova classe di oggetti NEO con orbite di questo tipo: tali oggetti sono stati provvisoriamente indicati con la sigla *IEO* (acronimo dell'espressione inglese che significa "oggetti interni all'orbita della Terra"). Nessun oggetto reale di questo tipo è ancora stato scoperto, ma questo non stupisce, dato che, essendo interni all'orbita della Terra, gli IEO non vanno mai all'opposizione e, come Mercurio e Venere, non si allontanano mai molto dal Sole essendo visibili per breve tempo durante il crepuscolo. D'altra parte, gli IEO sono oggetti interessanti di per sé e per il fatto che, secondo stime provvisorie, hanno probabilità relativamente alte di essere oggetti "pericolosi" per la Terra.

Gli astronomi sono soliti chiamare genericamente "asteroidi Aten-Apollo-Amor" tutti i corpi con un perielio più vicino al Sole del valore arbitrario di 1,3 UA, sebbene le differenze fra i tre gruppi siano già state esposte sopra. L'appartenenza di un dato oggetto a una delle tre categorie non è però fissata una volta per sempre: dagli studi effettuati risulta che esistono oscillazioni secolari delle eccentricità orbitali che, su periodi di tempo dell'ordine di 100.000 anni, porterebbero asteroidi del tipo Amor ad assumere orbite del tipo Apollo e viceversa. Quindi anche un certo numero di Amor sono ECA anche se attualmente non attraversano l'orbita terrestre. Pare invece che gli Aten siano stati immessi sulle loro orbite così prossime al Sole dall'attrazione di Venere e della Terra.

Dai numerosi dati osservativi emerge che le caratteristiche fisiche dei NEA, così come la loro composizione mineralogica, sono alquanto simili a quelle degli asteroidi della fascia principale, con una certa prevalenza di oggetti del tipo fisico S, ricchi quindi di metalli. Tale preponderanza è però dovuta al fatto che i pianetini del tipo S sono più facilmente identificabili, avendo un'elevata riflettività, mentre gli oggetti di tipo C, molto più scuri, possono sfuggire alle osservazioni, pertanto il loro numero è stato probabilmente sottostimato. In realtà, il potere riflettente dei NEO varia molto da un oggetto all'altro, e i valori di albedo possono differire di oltre un ordine di grandezza (un fattore 10), per cui, in pratica, non è mai possibile stabilire a priori se quello che si osserva è un oggetto piccolo e brillante oppure grande e scuro, dato che entrambi i casi possono corrispondere a una data luminosità apparente osservata. Il motivo per cui le albedo dei NEO variano così tanto è da ricercare nell'ampia varietà di possibili composizioni mineralogiche degli strati superficiali esposti al Sole. Quest'ampia variabilità è la stessa che si riscontra tra gli asteroidi della fascia principale, e riflette il fatto che nel loro complesso i NEO provengono dalla suddetta regione del Sistema Solare. Il problema delle dimensioni dei NEO (e dei pianetini in generale) non è di facile soluzione. Solo in un numero molto limitato di casi, corrispondenti agli asteroidi più grandi di alcune centinaia di chilometri presenti nella fascia principale, è stato possibile determinare le dimensioni da una misura del diametro angolare apparente. Nel caso dei NEO (e più generalmente della stragrande maggioranza degli asteroidi) queste misurazioni non possono essere effettuate, a causa delle dimensioni angolari troppo esigue degli oggetti. I metodi che si possono adottare per arrivare a determinare le dimensioni di questi corpi sono dunque necessariamente di natura indiretta (tipicamente viene utilizzata la tecnica radiometrica). Considerando solamente i corpi più grandi di 1 km, i NEA rappresentano circa lo 0,1% della popolazione asteroidale totale del Sistema Solare, ma a differenza dei corpi orbitanti nella fascia principale risulta che gli asteroidi vicini abbiano dimensioni generalmente più contenute: il maggiore dei NEA, con un diametro di circa 40 km, è 1036 Ganymed, seguito da 433 Eros, che misura  $34 \times 13 \times 13$  km, sebbene in questa categoria siano stati osservati oggetti di dimensioni anche inferiori al chilometro (anzi, finora la dimensione minima osservata è stata fra i 5 e i 10 metri). Pianetini di dimensioni analoghe appartenenti alla fascia principale, a causa della loro distanza, non sono osservabili con telescopi situati a terra, perciò i NEA offrono un'opportunità unica di studiare i corpi più piccoli del Sistema Solare. Inoltre alcuni scienziati non escludono che, in un futuro più o meno lontano, questi mini-asteroidi possano

essere sfruttati commercialmente come fonti di preziosi materiali utilizzabili in operazioni spaziali su larga scala: studi spettroscopici della superficie dei NEA hanno rivelato che alcuni sono ricchi, oltre che di ferro e nichel, anche di metalli del gruppo del platino (rutenio, rodio, palladio, osmio, iridio), estremamente rari e costosi qui sulla Terra. Un asteroide di 1 km di diametro ne conterrebbe fino a 400.000 tonnellate. E tra gli asteroidi Near-Earth, almeno il 10% sarebbero raggiungibili con costi decisamente contenuti, molto minori di quelli di un viaggio sulla Luna.

Un indubbio motivo di interesse riguarda l'origine di questi oggetti: a causa delle perturbazioni di cui si diceva sopra, che sono massime per oggetti con orbite fortemente ellittiche e a bassa inclinazione (e a volte improvvise per un eventuale incontro ravvicinato con un pianeta), le traiettorie degli asteroidi vicini cambiano continuamente in modo caotico, e ciò fa sì che essi, una volta giunti nel Sistema Solare interno, non vi possano sopravvivere più di 200 milioni di anni prima di urtare contro un pianeta. Visto che questo intervallo di tempo è meno del 5% dell'età del Sistema Solare, e visto che il tasso di impatti contro i pianeti è rimasto quasi costante negli ultimi 3 miliardi di anni, è stato dedotto che gli asteroidi vicini non possono aver avuto origine diretta durante la formazione del Sistema Solare. Presumibilmente dunque devono essere continuamente prodotti ed immessi sulle loro orbite relativamente effimere da qualche processo attivo ancora oggi. Ne è sorto un vivace dibattito tra chi riteneva che essi fossero frammenti originati nella fascia principale situata fra Marte e Giove da collisioni reciproche fra i numerosissimi asteroidi che la popolano, e chi li considerava invece come probabili nuclei "morti" di comete a corto periodo, ormai prive della loro riserva di materiali volatili e quindi spente. In effetti, una cometa "spenta" non sarebbe altro che un piccolo corpo scuro di materiale carbonaceo e silicati, praticamente indistinguibile da un asteroide, ed in passato sono stati osservati pianetini del tipo Apollo la cui orbita ricorda molto quella della cometa Encke, la cometa col più breve periodo conosciuto (3,3 anni) e l'afelio interno all'orbita di Giove. Di sicuro l'origine cometaria sarebbe preferibile per oggetti a bassa riflettività, con orbite allungate ed inclinate, ma non è detto che una possibilità escluda l'altra: molti astronomi pensano infatti che entrambe le ipotesi, origine collisionale o cometaria, possano rivelarsi vere per diversi sottogruppi della famiglia degli asteroidi vicini.

Fino a poco tempo fa si pensava che la soluzione risiedesse principalmente nelle collisioni che di tanto in tanto frantumano qualche grosso asteroide nella fascia principale: come abbiamo visto, le velocità relative dei frammenti non sono sufficienti a causare drastiche variazioni orbitali, ma anche variazioni modeste sono sufficienti a mandare i frammenti "in buca" se partono da un corpo genitore che si trovi già "sull'orlo del precipizio". Questa spiegazione è stata quella preferita dagli astronomi planetari per circa vent'anni, dagli anni '70 a buona parte degli anni '90, ma poi è entrata in crisi, ancora una volta per l'emergere di seri problemi a livello quantitativo: in primo luogo, le collisioni distruttive contro asteroidi "genitori" abbastanza grandi e su orbite adiacenti alle risonanze sono troppo rare, specialmente per creare i NEA di dimensioni considerevoli, superiori a 5 km di diametro; ma soprattutto si è scoperto che il viaggio caotico attraverso le risonanze è troppo rapido per spiegare il numero di NEA esistenti. Nel 1994 un gruppo di meccanici celesti italiani, francesi e tedeschi annunciò che la maggior parte dei NEA finiva la propria esistenza non collidendo con i pianeti o uscendo dal Sistema Solare dopo un incontro con Giove, ma cadendo nel Sole. Le integrazioni numeriche avevano infatti rivelato che le risonanze  $1/3$  e  $\nu_6$  ( $nu-6$ ) erano molto più efficienti di quanto non si sospettasse in precedenza nel far aumentare rapidamente l'eccentricità delle orbite: nel giro di qualche milione di anni, questo parametro cresceva assai spesso fin quasi a 1, con il risultato che al perielio l'orbita arrivava a sfiorare il globo solare. In altre parole, prima di avere una *chance* di collidere con un pianeta, quasi sempre i NEA finivano dritti nel Sole, un risultato confermato anche tre anni dopo, nel 1997, estendendo le integrazioni fino a durate di 100 milioni di anni e ampliando il campione studiato da qualche decina a parecchie centinaia di orbite risonanti. L'analisi statistica dei risultati mostrava che la caduta nel Sole si verificava per circa il 75% delle orbite risonanti, entro un tempo che per le risonanze  $\nu_6$  e  $1/3$  non superava in media i 2 milioni di anni.

La natura effimera dei NEA risonanti poneva dunque un problema: se i NEA vivono così poco, come mai ce ne sono tanti in giro? Studi statistici sui processi collisionale e dinamico avevano dimostrato che la produzione di frammenti risonanti può mantenere un serbatoio costante di oggetti caotici tra i pianeti interni solo per oggetti molto piccoli, probabilmente non superiori a qualche centinaio di metri. Ma per quelli più grandi sarebbe impossibile: il problema era particolarmente serio per quella decina di oggetti che incrociano la Terra e che superano i 5 km di diametro, in quanto la loro formazione come frammenti richiede la distruzione di grossi asteroidi “genitori”, evento che si verifica molto raramente nell’attuale fascia asteroidale. La soluzione è stata trovata solo nel 1998, quando si notò che tra la fascia principale e i NEA che incrociano l’orbita terrestre esiste una vasta popolazione intermedia (oltre 300 oggetti maggiori di 5 km): quella degli asteroidi che possono incrociare l’orbita di Marte ma non quella della Terra. Questi oggetti sembrano apparentemente *normali*, ossia stanno in regioni a prima vista stabili. Infatti fino a poco tempo fa si pensava che la loro vita fosse abbastanza tranquilla e che solo su tempi scala dell’ordine delle centinaia di milioni di anni qualcuno di loro avrebbe potuto evolvere, a causa dei passaggi ravvicinati con il pianeta rosso, verso orbite caotiche tra i pianeti più interni. Il ruolo di Marte, date le sue dimensioni ridotte, era sempre stato considerato secondario nel riuscire ad “estrarre” oggetti dalle risonanze principali ed inserirli in orbite interne. I risultati di una ricerca franco-italiana hanno invece mostrato come, nonostante la piccola massa di Marte, gli incontri con quest’ultimo spesso riescono a inserire qualcuno di questi asteroidi in una risonanza, la quale poi provvede ad aumentare l’eccentricità fino a valori (0,5-0,6) necessari per raggiungere la Terra. I tempi di “attesa” per essere inseriti nelle risonanze sono variabili, ma si attestano mediamente nell’ordine dei 20 milioni di anni, ed è stato dimostrato che questo processo produce proprio quella decina di grossi corpi osservati che incrociano la Terra. In poche parole, Marte tiene in stato di “preallarme” una popolazione molto numerosa di asteroidi, e di tanto in tanto, ma con flusso pressoché costante, li costringe ad entrare nelle zone caotiche e seguire il loro destino di potenziali impattatori. Con la popolazione fornita in questo modo da Marte i conti sembrano tornare perfettamente: si riesce a spiegare il flusso continuo di oggetti caotici e la presenza di asteroidi con diametri superiori ai 2-3 km e – potenzialmente – fino a 40-50 km.

Naturalmente, a questo punto sorgeva il problema di spiegare l’esistenza degli “incrociatori” di Marte: seppure meno effimera, anche questa popolazione, se non venisse rifornita di nuovi oggetti, si esaurirebbe in un tempo molto inferiore all’età del Sistema Solare. Anche qui un gruppo di ricercatori ha individuato una soluzione plausibile. Nella parte interna della fascia asteroidale non ci sono solo le due potenti risonanze  $1/3$  e  $v_6$  a influenzare le orbite: se si considerano tempi di evoluzione più lunghi, l’intero spazio intermedio fra 2,1 e 2,5 UA di semiasse maggiore risulta bucherellato come un gruviera da svariate decine di mini-risonanze con Marte e Giove, molto sottili e lente ad agire (richiedono decine di milioni di anni per influenzare percettibilmente le orbite). Questo reticolo di mini-risonanze causa un processo detto *diffusione caotica*, in cui gradualmente le orbite “evaporano” dalla regione a bassa eccentricità per passare in quella ad eccentricità più elevata, tipica degli incrociatori di Marte. Fino a tempi dell’ordine di 100 milioni di anni il rifornimento tramite questa diffusione caotica funziona bene, ma per tempi più lunghi le mini-risonanze tendono a svuotarsi, e c’è di nuovo una carenza di flusso verso la categoria degli incrociatori di Marte.

Oltre alle collisioni e alle risonanze, occorre dunque un terzo ingrediente, e qui entra in scena il cosiddetto *effetto Yarkovsky*. Senza entrare in particolari, questo effetto presuppone che l’orbita di un piccolo corpo roccioso si modifichi lentamente a causa del riscaldamento asimmetrico della superficie prodotto dalla radiazione solare. In pratica, l’emisfero illuminato di ogni asteroide emette un eccesso di energia infrarossa rispetto all’emisfero in ombra: questo è sufficiente per generare una lenta ma continua modificazione del percorso orbitale. Come tutte le forze dovute alla pressione di radiazione, quella di Yarkovsky produce effetti inversamente proporzionali alle dimensioni del corpo stesso, e dipende pure da una serie di parametri variabili quali la conduttività termica superficiale, il periodo di rotazione e l’orientazione dell’asse polare. Tenendo conto delle collisioni

in modo statistico, e mediando gli effetti orbitali su milioni di casi diversi, è stato dimostrato che l'effetto Yarkovsky è massimo per corpi con dimensioni dell'ordine della decina di metri; per asteroidi con diametro fino a 20 km esso altera lentamente, ma in misura non trascurabile, i semiassi maggiori delle orbite. Se si tiene conto della probabile correlazione tra periodo di rotazione e dimensioni (con i corpi più piccoli che ruotano più rapidamente, come suggeriscono le osservazioni) e del fatto che in media gli asteroidi più grossi sopravvivono più a lungo alle collisioni distruttive, risulta che anche oggetti di 10-20 km di diametro hanno i semiassi maggiori spostati, nell'arco della loro vita media, di circa 0,01-0,02 UA. Certo questo non è abbastanza per farli arrivare fino alla Terra e neppure fino a Marte, ma lo è per produrre un continuo flusso di asteroidi nel denso reticolo di mini-risonanze di cui si diceva prima: si stima che, grazie all'effetto Yarkovsky, il rifornimento delle mini-risonanze (e quindi, in seguito, verso Marte e poi la Terra) aumenti di un fattore 10 rispetto a quello che risulterebbe dalle sole collisioni. In sostanza, l'effetto Yarkovsky rimescola un po' le orbite asteroidali, e aumenta il numero di quelle che prima o poi finiscono per cadere nelle risonanze.

Come si vede, il viaggio dei NEA si sta rivelando così complesso e ricco di componenti e meccanismi dinamici separati (collisioni, effetto Yarkovsky, mini e super risonanze, incontri con i pianeti, caduta sul Sole) che ricostruirlo in modo affidabile, a livello sia di popolazioni che di singoli oggetti, resta ancora un obiettivo per il futuro.

## ***IL RISCHIO DI UN IMPATTO COSMICO***

Una cosa certa è che tutti questi corpi vaganti rappresentano una possibile sorgente di meteoriti e di "proiettili" capaci di generare i grandi crateri e le strutture da impatto che si osservano sulla Luna e sui quattro pianeti interni di tipo terrestre. Conoscere il numero di questi "proiettili" nei diversi intervalli di dimensioni e la distribuzione dei loro parametri orbitali può servire a determinare con maggior precisione la frequenza degli impatti e, indirettamente, anche contribuire alla costruzione di un'affidabile "cronologia" delle superfici planetarie craterizzate (in quanto le superfici con maggiore densità di crateri sono più "vecchie" di quelle su cui i crateri sono stati cancellati o sepolti da processi endogeni). Tra i pianeti che possono subire l'urto con questi asteroidi trova posto ovviamente anche la Terra, ed ecco perché ha senso parlare di "rischio di collisione" e "pericolo per la civiltà umana": la scoperta dell'anomala abbondanza di iridio – elemento rarissimo sulla Terra – negli strati geologici databili al confine tra il Cretaceo e il Terziario (il cosiddetto *limite K/T*), ha suggerito che l'impatto prodotto da un vicino asteroide di 10 km di diametro, avvenuto circa 65 milioni di anni fa, potrebbe aver avuto un ruolo decisivo nelle improvvise estinzioni di massa di specie vegetali e animali sul pianeta, compresi i dinosauri. I resti di tale evento sarebbero rappresentati dall'enorme cratere *Chicxulub* di circa 200 km di diametro, situato nella zona nordoccidentale della penisola dello Yucatan (Messico). Sulla base di altri indizi della stessa natura, alcuni ricercatori hanno poi ipotizzato che, analogamente, la diffusione di certe specie tra cui proprio i dinosauri sia stata agevolata dall'impatto con un altro asteroide di grandi dimensioni, caduto circa 200 milioni di anni fa. Probabilmente gli effetti di questo scontro spaziale hanno ridotto o addirittura portato all'estinzione molte specie, potenziali competitori, aprendo la strada ai dinosauri, che si sono adattati ai vari ambienti, diversificandosi e diffondendosi.

Ma di impatti catastrofici, anche in epoche abbastanza recenti, la Terra ne ha subiti parecchi, e i progressi tecnologici dei voli spaziali e del rilevamento di immagini infrarosse da satellite ne mettono sempre più in evidenza le tracce. Sono infatti noti al giorno d'oggi oltre 200 crateri da impatto, prodotti per lo più durante gli ultimi milioni di anni dato che i fenomeni erosivi e geologici che sono attivi sul nostro pianeta tendono a cancellare le tracce dei crateri in tempi relativamente brevi. Le dimensioni di questi crateri spaziano da qualche metro fino ad alcune centinaia di chilometri, e testimoniano l'esistenza di impattatori di varia grandezza. È ben noto che in alcuni casi si trattò di oggetti di diversi chilometri di diametro, e si hanno buone ragioni per associare

l'impatto di alcuni di questi corpi con fenomeni massicci di estinzione di numerose specie biologiche presenti sulla Terra in precedenza. È questa un'ulteriore conferma che il nostro pianeta, come tutti i corpi del Sistema Solare, malgrado la funzione protettiva operata da Giove per i pianeti interni con il suo potente campo gravitazionale, ha subito urti che, se si ripetessero, costituirebbero un serio rischio per la vita che esso ospita, rischio che potrebbe arrivare anche all'estinzione di molte specie animali tra cui l'uomo.

L'atteggiamento dei governi dei maggiori paesi sviluppati nei confronti degli asteroidi la cui orbita sfiora quella della Terra è mutato dopo il 1994, grazie all'impressione suscitata dalla spettacolare caduta dei frammenti della cometa Shoemaker-Levy 9 su Giove. Prima, gli appelli di pochi astronomi preveggenti perché venissero intensificate le osservazioni sistematiche di questi oggetti cadevano nel vuoto. Al contrario, dopo il 1994 le ricerche sono state incoraggiate e persino sollecitate, sia negli USA che in Europa, con la promessa di concedere finanziamenti agli Osservatori che intendessero dedicare strumenti e tempi osservativi alla scoperta e catalogazione dei pianetini potenzialmente pericolosi. Lo scopo è di schedarli uno per uno, di definirne con precisione l'orbita e di calcolare per ciascuno la probabilità di un possibile impatto con il nostro pianeta. Ma anzitutto occorre stabilire quanti ce ne siano e come si distribuisca il loro numero in funzione del diametro. Compito non semplice: non si può tenere sotto controllo ogni notte l'intera volta celeste, mantenendola sgombra da nubi e "spegnendo" la Luna piena. E quand'anche fosse, non è automaticamente garantita la rivelazione di ogni oggetto di passaggio. Tuttavia, se si ha un'idea dell'efficienza del proprio sistema di rivelazione, dal numero delle scoperte effettuate si può estrapolare verosimilmente l'entità della famiglia al completo.

Il calcolo delle probabilità di un futuro impatto con un asteroide si dimostra un problema estremamente complicato, perché entrano in gioco molte variabili il cui peso statistico può non essere noto a priori. Il calcolo stesso deve poi tenere conto di alcune linee guida, oltretutto, naturalmente, del continuo confronto con i risultati delle osservazioni.

Tanto per cominciare, non bisogna mai pensare che quando un asteroide in risonanza raggiunge un'eccentricità tale da intersecare l'orbita della Terra, la collisione col nostro pianeta sia inevitabile. Bisogna infatti ricordare che per avere una collisione non basta che i piani orbitali si intersechino: devono farlo proprio le orbite (e queste, tra l'altro, cambiano continuamente per via della precessione). La minima distanza possibile tra l'orbita della Terra e quella di un altro corpo celeste (asteroide o cometa) il cui piano intersechi quello terrestre è un parametro conosciuto con la sigla *MOID* (*Minimum Orbit Intersection Distance*). La *MOID* rappresenta la differenza tra la distanza Terra-Sole e la distanza asteroide-Sole lungo la linea dei nodi, ossia lungo l'intersezione dei piani orbitali istantanei. Quando questa differenza cambia di segno passando attraverso il valore  $MOID = 0$ , le due orbite istantanee hanno un punto in comune, chiamato "incrocio al nodo". È importante notare che questa distanza tra le orbite non è la distanza reale tra asteroide e Terra: alla longitudine in cui avviene la *MOID*, i due corpi celesti sono generalmente a distanze molto maggiori del valore della *MOID* stessa. Inoltre un basso valore assoluto di *MOID* non necessariamente implica un passaggio ravvicinato (per esempio in caso di risonanza), quantunque sia un ottimo indicatore della possibile pericolosità di un dato oggetto. E anche quando le orbite hanno un incrocio al nodo, la collisione avviene solo nel caso fortuito che pianeta e asteroide passino per quel punto nello stesso istante.

Se un pianetino ha una *MOID* inferiore a 0,05 UA e la sua magnitudine assoluta  $H$  (quella che avrebbe se fosse posto a una distanza di 1 UA sia dal Sole che dalla Terra) è minore di 22, allora si considera che sia un *PHA* (*Potentially Hazardous Asteroid*, asteroide potenzialmente pericoloso): in parole povere, ciò avviene se un oggetto grande almeno 200 metri può avvicinarsi alla Terra a meno di 7,48 milioni di km. Va poi considerato che l'attrazione gravitazionale terrestre è forte solo fino a una distanza di 0,0115 UA, il che vuol dire circa 1,72 milioni di km (4,5 volte la distanza Terra-Luna); è quindi facile capire come l'asteroide e la Terra possano "ignorarsi" completamente per un lungo periodo di tempo, durante il quale la dinamica è determinata solo dalla risonanza in gioco. Al 20/02/2003 erano catalogati 2223 NEA, di cui 460 classificati come PHA. In verità, molti PHA non

creano attualmente un pericolo alla Terra, ma devono essere tenuti sotto controllo, perché le loro orbite potrebbero essere alterate dal passaggio radente con altri oggetti simili o con i pianeti stessi. Solo una frazione molto piccola può considerarsi veramente rischiosa.

Secondo una ricerca realizzata da un gruppo di astronomi della *Princeton University*, la percentuale di rischio di impatto di un asteroide con la Terra entro il prossimo secolo è di 1 su 5000. I dati su cui si basa questo calcolo sono stati ottenuti dalla *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS), uno dei più ambiziosi progetti astronomici su scala internazionale. Utilizzando un telescopio riflettore di 2,5 m dell'Osservatorio di Apache Point (Sunspot, New Mexico), la SDSS ha lo scopo di realizzare la mappa in diversi colori di un quarto dell'intero cielo, determinare le posizioni e le magnitudini di oltre 100 milioni di oggetti extragalattici e misurare la distanza di più di un milione di galassie e quasar. I dati raccolti sugli asteroidi rappresentano solo un sottoprodotto di questa *survey* grandiosa. I ricercatori di Princeton avevano dedotto che il Sistema Solare contenesse almeno 740.000 asteroidi abbastanza grandi (diametro maggiore di un chilometro) da creare grossi problemi alla civiltà sulla Terra. Questa ricerca è stata basata su una superiore capacità di osservazione dei singoli oggetti: la "campionatura" fatta su una singola porzione di cielo aveva permesso di rintracciare 10.000 asteroidi di dimensioni superiori al chilometro e da questi, per estrapolazione, si è giunti ai 740.000 pianetini di cui si diceva prima. In seguito, i risultati pubblicati da un altro gruppo di ricercatori, che aveva utilizzato i dati del satellite europeo per astronomia infrarossa ISO ottenuti tra il 1996 e il 1997, hanno aumentato questo numero in maniera sensibile, portandolo da 740.000 a circa il doppio (tra 1,1 e 1,9 milioni). Questi asteroidi popolano per lo più la fascia principale compresa tra Marte e Giove, ma quest'ultima, come è ormai noto, rifornisce continuamente la zona più interna del Sistema Solare di oggetti potenzialmente pericolosi, i *Near-Earth Asteroids* (NEA). I ricercatori ritengono che ce ne siano tra 900 e 1200 con dimensioni superiori al chilometro: una buona percentuale di questi (circa 500) sarebbe dunque già stata scoperta. Curiosamente, la nuova stima di oltre un milione di asteroidi nella fascia principale non cambia, almeno per ora, il rischio di collisione con la Terra già ottenuto dalla SDSS, che, come si è detto, per il prossimo secolo prevede 1 probabilità su 5000.

Va notato che questa stima del rischio di impatto, come molte altre fatte in precedenza, si basa sul fatto che 65 milioni di anni fa un asteroide di 10 km di diametro colpì la Terra, provocando tra l'altro l'estinzione dei dinosauri. I ricercatori assumono che simili impatti avvengano grosso modo ogni 100 milioni di anni, mentre per oggetti con dimensioni superiori al chilometro la statistica generalmente accettata parla di un impatto in un periodo di tempo compreso tra 100 mila e 300 mila anni. Prendendo queste due frequenze medie come riferimento, si calcolano le probabilità di impatto di asteroidi di taglia più piccola. Nella fattispecie, supponendo che le dimensioni minime per mettere a rischio la civiltà umana e altre specie siano di un chilometro, si tratta di sapere quanto gli asteroidi di 1 km di diametro siano più numerosi di quelli di 10 km di diametro, cosa che è stata possibile proprio con le osservazioni della SDSS prima e del satellite ISO poi.

Per prevedere tutti i fenomeni che riguardano la variazione degli elementi orbitali dei corpi celesti, e quindi la frequenza degli impatti con il nostro pianeta, occorre integrare numericamente – cioè simulare con un procedimento elaborato e ripetitivo – le orbite, avvalendosi di moderni mezzi quali i supercalcolatori. Estendendo i calcoli statistici a lunghi intervalli di tempo, per esempio un milione di anni, naturalmente il rischio diventa molto più concreto, e si ottiene infatti che in un tale periodo il nostro pianeta dovrebbe essere colpito almeno 3 o 4 volte da un proiettile di ragguardevoli proporzioni. Se invece si riducono le dimensioni a soli 50 metri, si dovrebbe avere un impatto ogni 1000 anni circa. Da notare, inoltre, che nella migliore delle ipotesi l'area distrutta dall'impatto risulta in media da 10 a 15 volte più ampia del sasso cosmico che la produce.

E non si creda che la minaccia sia solo teorica: la mattina del 30 giugno 1908, nel bacino del fiume Tunguska, nella Siberia centrale, un piccolo asteroide roccioso di neanche 60 metri di diametro – probabilmente un corpo carbonaceo del tipo Apollo – devastò, esplodendo in aria a 8 km d'altezza, un'intera foresta di oltre 2100 km<sup>2</sup> solo per pura fortuna disabitata. Il 10 agosto 1972 un frammento grande una decina di metri mancò per un soffio la Terra: il meteoroido, che percorreva un'orbita

solare come quella degli asteroidi del tipo Amor e aveva una massa stimata nell'ordine del migliaio di tonnellate, entrò nell'atmosfera a un piccolo angolo con una velocità di 15 km/s; percorrendo una traiettoria diretta da sud a nord divenne visibile in pieno giorno a un'altezza di 76 km al di sopra dello Utah e raggiunse il punto più vicino al suolo a 58 km di quota sopra il Montana. Poi cominciò a salire e divenne invisibile a un'altezza di 102 km sopra la provincia di Alberta, nel Canada occidentale, dopo un periodo di visibilità durato in tutto 1 minuto e 41 secondi. La sua magnitudine fu stimata da testimoni oculari ad almeno -15, ma c'è chi riferisce che il corpo fosse diventato per qualche istante luminoso come un altro sole, producendo un tuono distintamente udibile a terra. Dopo essere emerso dall'atmosfera terrestre, il meteoroido si perse nello spazio rientrando in un'orbita solare, anche se indubbiamente modificato in qualche misura da questo incontro; sull'accaduto rimangono comunque diverse foto e filmati ripresi da videoamatori, nonché le testimonianze di migliaia di persone sbigottite.

A parte questo episodio, il record di avvicinamento al nostro pianeta da parte di un asteroide – di cui si abbia notizia certa – appartiene all'oggetto 1994 XM1, che il 9 dicembre 1994 passò a soli 104.700 km dalla Terra (una vera inezia in termini astronomici: la distanza media Terra-Luna è di 384.400 km). Va tuttavia precisato che questo era un frammento di dimensioni molto modeste, con un diametro stimato di circa 9-10 metri, che comunque non avrebbe costituito una seria minaccia per il nostro pianeta. Non così l'asteroide 2002 MN, grande tra i 50 e i 120 m e in grado di distruggere un'intera metropoli con la forza di una bomba nucleare: il 14 giugno 2002 è passato a “soli” 120.000 km dalla Terra, attraversando l'orbita della Luna a una velocità di 41.400 chilometri orari. Nonostante che i più sofisticati radar fossero in attività, solo tre giorni dopo, quando ormai il pericolo era passato, i vari centri di osservazione del cielo si sono resi conto di quanto era avvenuto.

## **- LA SCALA TORINO -**

Dal 1999 è stata adottata una scala di valutazione dei rischi da impatto, ideata da Richard P. Binzel del *Massachusetts Institute of Technology* di Boston (USA) e denominata “*Scala Torino*” in riconoscimento del lavoro che da vari anni si tiene in questo senso presso l'Osservatorio di Torino. Analogamente al caso dei terremoti, dove esistono la scala Mercalli o la scala Richter delle magnitudini che servono rispettivamente per definire i danni prodotti o l'energia sviluppata, la Scala Torino consente di classificare e quindi di illustrare con maggior chiarezza e univocità il potenziale di rischio dei futuri incontri con un NEO, misurandolo con un numero intero compreso tra 0 e 10. I valori sono a loro volta raggruppati sotto cinque “colori”, dal bianco al rosso, passando per il verde, il giallo e l'arancio.

La Scala Torino è basata su due elementi fondamentali: le dimensioni del corpo che “potrebbe” cadere sulla Terra e che dà modo di definire le conseguenze dell'urto, e la probabilità che un tale impatto ha di accadere nel prossimo secolo. In tal modo, a parità di probabilità si stabilisce una condizione di maggiore o minore pericolosità a seconda che gli effetti siano più o meno devastanti. E viceversa, a parità di effetti, il rischio deve essere considerato tanto maggiore quanto maggiore è la probabilità che l'evento accada. Il diagramma base per ottenere alla fine la suddivisione in gradi di rischio è stato quindi quello di rappresentare gli effetti dell'evento in funzione della probabilità di accadere.

Come effetti di un evento si possono utilizzare vari parametri, quali l'energia dell'impatto, il numero di morti attese, o, in modo equivalente, le dimensioni dell'impattore. Sono grandezze equivalenti in quanto conoscendo le dimensioni è facile calcolare l'energia e di conseguenza anche l'entità della distruzione. Se consideriamo per semplicità il diametro dell'oggetto, vedremo che, a mano a mano che questo cresce, diminuirà la probabilità che l'evento possa realmente accadere. Ciò è dovuto essenzialmente al fatto che il numero di oggetti “pericolosi” cresce fortemente al diminuire delle dimensioni. Le conseguenze dell'urto permettono di dividere gli eventi in tre

categorie: locali, regionali e globali. La prima categoria fa riferimento a oggetti inferiori ai 100 metri di diametro, la seconda a oggetti non superiori al chilometro e la terza ai corpi maggiori. Quando un evento ha una probabilità superiore al 99% di accadere, si considera la collisione come certa. Quando è superiore all'1%, l'evento merita un'attenzione del tutto particolare e si devono iniziare studi accurati per eventuali azioni di difesa.

Il valore 0, nella zona bianca, viene assegnato a quegli oggetti che non hanno alcuna possibilità di cadere sulla Terra e/o a quelli che sono di dimensioni talmente ridotte da disintegrarsi completamente attraversando l'atmosfera. La classe 1, che contraddistingue la zona verde, si riferisce ad oggetti con probabilità di tipo "basso": essi vanno studiati con particolare attenzione e tenuti sotto osservazione continua per migliorarne la conoscenza dei parametri orbitali. Dalla classe 2 alla 4 (zona gialla) le probabilità aumentano, ma normalmente gli effetti che possono causare sono solo di tipo locale. Gli indici da 5 a 7, situati nella zona arancio, fanno riferimento a corpi con alta probabilità di impatto e con effetti devastanti su scala regionale e globale. Infine al vertice della scala di rischio, nella zona rossa, i valori 8, 9 e 10 sono riservati agli oggetti la cui collisione con la Terra è assolutamente certa: in questo caso, i valori stessi sono tanto più alti quanto più gravi sono gli esiti prevedibili dell'impatto. Il massimo della scala (valore 10) viene assegnato a quei corpi in grado di causare una catastrofe a livello planetario. Ecco qui di seguito uno schema della scala:

<b>La scala Torino dei rischi da impatto</b>	
<b>Eventi senza alcuna probabile conseguenza (zona bianca)</b>	<b>0</b> - La probabilità di una collisione è zero. Questa indicazione si applica anche a eventi riguardanti oggetti di piccole dimensioni che, nell'eventualità di una collisione, è improbabile possano raggiungere intatti la superficie terrestre.
<b>Eventi che meritano un accurato controllo (zona verde)</b>	<b>1</b> - La probabilità che si verifichi una collisione è estremamente bassa, circa la stessa di un oggetto occasionale non conosciuto.
<b>Eventi che meritano particolare attenzione (zona gialla)</b>	<b>2</b> - Incontro a distanza ravvicinata in cui una collisione è estremamente improbabile. <b>3</b> - Incontro ravvicinato con almeno 1 probabilità su 100 di collisione in grado di provocare disastri a livello locale. <b>4</b> - Incontro ravvicinato con almeno 1 probabilità su 100 di collisione in grado di provocare devastazioni a livello regionale.
<b>Eventi che costituiscono una minaccia (zona arancio)</b>	<b>5</b> - Incontro ravvicinato con una significativa minaccia di collisione in grado di provocare devastazioni a livello regionale. <b>6</b> - Incontro ravvicinato con una significativa minaccia di collisione in grado di provocare una catastrofe globale. <b>7</b> - Incontro ravvicinato con una minaccia estremamente significativa di collisione in grado di provocare una catastrofe globale.
<b>Collisione certa (zona rossa)</b>	<b>8</b> - Collisione in grado di provocare disastri a livello locale. Eventi simili si verificano in qualche luogo della Terra con frequenze variabili tra una volta ogni 50 anni e una volta ogni 1000 anni. <b>9</b> - Collisione in grado di provocare devastazioni a livello regionale. Eventi simili si verificano tra una volta ogni 1000 anni e una volta ogni 100.000 anni.

	<b>10</b> - Collisione in grado di provocare una catastrofe climatica globale. Eventi simili si verificano non più di una volta ogni 100.000 anni.
--	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Note:

- Il grado 0 non comporta alcuna conseguenza
- Il grado 1 necessita un controllo continuo dell'oggetto
- I gradi 2-4 necessitano attenzioni particolari e possibili studi di intervento
- I gradi 5-7 sono da considerare allarmanti e necessitano di preparazione di interventi
- I gradi 8-10 rappresentano collisioni sicure e necessitano interventi.

Nessun oggetto, asteroide o cometa tra quelli sino ad oggi identificati, si è mai spinto al di là della zona verde, cui corrisponde il valore 1 nella scala. Generalmente, poi, nuove osservazioni migliorano la conoscenza dell'orbita e fanno declassare gli oggetti inserendoli nel grado zero. Ma qualcuno potrebbe rimanere a più alto rischio, o addirittura incrementarlo.

La scala Torino è stata adottata ufficialmente dall'*International Astronomical Union* (IAU) per comunicare con la stampa e dunque con il grande pubblico. Essa dovrebbe contribuire ad evitare malintesi, falsi allarmi e la diffusione incontrollata di clamorose notizie prive di fondamento scientifico di cui i *mass media* hanno da sempre una fame insaziabile.

## **- LA SCALA PALERMO -**

La Scala Palermo (*Palermo Technical Impact Hazard Scale*) è uno strumento degli addetti ai lavori nel campo dei NEO. Presentata da Steven R. Chesley (*JPL*) e collaboratori alla conferenza internazionale "*Asteroids 2001*" tenutasi a Palermo nel giugno del 2001, la sua introduzione si è resa necessaria per poter assegnare un grado di priorità agli eventi che nella Scala Torino erano classificati allo stesso livello. In particolare ci sono diversi aspetti che erano considerati problematici per la comunità scientifica, e che possono essere riassunti in tre punti principali:

- Nella Scala Torino l'intervallo di tempo che ci separa dall'impatto non è preso in considerazione. In altre parole, scenari simili sono valutati con lo stesso numero sia che possano avvenire 90 giorni o 90 anni da adesso. Ed è ovvio che, per difendere la Terra in qualche modo, il periodo di tempo a disposizione prima dell'impatto è molto importante.
- Usando un parametro intero, la Scala Torino rende impossibile distinguere quando eventi che hanno lo stesso valore nella scala sono in realtà molto diversi tra loro.
- La Scala Torino assegna il valore zero anche a tutti gli impatti con energia inferiore a 1 Mton, indipendentemente dalla loro probabilità di accadere. Per questo motivo, la scala è inutile a descrivere eventi di grande interesse scientifico ma che solitamente sono osservati da pochi "spettatori", come i bolidi (le meteore molto luminose).

In concreto, la Scala Palermo esprime il rapporto tra la probabilità che avvenga un evento specifico e la probabilità media che un oggetto di uguali o maggiori dimensioni possa colpire la Terra negli anni che ci separano dall'evento considerato. A questo rischio medio ci si riferisce con il nome di *background risk* (rischio di fondo, o rumore di fondo statistico).

I valori della scala minori di -2 sono assegnati a eventi che non hanno alcuna probabilità di accadere, mentre quelli compresi tra -2 e 0 indicano situazioni che meritano un attento monitoraggio. I potenziali impatti, contrassegnati da valori positivi della scala, indicheranno in generale quegli eventi che necessitano la massima attenzione e lo studio di eventuali contromisure. Per convenienza si è preferito costruire una scala logaritmica, cosicché, per esempio, a un indice -2

corrisponde un evento solamente l'1% più probabile di un impatto casuale della stessa gravità nel corso degli anni che ci separano da quell'evento. Viceversa un indice +2 significa che quell'evento è 100 volte più probabile del *background risk*.

Mentre la Scala Torino è stata creata quale strumento di comunicazione al pubblico dell'entità del rischio associato a un futuro incontro ravvicinato con una cometa o un asteroide, la Scala Palermo è uno strumento a disposizione degli esperti per quantificare più dettagliatamente il livello di preoccupazione connesso con la possibilità di un potenziale impatto futuro. E di fatto è subito diventata l'indicatore quantitativo più diffuso nel settore: grazie ad essa si possono valutare in modo più accurato i rischi associati agli eventi che appartengono allo stesso livello nella Scala Torino. È attraverso la classificazione nella Scala Palermo che si decide con quale priorità procedere nell'osservazione e nell'analisi degli oggetti da monitorare, ed è fondamentale che nella formulazione della Scala Palermo compaia il riferimento alla frequenza di background perché ci permette di valutare quando la pericolosità di un evento emerge al di sopra del rischio al quale la Terra è costantemente esposta. Qualora dovesse verificarsi tale circostanza (valore nella Scala Palermo maggiore di zero), significherebbe che siamo di fronte ad un evento fuori del comune che merita assolutamente la nostra attenzione.

I valori della Scala Palermo non sono discreti come quelli della Scala Torino, ma continui (ammettono decimali); sono consentiti sia valori positivi che negativi, ed inoltre dipendono strettamente dal numero di anni che ci separa dal potenziale impatto nonché dall'energia ad esso associabile. È dunque evidente che non è possibile una trasformazione diretta da una scala all'altra, sebbene, in generale, se un evento ha una probabilità di accadere superiore al rischio di fondo, acquisirà un valore maggiore di 0 in entrambe le scale.

Vista la potenziale minaccia rappresentata dalla caduta dei NEO sulla Terra, negli ultimi anni si è cercato di dar vita a un programma internazionale di difesa, per capire bene prima di tutto quale sia la reale consistenza del pericolo, effettuando una ricerca sistematica che permetta di catalogare le traiettorie e le caratteristiche fisiche degli oggetti che incrociano l'orbita terrestre. Successivamente si dovranno mettere a punto le tecniche e gli strumenti necessari ad eliminare la minaccia: ad esempio, in caso di collisione certa, potrebbero essere approntate delle sonde "killer" da lanciare contro gli eventuali asteroidi o comete in rotta verso la Terra. Ma bisogna sottolineare che colpire l'oggetto lontano dal suo baricentro potrebbe avere l'unico risultato di cambiarne la rotazione; quindi senza la conoscenza esatta della posizione del baricentro non si potrebbe prevedere il risultato dell'operazione. Inoltre, se l'asteroide fosse un "*pile of rubble*" composto di materiali solo grossolanamente aggregati, un'esplosione potrebbe mandarlo in frantumi e questi potrebbero raggiungere ugualmente la Terra con conseguenze, in certi casi, anche peggiori di quella della caduta dell'asteroide intatto. Se poi il materiale che compone il pianetino fosse molto plastico (ad esempio come quello riscontrato su 253 Mathilde), l'esplosione di nuovo avrebbe ben poco successo: buona parte dell'energia liberata dalla detonazione verrebbe infatti assorbita dal materiale senza produrre gli effetti desiderati. C'è un'altra possibile soluzione, sempre estrema, che forse in caso disperato potrebbe risolvere il problema: un'esplosione all'esterno dell'asteroide per frenarne o deviarne la corsa. Sono già in atto lavori teorici per determinare gli effetti di esplosioni nucleari nei pressi e dentro l'oggetto in rotta verso la Terra, ma l'impiego nello spazio di tecnologie proprie della guerra nucleare trova molte resistenze, ed inoltre, come si è detto, anche questi sistemi, applicati ad oggetti molto porosi o plastici, avrebbero scarse probabilità di riuscita. In alternativa sono state studiate altre possibili contromisure, come l'utilizzo di giganteschi razzi o enormi vele solari in grado di imprimere al pianetino una quantità di moto sufficiente ad allontanarlo dalla rotta di collisione. In ogni caso, per organizzare qualsiasi tipo di difesa, sarebbe necessario conoscere con larghissimo anticipo (come minimo alcuni anni) la possibilità dell'impatto.

Individuato l'asteroide, occorre dunque studiarne il moto, la traiettoria, la forma, le dimensioni, la massa. Per questo scopo bisogna conoscere anche la natura dei materiali di cui sono costituiti i pianetini, e ciò implica studiare questi oggetti da vicino, con sonde spaziali che possibilmente siano in grado di estrarre campioni e riportarli sulla Terra. Ma soprattutto bisognerebbe accelerare i

tempi, visto che i dati da accumulare per raggiungere le conoscenze indispensabili per una difesa di qualche efficacia sono una quantità incredibile.

## ESPLORAZIONE SPAZIALE

L'esplorazione di asteroidi per mezzo di sonde automatiche ebbe inizio solo nel 1991, quando la sonda spaziale *Galileo*, concepita per studiare il sistema di Giove, incontrò nel suo viaggio verso il pianeta gigante l'asteroide 951 Gaspra, inviando a Terra le prime immagini ravvicinate di un pianetino. Nel 1993 poi la stessa sonda ebbe un altro *fly-by* con l'asteroide 243 Ida, e anche questo incontro fu coronato da uno splendido successo. I due oggetti immortalati dalle telecamere della *Galileo*, entrambi appartenenti al tipo tassonomico S dei pianetini silicacei, orbitavano, a diverse distanze dal Sole, nella fascia principale degli asteroidi situata tra Marte e Giove.

Ma anche in zone del Sistema Solare più prossime alla Terra si possono trovare asteroidi, i NEA, e in passato sono state studiate diverse missioni spaziali per avvicinarli con delle sonde. La prima di esse fu la sonda americana *Clementine*, che, dopo aver effettuato una mappatura ad alta risoluzione della superficie lunare, avrebbe dovuto avvicinarsi a 1620 Geographos, un pianetino del tipo fisico S appartenente alla classe Apollo, il 31 agosto 1994; purtroppo però un guasto irreversibile al computer di bordo le impedì di raggiungere l'obiettivo finale, facendo perdere ogni contatto. Poco tempo dopo la NASA metteva concretamente in moto il progetto NEAR (*Near-Earth Asteroid Rendez-vous*), consistente in una piccola sonda il cui scopo sarebbe stato quello di esplorare un paio di asteroidi "vicini". Come risultato la sonda, partita il 17 febbraio 1996 da Cape Canaveral, avvicinò il 27 giugno 1997 a una distanza di 1212 km il pianetino 253 Mathilde, un corpo di circa 60 km di diametro del tipo tassonomico C, che orbita nella fascia principale. L'obiettivo primario della missione era in ogni caso 433 Eros, pianetino della classe Amor e del tipo S che è il secondo per dimensioni tra i NEA, e che è stato raggiunto il 14 febbraio 2000. La sonda è entrata in orbita attorno ad esso, per studiarlo da vicino nel corso dell'anno seguente realizzando uno studio chimico-fisico che non ha precedenti per nessun asteroide. Alla fine, il 12 febbraio 2001, la NEAR ha gradualmente diminuito la propria velocità orbitale fino ad atterrare dolcemente sulla superficie di Eros, senza distruggersi nell'impatto ma continuando anzi ad inviare segnali e dati a Terra per altri 16 giorni, decretando così il successo totale della missione.

Ma anche altri progetti sono stati avviati. La sonda americana *Deep Space-1* (DS-1), prima nata del programma *New Millennium* della NASA e il cui lancio è avvenuto il 24 ottobre 1998, ha compiuto tra le altre cose un volo radente sull'asteroide 9969 Braille, un NEA di circa 2 km di lunghezza la cui orbita giace tra l'interno e l'esterno dell'orbita marziana. La sonda ha incontrato il pianetino il 29 luglio 1999, ma, a causa di un malfunzionamento verificatosi nelle ultime fasi dell'avvicinamento, la sua telecamera ha potuto riprendere solo due immagini a bassa risoluzione, quando il *fly-by* era già avvenuto e l'asteroide era ormai lontano. Anche la sonda *Stardust*, del programma *Discovery* della NASA e con obiettivo principale la cometa Wild 2, il 2 novembre 2002 è passata a circa 3300 km dal pianetino 5535 Annefrank, riprendendo immagini a bassa risoluzione che hanno mostrato un corpo irregolare, ricoperto da piccoli crateri, di circa 8 km di diametro.

Certamente più ambizioso è l'obiettivo della sonda giapponese *Muses-C*: secondo i piani, la *Muses-C* dovrebbe partire nel maggio 2003 alla volta dell'asteroide (25413) 1998 SF36, un corpo del diametro di circa 400 m con uno spettro simile a quello delle meteoriti ordinarie, giungendovi nel settembre 2005. Inizialmente la sonda entrerà in orbita attorno al pianetino a una distanza di 20 km, poi si avvicinerà gradualmente alla superficie per operare una serie di atterraggi morbidi e raccogliere campioni di suolo in tre differenti punti; questi saranno immagazzinati in una capsula di rientro. Nel progetto originario, la sonda avrebbe anche dovuto rilasciare un piccolo *rover* di fabbricazione americana, ma la NASA ha cancellato il progetto per problemi di budget, pur mantenendo la cooperazione. Dopo circa 5 mesi in orbita attorno all'asteroide, la *Muses-C* accenderà i suoi motori per iniziare il viaggio di ritorno verso la Terra. La capsula di rientro si staccherà dalla sonda a una distanza di circa 300-400.000 km dal nostro pianeta e precipiterà in atmosfera nel giugno 2007, cadendo dolcemente al suolo grazie a un paracadute. I campioni prelevati saranno allora recuperati per essere analizzati e studiati.

Anche la NASA, il 21 dicembre 2001, ha finalmente approvato, nell'ambito del programma *Discovery*, una propria missione spaziale esclusivamente diretta allo studio degli asteroidi: si tratta della sonda *Dawn*, nata per studiare due tra i più grandi pianetini della fascia principale, Cerere e Vesta. L'obiettivo della missione è quello di raggiungere una comprensione delle condizioni e dei processi in atto alla nascita del Sistema Solare. Dawn investigherà la struttura interna, la densità e l'omogeneità di questi due protopianeti, rimasti sostanzialmente intatti dalla loro formazione, misurandone la massa, la forma, il volume e la velocità di rotazione per mezzo di telecamere, laser altimetri e gravitometri. La sonda analizzerà anche l'eventuale magnetismo residuo, oltre alla composizione chimica e mineralogica, al fine di determinare la loro evoluzione termica e cercare di completare il quadro conoscitivo che collega questi corpi alle meteoriti: in particolare sarà possibile stabilire con maggiore certezza se Vesta sia veramente il corpo progenitore delle acondriti del gruppo HED (*howarditi, eucriti e diogeniti*) e se Cerere sia a sua volta il progenitore di qualche classe di meteoriti. Dawn riprenderà le superfici di Cerere e Vesta scendendo fino a 100 km di quota per svelarne ogni segreto, per testimoniare la loro storia collisionale e tettonica, mentre i dati relativi alla gravità, alla rotazione e al magnetismo serviranno a definire l'estensione di eventuali nuclei metallici interni. Infine, la spettroscopia infrarossa e gamma consentirà di tracciare una mappa geochimica dei due asteroidi ad alta risoluzione, individuando le zone in cui sono presenti minerali idrati.

Il lancio della Dawn è previsto per il 27 maggio 2006, con un razzo Delta II dalla base di Cape Canaveral. La sonda si dirigerà prima verso Vesta, a cui arriverà il 30 luglio 2010. Entrata in orbita attorno al pianetino, vi rimarrà per almeno 11 mesi, fino a quando, il 3 luglio 2011, riaccenderà i motori per partire alla volta di Cerere, il secondo obiettivo. Qui arriverà il 20 agosto 2014 e, come nel caso di Vesta, è prevista una permanenza di circa 11 mesi in orbita attorno al maggiore degli asteroidi della fascia principale, fino al 26 luglio 2015, data in cui è prevista la fine della missione. La sonda Dawn, per viaggiare, disporrà di un propulsore ionico come quello sperimentato con successo sulla sonda Deep Space-1, una tecnologia avanzata che permetterà molti viaggi futuri nel Sistema Solare.

## ***OSSERVAZIONI AMATORIALI***

L'osservazione degli asteroidi è uno di quei campi nei quali l'astrofilo può dare un valido contributo alla ricerca astronomica, perciò vogliamo da ultimo riferire sulle tecniche di osservazione: queste, condotte naturalmente con carattere scientifico, sono piuttosto complesse, e la loro preparazione richiede un impegno non indifferente. Uno studio rigoroso sui pianetini può essere condotto facilmente a patto che vengano rispettati gli standard internazionali di trasmissione dei dati osservativi, oltre naturalmente all'adesione a una campagna di ricerca degli asteroidi. Quest'ultimo aspetto appare fondamentale in qualsiasi tipo di attività astronomica intrapresa; le osservazioni, per avere valore scientifico, non devono risultare fini a se stesse, ma devono confluire ad appositi centri di raccolta dati, nazionali o internazionali (solitamente i centri nazionali si inquadrano come cellule locali di quelli internazionali), consentendo così la pubblicazione dei risultati e la relativa divulgazione a beneficio di tutti gli astronomi. In Italia le osservazioni amatoriali in questo campo fanno capo alla Sezione Asteroidi dell'Unione Astrofili Italiani (UAI), che tiene attivi diversi programmi di ricerca.

Gli asteroidi che orbitano nella fascia principale, per analogia coi pianeti esterni, divengono meglio osservabili quando sono in opposizione, cioè dalla parte opposta al Sole, elongati di  $180^\circ$  da quest'ultimo: allora la loro distanza dalla Terra è generalmente minima e si possono vedere per tutta la notte, sebbene a differenza dei pianeti maggiori possano discostarsi dall'eclittica anche di parecchi gradi. Contrariamente a quanto molti osservatori possono credere, un asteroide non raggiunge la sua massima possibile luminosità quando si trova in opposizione nel perielio della sua orbita: circa il 60% degli asteroidi sono più brillanti quando l'opposizione avviene in corrispondenza del nodo dell'orbita più vicino al Sole. E per il rimanente 40%, il picco assoluto di luminosità si verifica quando l'opposizione capita in un punto dell'orbita compreso tra detto nodo e il perielio. In altre parole, è più importante che l'asteroide sia vicino all'eclittica piuttosto che al perielio. La ragione è il cosiddetto *effetto d'opposizione*: una rapida salita non lineare della luminosità per angoli di fase minori di  $7^\circ$  e una caduta più lineare per angoli di fase maggiori. In parole povere, tutti gli oggetti solidi e privi di atmosfera riflettono più luce verso di noi quando sono direttamente opposti al Sole, condizione che si verifica quando essi giacciono nel piano dell'eclittica.

Naturalmente bisogna tenere sempre ben presente che *tutti* gli asteroidi, anche quelli più grossi o quelli che più si avvicinano al nostro pianeta, si mostrano al telescopio come semplici puntini luminosi sui quali è impossibile tentare di discernere qualsiasi vago segno; al massimo, sui più brillanti e con strumenti luminosi si può notare che il colore tende al giallo, poiché si tratta di luce solare riflessa. A volte capita che i dilettanti confondano gli asteroidi con le *novae*, ma una stella nova non mostra alcuna variazione nella posizione, mentre un pianetino sì: il movimento degli asteroidi, pur non essendo in genere molto rapido, è apprezzabile; mediamente somma a  $0^\circ,2$  al giorno (ovvero  $30''$  all'ora, da est verso ovest) quando si trovano in opposizione. Il moto apparente è quasi sempre sensibile guardando a distanza di un paio d'ore in un telescopio che fornisca almeno 100 ingrandimenti, soprattutto se vi sono delle stelle vicine a cui fare riferimento. L'avverbio "quasi" è d'obbligo; infatti è anche possibile imbattersi in asteroidi che sembrano immobili perché situati in prossimità del punto stazionario della loro orbita apparente proiettata nel cielo, con la conseguenza che 2-3 ore non bastano per evidenziarne il movimento.

A differenza dei numerosi pianetini che popolano la fascia principale compresa tra Marte e Giove, gli asteroidi del tipo Aten-Apollo-Amor hanno orbite più irregolari, pertanto la loro osservazione deve essere programmata in modo differente: essi possono apparire in regioni del cielo assai lontane dall'eclittica e mostrare, quando sono più vicini, un movimento angolare anche superiore al grado per giorno. I più veloci, definiti *VFMO* (*Very Fast Moving Objects*), presentano un moto apparente compreso tra  $10^\circ$  e  $60^\circ$  per giorno all'epoca della scoperta.

Generalmente, per sperare di ottenere risultati di rilevante importanza scientifica, bisogna disporre di telescopi di grande apertura e di strumentazioni accessorie complesse, che di solito sono al di fuori della portata degli astrofili. Tuttavia l'avvento della tecnologia digitale, con camere CCD sempre migliori e gestite da un software via via più raffinato, ha ridotto la quantità di strumentazione necessaria ed esteso negli ultimi anni questo campo anche ai dilettanti. Da un punto di vista didattico è estremamente utile cominciare ad osservare i pianetini visualmente cercando di determinare la loro posizione tra le stelle, e gli strumenti per osservarli sono molteplici: ci si renderà subito conto che è sufficiente un semplice binocolo 7×50 o 10×50 per discriminare gli asteroidi più luminosi, che appaiono di magnitudine 7 o 8. Vesta, che è il più brillante di tutti grazie alla sua albedo media più elevata della norma, può addirittura essere scorto ad occhio nudo in un cielo sereno e buio: nelle opposizioni più favorevoli raggiunge la magnitudine 5,2, e comunque appare spesso come un minuscolo puntino di sesta grandezza. Volendo osservare anche asteroidi meno luminosi, sarà opportuno procurarsi strumenti più potenti, come i binocoli 11×80 e 20×80 adatti pure alle osservazioni cometary, e disponendo di un telescopio riflettore di piccole dimensioni (per esempio il classico newtoniano 114/900 mm) sarà già possibile individuarne di ancora più deboli, aiutandosi con le *effemeridi* che vengono periodicamente pubblicate su alcune riviste di astronomia o sugli almanacchi astronomici.

Le effemeridi sono tabelle che recano alcuni dati relativi ai corpi celesti calcolati in anticipo per vari istanti successivi, come le coordinate equatoriali (ascensione retta e declinazione), la distanza geocentrica (distanza Terra-asteroide), quella eliocentrica (distanza Sole-asteroide), l'angolo di fase (angolo Sole-asteroide-Terra), l'elongazione dal Sole (distanza angolare tra l'asteroide e il Sole) e la magnitudine visuale apparente. Nel caso di oggetti piuttosto luminosi queste effemeridi vengono spesso corredate da cartine stellari con sopra riportate le tracce che rappresentano il moto dell'asteroide per un certo intervallo di tempo (usualmente quello in cui è meglio visibile). Con l'aiuto della cartina di riferimento si localizza il pianetino nel campo dello strumento. Si consiglia l'utilizzo di 150-200 ingrandimenti per discriminare chiaramente il moto dell'asteroide nel corso della serata osservativa, di 50-75 ingrandimenti per confermare lo spostamento giornaliero. Qualora le cartine non siano pubblicate, è necessario procurarsi un buon atlante stellare che riporti tutte le stelle fino alla magnitudine 9,5 con le coordinate riferite all'equinozio medio del 2000 (J2000.0). Un valido esempio di quest'atlante è rappresentato dal volume *Uranometria 2000*, il cui reticolo permette di determinare la posizione di un corpo celeste con sufficiente precisione; se però il pianetino in questione è meno luminoso si rende necessaria la costruzione di una mappa tramite uno dei tanti programmi per computer che contengono i cataloghi stellari fino alla magnitudine 15,5. L'Istituto di Astronomia Teorica di San Pietroburgo (Russia) pubblica annualmente il volume *Ephemerides of Minor Planets*, un catalogo aggiornato degli asteroidi – disponibile anche in versione digitale – che fornisce per ognuno di essi gli elementi orbitali e le posizioni in cielo attorno all'epoca dell'opposizione.

Volendo fotografare gli asteroidi, bisogna tenere presente che la strumentazione necessaria dipende fortemente dalla loro magnitudine, che è diversa da oggetto a oggetto variando appunto dalla 6<sup>a</sup> grandezza per Vesta fino all'estremo limite attualmente raggiungibile dagli strumenti di osservazione ottica. Posto che la ripresa venga effettuata attorno al periodo dell'opposizione, quando la luminosità dei pianetini è massima, una comune macchina fotografica reflex renderà facilmente visibili i più grandi, fino a magnitudini 8 o 9, utilizzando un normale obiettivo da 50 mm di focale aperto a f/1,4 con pellicole di media sensibilità (400 ISO). Questi oggetti possono essere registrati anche senza inseguimento orario, cioè basta puntare la fotocamera, montata su un normale treppiede, verso la regione celeste in cui è situato l'asteroide, aprire l'otturatore una ventina di secondi e poi richiuderlo. Per pianetini più deboli è invece indispensabile montare la macchina fotografica in parallelo a un telescopio dotato di moto orario. In questo caso, con 10 minuti di posa un comune obiettivo fotografico da 50 mm di focale aperto a f/1,8 può, in ottime condizioni di osservazione, registrare oggetti di magnitudine 11 e oltre.

L'inconveniente delle riprese eseguite con obiettivi di corta focale risiede nella difficoltà di riconoscimento del pianetino, immerso in una miriade di stelle. È bene pertanto operare con dei teleobiettivi (sono definiti *teleobiettivi* tutti gli obiettivi con lunghezza focale maggiore di 50 mm, che pertanto inquadrano un campo minore rispetto a un obiettivo normale). Per i nostri scopi questi dovranno avere una focale di almeno 200 mm e diaframma almeno f/4,5; qui valgono gli stessi tempi di esposizione adottati per le stelle, in quanto il moto proprio del pianetino non viene evidenziato con così brevi focali neppure in un'ora di posa (eccezioni a quanto appena detto sono date dai pianetini che passano molto vicino alla Terra e che di conseguenza presentano un forte movimento angolare). Per l'astrofilo, l'ideale sarebbe un telescopio riflettore di 15 cm di diametro e rapporto di apertura f/5 (ad esempio un newtoniano 150/750 mm), con cui si possono ottenere risultati ancora maggiori dal momento che è possibile giungere alla magnitudine 14 senza problemi anche in soli 5 minuti di posa, con buone condizioni di cielo e pellicole particolarmente sensibili (1600 ISO). Gli strumenti in assoluto più adatti alle riprese di pianetini, ma anche i più costosi, restano gli astrografi – ossia i rifrattori per uso fotografico – e i telescopi Schmidt o Baker-Schmidt, che, grazie al loro grande campo, si prestano sia a fotografarne diversi in una sola lastra sia a scoprirne di nuovi.

Non vi sono in ogni caso regole rigide per quanto riguarda il telescopio e la camera CCD ideali per le osservazioni di asteroidi: in linea di massima, al giorno d'oggi, per la scoperta di nuovi pianetini e per cominciare ad effettuare osservazioni più serie e rigorose sarebbe preferibile avvalersi di telescopi riflettori di diametro non inferiore a 40 centimetri, anche di fattura non eccellente, come quelli largamente utilizzati nella maggior parte degli osservatori astronomici non professionali italiani. Titoli preferenziali ai fini astrometrici sono una focale superiore a 1 m e un sistema di puntamento affidabile. Pure l'acquisto della camera CCD, ormai irrinunciabile per qualsiasi tipo di ricerca astronomica, deve essere ben ponderato: il sensore contenuto nell'apparecchio non deve essere troppo piccolo, e parallelamente deve essere in grado di registrare in un tempo ragionevole anche gli oggetti più deboli. Infatti, dato che fino alla magnitudine apparente 18 tutti gli asteroidi all'opposizione sono ormai stati scoperti, la cosa importante è che il sistema arrivi ad acquisire immagini di stelle deboli fino alla magnitudine 19 con una esposizione singola non superiore ai quattro minuti, e quasi tutte le camere CCD abbinata a telescopi di almeno 20 cm di diametro possono riuscirci in notti serene e buie. Un altro criterio molto importante, ma quasi sempre sottovalutato nella scelta di una camera CCD, è il software di acquisizione del quale è normalmente dotata: è indispensabile che il software permetta una precisa registrazione dell'istante di inizio posa e della durata dell'esposizione, per un corretto calcolo (con la precisione del secondo) dell'istante di metà posa. Sarà infatti quest'ultimo l'istante di riferimento da associare al calcolo della posizione del pianetino eventualmente presente nell'immagine, e se il software non disponesse di questa semplice ma importante caratteristica sarebbe estremamente difficile compiere le misure astrometriche con la precisione richiesta dal Minor Planet Center, l'ente che coordina a livello mondiale la ricerca e lo studio dei pianetini.

L'investigazione di nuovi asteroidi naturalmente non sarà effettuata “a caso”: esistono zone privilegiate di ricerca, a maggiore probabilità di scoperta. Tanto per cominciare, i pianetini che stanno in opposizione, quelli più luminosi, si troveranno in prossimità dell'*anti-Sole*, ovvero del punto della sfera celeste diametralmente opposto a quello in cui si trova il Sole. Per individuarlo bisogna conoscere le coordinate equatoriali del Sole: all'ascensione retta si aggiungeranno allora 12h, mentre alla declinazione verrà cambiato il segno (il punto antisolare giace sull'eclittica e passa in meridiano, ossia in direzione sud per chi è nell'emisfero boreale, a mezzanotte circa). Si deve poi ricordare che gli asteroidi della fascia principale hanno orbite situate in prevalenza vicino all'eclittica, e da questa si discostano in genere fino a 12° (nord o sud); pertanto la ricerca dovrà essere limitata a una striscia, centrata sull'eclittica, con ampiezza di almeno 24°. Allontanandosi dall'eclittica la probabilità di trovare qualcosa diminuisce drasticamente, ma resta sempre la possibilità di incappare in oggetti “strani” come gli asteroidi vicini, i NEA, che si muovono su

traiettorie non usuali potendo presentare inclinazioni sul piano dell'orbita terrestre anche di 60° e oltre.

Il buon senso ci dice in generale che più grande è il campo di ripresa, maggiori saranno le probabilità di scoprire qualcosa di nuovo. Nel caso degli asteroidi vi è tuttavia un limite pratico: la scala lineare dell'immagine, che dovrebbe essere approssimativamente di non più di due secondi d'arco per elemento sensibile (*pixel*). Infatti, se i pixel del CCD – di forma rigorosamente quadrata – avessero un lato molto superiore ai due secondi d'arco, ovvero la scala fosse più piccola, si potrebbero abbracciare campi più estesi, ma con una insufficiente capacità di risoluzione e di accuratezza nelle misurazioni astrometriche (*sottocampionamento* dell'immagine). Se invece la scala fosse troppo grande, con pixel di lato molto più piccolo di due secondi d'arco, non solo il campo esaminato diverrebbe esageratamente piccolo, ma la sensibilità del sistema diminuirebbe pesantemente, in particolar modo per gli oggetti in movimento, che vengono impressi su un dato pixel per un intervallo di tempo limitato (*sovracampionamento* dell'immagine). Nelle condizioni osservative in cui operano tipicamente gli astrofili, scale di circa 2 secondi d'arco per pixel sono ideali per la rilevazione di oggetti puntiformi deboli. Inoltre, immagini acquisite con questa scala riveleranno facilmente (in 10-15 minuti) lo spostamento di eventuali asteroidi utilizzando le tecniche descritte nel prossimo paragrafo.

Tornando ai NEA, la ricerca telescopica di asteroidi vicini deve fare i conti con due parametri principali: la frazione della volta celeste che si tiene sotto controllo e la magnitudine limite raggiungibile dal telescopio, quest'ultima dipendente da vari fattori. Poiché questi oggetti, proprio per le loro caratteristiche fisiche ed orbitali, vengono scoperti quando effettuano incontri stretti con il nostro pianeta, li si può trovare praticamente in ogni angolo di cielo e non necessariamente nei pressi dell'eclittica, neppure per quei pianetini che hanno bassa inclinazione orbitale. Ecco perché la frequenza di scoperte entro una certa magnitudine limite risulta grosso modo proporzionale all'area di cielo che si tiene sotto controllo. La magnitudine limite dello strumento, a sua volta, determina l'entità della popolazione asteroidale che si vuole indagare: tipicamente, il tasso di scoperta cresce esponenzialmente con la magnitudine limite. C'è però un vincolo pratico che non consente di lavorare a magnitudini limite troppo spinte, o comunque che rende sostanzialmente inutile la scoperta se dell'oggetto si vogliono ottenere ulteriori informazioni sull'orbita e sulle caratteristiche chimico-fisiche. Questo vincolo è rappresentato dalla possibilità che altri osservatori possano ottenere nuove misure fisiche o astrometriche dello stesso oggetto: un asteroide scoperto con uno strumento di qualità superiore e troppo debole per essere seguito da altri osservatori è virtualmente perso per ogni scopo pratico. Il segreto dei recenti successi nell'assicurarci ottime misure di nuovi asteroidi vicini è stato l'esistenza di un gruppo di osservatori sparsi per il mondo e accomunati dall'obiettivo di seguire con attenzione questi oggetti.

I fattori centrali da privilegiare nella ricerca di asteroidi vicini sono l'espansione della copertura sistematica del cielo ed uno stretto coordinamento tra gli osservatori. In campo strumentale la proposta che pare più conveniente, oltre che più immediata e meno costosa, è quella di utilizzare camere Schmidt (o potenziare quelle già esistenti) accoppiandole a rivelatori CCD. L'incremento esponenziale nel numero delle scoperte avutosi negli anni '90 è essenzialmente dovuto alla possibilità di utilizzare telescopi di maggiore apertura e migliore qualità ottica, ma soprattutto alla disponibilità di sensori elettronici molto più sofisticati e sensibili che in passato. I recenti progetti professionali di ricerca automatica, come ad esempio il LINEAR, il NEAT o il LONEOS (vedi tabella sotto), hanno drasticamente ridotto le possibilità dell'astrofilo di rendersi artefice di una scoperta asteroidale o cometaria. Infatti, i suddetti programmi scandagliano continuamente il cielo in modo sistematico alla ricerca di nuovi oggetti più o meno pericolosi per il nostro pianeta, utilizzando generalmente telescopi Schmidt di diametro medio-grande accoppiati a sofisticate camere CCD e situati in luoghi molto favorevoli all'osservazione.

## Programmi di ricerca dei NEO (Near-Earth Objects)

- **NEAT** (*Near-Earth Asteroid Tracking program*). Programma iniziato nel 1995 col telescopio GEODSS ad Haleakala, Maui, Hawaii. Dal 1999 passa ad utilizzare due sistemi automatici collocati rispettivamente al Sito di Sorveglianza Spaziale di Maui (Hawaii) e all'Osservatorio di Monte Palomar (California). Entrambi i sistemi utilizzano un telescopio di 1,2 metri.
- **LINEAR** (*Lincoln Near-Earth Asteroid Research program*). Programma finanziato dall'Aeronautica Militare degli Stati Uniti e dalla NASA. Iniziò le operazioni di sorveglianza nel 1998 a Socorro, New Mexico. Nel 1999 fu aggiunto un secondo telescopio GEODSS.
- **LONEOS** (*Lowell Observatory Near-Earth Objects Search*). Ha iniziato le operazioni nel 1998 e utilizza un telescopio da 0,6 metri a Flagstaff, Arizona.
- **Spacewatch**. Il più "vecchio" dei programmi di ricerca, intrapreso a partire dal 1984 con lo *Steward Observatory* del complesso di Kitt Peak, Arizona. Attualmente opera con due telescopi, uno da 0,9 e uno da 1,8 metri.
- **The Catalina Sky Survey**. Iniziò le operazioni nel 1998. Segue entrambi gli emisferi con un telescopio di 0,7 metri, situato a Monte Bigelow (20 km a nord di Tucson, Arizona).
- **UDAS** (*UAO-DLR Asteroid Survey*). Partito nel settembre 1999, è situato a Kvistaberg, circa 50 km a sud di Uppsala, in Svezia. Utilizza un telescopio di 1 metro.
- **The Japanese Spaceguard**. Recente programma di ricerca giapponese situato a Bisei, Honshu, partito nel 2000 usando un telescopio di 0,5 metri di diametro.

## TECNICHE DI SCOPERTA

Vi sono tre diverse tecniche classiche per l'individuazione di nuovi asteroidi, e tutte si fondano sul concetto che essi si spostano nel cielo rispetto allo sfondo delle stelle "fisse" con un movimento percepibile in un tempo relativamente breve.

La prima tecnica è quella del *blinking* (dall'inglese *blink*, "batter d'occhi"), e si basa sul confronto tra due immagini della stessa zona di cielo prese in tempi diversi mediante uno strumento che le visualizza, una dopo l'altra, in rapida successione. Se una "stellina" c'è su una lastra ma manca nell'altra, la sua immagine pare scintillare ad intermittenza. La seconda tecnica è quella della "*doppia immagine*": sulla stessa lastra si effettuano due pose, intervallate da un tempo sufficiente a permettere un moto significativo dell'asteroide e separate da un piccolo angolo, ottenuto con un leggero spostamento del telescopio in declinazione. Tutte le stelle appariranno allora come coppie di punti luminosi paralleli tra loro, mentre la doppia immagine dell'asteroide risulterà inclinata rispetto alla direzione comune delle altre stelle. Infine vi è il metodo della "*traccia*", che ancora oggi è uno dei più usati per la scoperta di nuovi oggetti (soprattutto quelli con elevato moto apparente): si espone la lastra per un periodo di tempo sufficientemente lungo, in relazione alle caratteristiche ottiche dello strumento; alla fine ogni stella presenterà un'immagine puntiforme, mentre l'eventuale asteroide avrà un'immagine allungata in quanto si sarà spostato secondo la traiettoria del suo moto apparente.

Tutte queste tecniche, che fino a non molti anni fa venivano condotte con mezzi fotografici, oggi sono completamente integrate nel software di cui sono dotate le più comuni camere CCD. Ma imparare a lavorare con una tecnologia nuova richiede tempo, ed è per questo che si consiglia sempre di cominciare con l'osservare asteroidi noti: prima di tutto ciò consentirà di acquisire una notevole pratica nel puntamento di un telescopio su un campo di stelle dove l'oggetto cercato appare anch'esso come una stella. Se l'asteroide è di debole luminosità, infatti, già questa operazione preliminare si dimostra tutt'altro che banale. L'osservazione di oggetti noti fornisce poi esperienza nella comparazione di immagini e nella misura di posizioni. Gli asteroidi numerati in modo definitivo (quelli che hanno elementi orbitali determinati con accuratezza) raramente si discostano di più di qualche secondo d'arco rispetto alle posizioni predette dalle effemeridi

giornaliere, e possono fare “da scuola” per controllare la qualità delle proprie tecniche di osservazione.

Dopo alcuni di questi test, ci si può rivolgere a ricerche più significative. Un approccio possibile consiste nel fermarsi su di un preciso campo stellare, acquisendo tre o quattro esposizioni distribuite lungo un’ora di osservazione; questo metodo si usa in modo particolare con telescopi che manchino di puntamento rapido motorizzato. Un’altra possibilità è l’acquisizione di una sequenza di immagini di campi stellari adiacenti, un procedimento che è particolarmente facile con i telescopi dotati di puntamento computerizzato o con quelli che hanno cerchi di regolazione di altissima precisione. Negli osservatori astronomici si può inoltre raggiungere un buon grado di automazione facendo sì che i movimenti del telescopio e della cupola siano comandati e sincronizzati dallo stesso o anche da un altro computer. I tempi di posa massimi e gli intervalli tra un’esposizione e l’altra andranno determinati sia in base al moto apparente dell’oggetto che si prevede di individuare, sia in base alla scala lineare della strumentazione (espressa in "/pixel). Per ogni campo acquisito è sempre necessario registrare, con la precisione del secondo, il Tempo Universale alla metà esatta dell’esposizione. Tutte le immagini verranno ripetute dopo un certo intervallo di tempo e confrontate fra di loro con un opportuno software, solitamente fornito assieme alla camera CCD, che rappresenta l’equivalente digitale della tecnica del *blink*: usando metodi efficienti per lo spostamento del telescopio tra un’esposizione e l’altra, si possono ottenere nell’arco di un’ora quattro coppie di immagini che si sovrappongono, con campi corrispondenti separati da circa 30 minuti. In ogni caso, una semplice coppia di immagini non costituisce mai una prova certa: è buona prassi fare almeno tre riprese dello stesso campo e verificare con un *blink* a tre o più immagini la presenza del pianetino. Naturalmente la comparazione delle immagini sarà tanto più efficiente quanto più i campi stellari coincidono perfettamente e gli intervalli di tempo tra le esposizioni sono uguali.

Nel caso in cui venga individuato un oggetto di tipo asteroidale, il passo successivo è verificare se esso sia conosciuto oppure no. A tal fine si deve provvedere subito, con la massima precisione, all’extrapolazione delle sue coordinate equatoriali, per controllare tramite uno dei numerosi programmi di simulazione del cielo che mostrano la posizione degli asteroidi noti se la sua presenza sia prevista o meno nell’area inquadrata. Bisogna però ricordare che gli archivi interni a questi programmi – che comunque devono essere tenuti costantemente aggiornati – includono normalmente solo gli asteroidi numerati in modo definitivo e pochi altri, mentre nei cataloghi *on-line* del Minor Planet Center di Cambridge, in Massachusetts, ci sono migliaia di oggetti in più, motivo per cui si consiglia sempre di consultare questi ultimi prima di proporre un oggetto come una possibile nuova scoperta: attraverso Internet o con una connessione modem diretta al Minor Planet Center si può ottenere in pochissimi minuti una lista completa delle comete e degli asteroidi conosciuti in una regione di cielo selezionata. Il Minor Planet Center mantiene inoltre aggiornate anche le liste di oggetti “insoliti” e “critici”, ossia quelli che hanno orbite strane o che sono stati osservati raramente negli ultimi anni. Una possibile strategia di ricerca che garantisce di ottenere dati utili e permette di costruirsi anche una credibilità come osservatori consiste proprio nello scegliere un campo che contenga uno di questi oggetti inusuali, sebbene la probabilità di trovare qualcosa di nuovo in un campo di questo genere sia pari a quella che si ha guardando in una zona qualsiasi del cielo.

Nell’eventualità in cui l’asteroide osservato non compaia in alcun catalogo, è effettivamente possibile che ci si trovi dinanzi a un oggetto nuovo, ma, con poche eccezioni riservate a corpi aventi orbite molto particolari, l’MPC non pubblica né dà credito a scoperte ottenute in una sola notte di osservazione. La cosa più importante è dunque acquisire la posizione (o meglio le posizioni, da due a cinque per notte) del presunto nuovo asteroide in una seconda notte, cosa che è senza dubbio preferibile anche nel caso di oggetti conosciuti. Una volta ottenuti dati in quantità sufficiente, questi andranno immediatamente inviati tramite posta elettronica, e in formato standard, al Minor Planet Center, dove si provvederà a farli verificare. Di solito il messaggio di risposta giunge entro un giorno, a volte entro qualche ora. In caso di conferma sarà assegnata al nuovo oggetto una sigla

provvisoria ufficiale, composta dall'anno della scoperta seguito da due lettere maiuscole dell'alfabeto anglosassone: la prima indica il mese e la quindicina entro il mese (A dal 1° al 15 gennaio, B dal 16 al 31 gennaio, e così via fino alla Y), la seconda indica l'ordine di scoperta entro la quindicina (A per il primo della quindicina, B per il secondo, C per il terzo, ecc., fino alla Z). Nella nomenclatura non viene considerata la lettera I (si passa cioè direttamente dalla H alla J), dunque utilizzando l'alfabeto inglese alla lettera Z sarà associata la venticinquesima scoperta effettuata nella "metà mese" in questione. Se poi nella stessa metà del mese sono state fatte più di 25 scoperte, si ricicla la seconda lettera aggiungendo alla fine il numero 1; se le scoperte sono più di 50 si ricicla ancora la lettera aggiungendo il numero 2, e così via. Ad esempio: immaginiamo di avere scoperto un oggetto il 7 marzo del 2003 e che questo sia il sesto scoperto nella prima metà di marzo. Il codice sarà allora: 2003 EF, dove la lettera E indica la prima metà di marzo e F indica che è il sesto oggetto scoperto in quella metà mese. Non avendo ancora raggiunto la 25esima scoperta, non è necessario aggiungere un numero finale. Volendo invece codificare un oggetto scoperto il 27 maggio 2003, il 38esimo della seconda metà di maggio, il codice sarà: 2003 KN1, dove K sta per la seconda metà di maggio, N si riferisce alla 13esima scoperta ( $38-25=13$ ) e il numero 1 indica che la lettera N è stata riciclata una volta, in quanto è stata superata la 25esima scoperta.

Bisogna precisare che in molti casi la persona alla quale viene attribuita la scoperta non è necessariamente quella che per prima ha osservato l'oggetto, bensì quella che lo ritrova facendo totalizzare un numero di osservazioni sufficiente a stabilirne un'orbita ragionevole. La misura della posizione di un asteroide effettuata in due notti, infatti, per quanto basti ai fini di una designazione preliminare, consentirà soltanto di determinare le posizioni relative a qualche settimana passata o futura, perciò è normale che il medesimo oggetto sia osservato molte volte all'anno e che ogni volta gli venga assegnata una sigla diversa. Anche se in un mese particolare possono essere pubblicate molte centinaia di tali attribuzioni, questo non significa che ognuna di esse si riferisca a un nuovo asteroide: significa solo che osservazioni molteplici dello stesso oggetto non sono mai state collegate l'una con l'altra matematicamente, in modo da dimostrare la loro appartenenza ad una singola orbita. Il Minor Planet Center è oggi in grado di elaborare più di 70 mila osservazioni al giorno. Lo staff dell'MPC e altri studiosi di orbite sparsi per tutto il mondo sono costantemente alla ricerca di questi legami; un lavoro molto complesso che necessita di programmi numerici raffinati e laboriosi. Se vengono trovati legami a sufficienza, l'asteroide è pronto quasi immediatamente a ricevere una designazione finale, e normalmente, perché ciò accada, esso deve passare almeno quattro opposizioni (tale numero si può ridurre a tre e talvolta a due soltanto per oggetti particolari come i NEA). In pratica, dunque, possono essere necessari anni di monitoraggio prima che al pianetino classificato come nuovo vengano attribuiti un numero e un nome definitivi. Ma è anche possibile che esso venga collegato a molte osservazioni passate, che fino a quel momento non erano state sufficienti a calcolare un'orbita accurata: in tal caso può succedere che l'asteroide sia presto numerato e che chi l'ha osservato per ultimo sia dichiarato il suo scopritore ufficiale.

In conclusione, nel caso che il nuovo pianetino non venga identificato con alcun oggetto precedente, il *follow-up*, cioè la determinazione di nuove posizioni in cielo, diventa essenziale per migliorare la precisione dell'orbita temporanea e poter continuare a tentare l'identificazione attraverso il catalogo degli oggetti provvisori. Con un arco osservativo di una decina di giorni si può stare relativamente tranquilli per alcuni mesi, mentre riuscire a inseguire l'oggetto per tre o quattro mesi garantirebbe elementi orbitali tali da permettere l'osservazione durante l'opposizione successiva, che in media avviene dopo circa 18 mesi: spesso e volentieri pianetini realmente scoperti sono stati "persi" e mai più ritrovati a causa della durata troppo breve delle osservazioni. Ricordiamo altresì che una buona copertura osservativa non solo garantisce il ritrovamento, ma consente allo scopritore di essere considerato come *scopritore ufficiale*, l'unico ad avere facoltà di proporre un nome definitivo per l'asteroide.

Nella scelta del nome, inizialmente limitata alle figure della mitologia classica, oggi lo scopritore ha un'ampia libertà, purché questo sia formato al massimo da 16 caratteri e non appartenga a un personaggio pubblico, conosciuto per le sue attività politiche o militari, scomparso da meno di un

secolo. La denominazione proposta, corredata da relativa motivazione, deve essere preventivamente approvata dalla commissione *Small Bodies Names* dell'*International Astronomical Union* (IAU), quindi ufficializzata sulle circolari riguardanti i corpi minori, edite mensilmente dal Minor Planet Center.

## ***OSSERVAZIONI ASTROMETRICHE e FOTOMETRICHE***

Principalmente, le osservazioni dei pianetini a carattere scientifico si possono dividere in due categorie: le osservazioni di tipo *astrometrico* e quelle di tipo *fotometrico*.

Le prime consistono nella misurazione precisa della posizione dell'asteroide nel cielo al fine di determinarne l'orbita o di migliorarne la conoscenza degli elementi. Infatti, contrariamente a quanto si può credere, gran parte dei pianetini finora catalogati (e specialmente i più recenti in ordine di scoperta) hanno orbite conosciute in maniera approssimativa, e non di rado capita che, a causa di accidentali errori di calcolo o per assenza di misurazioni astrometriche, si trovi l'oggetto cercato qualche primo d'arco fuori dalla posizione prevista. È quindi ovvio che quanto più frequenti ed accurate saranno le misure effettuate, tanto più si ridurrà l'errore commesso nel determinare i parametri orbitali, senza contare che la determinazione precisa delle orbite dei pianetini può aiutare in maniera significativa gli studiosi di meccanica celeste per le indagini sull'evoluzione dinamica e sulla stabilità a lungo periodo. Di qui l'importanza di questo tipo di osservazioni, le quali vengono condotte nella quasi totalità proprio da astronomi non professionisti e appassionati che dispongono di telescopi riflettori di lunga focale, mediante tecniche fotografiche o con l'ausilio di camere CCD amatoriali che consentono una precisione migliore del secondo d'arco.

Ai fini astrometrici non sono necessarie condizioni atmosferiche particolarmente buone (molti astrometri lavorano nelle periferie urbane o addirittura in città); esistono sicuramente alcune restrizioni, ma l'inquinamento luminoso gioca un ruolo secondario: prova ne sia il fatto che si lavora anche in prossimità della Luna. Il vero nemico è la foschia, in special modo quando si osserva a latitudini basse. Anche la turbolenza atmosferica è sopportabile, dato che non sono richieste risoluzioni ai limiti strumentali. Un altro vantaggio è costituito dalla distribuzione degli oggetti in cielo, che praticamente consente di osservare in qualsiasi ora della notte ed in qualsiasi stagione, sebbene sia ovvio che ogni oggetto avrà la sua ora e il suo giorno preferenziale. Nonostante il rigore matematico richiesto, poi, al giorno d'oggi esistono diversi pacchetti software sviluppati appositamente per l'astrometria di asteroidi e comete con CCD amatoriali, che permettono di effettuare tutte le misure necessarie in poco tempo. Nel nostro paese questo genere di attività ha una lunga tradizione fra gli astrofili, che fa riferimento principalmente al *Gruppo Italiano Astrometri* (GIA), sorto nel 1993 senza però assumere il carattere di un organismo ufficiale: tutti gli appartenenti al Gruppo sono di fatto indipendenti e autonomi. Tutte le misure astrometriche, che devono soddisfare determinati standard, vanno inviate al Minor Planet Center tramite posta elettronica.

Le osservazioni di carattere fotometrico, invece, sono rivolte alla determinazione delle curve di luce dei pianetini dovute alla rotazione di questi ultimi attorno al proprio asse. Da queste osservazioni, tramite la riduzione dei dati osservativi, possono essere poi dedotti i relativi parametri fisici, quali il rapporto tra i due semiassi maggiori dell'asteroide (supposto di forma triassiale), la determinazione dell'orientamento dell'asse di rotazione (che inizialmente viene assunto come l'asse più corto), le principali caratteristiche morfologiche dell'oggetto. Queste osservazioni, a differenza di quelle astrometriche, necessitano di buone condizioni al contorno (cieli sereni e poco turbolenti, basso inquinamento luminoso) e di un telescopio di apertura abbastanza grande abbinato ad un fotometro fotoelettrico o a un CCD, poiché è richiesta un'accuratezza nella stima dell'ordine delle 0,01-0,05 magnitudini. C'è da dire che anche in questo caso il numero di astronomi professionisti che eseguono osservazioni fotoelettriche di pianetini è decisamente scarso; questi ultimi poi di norma preferiscono rivolgere la loro attenzione allo studio di asteroidi di debole luminosità, che possono

essere osservati solamente tramite telescopi di grande diametro, cosicché agli astrofili è lasciato un grandissimo numero di asteroidi brillanti. Naturalmente esistono asteroidi che sono stati studiati meglio di altri, per cui un'ulteriore classificazione sullo stato di conoscenza della curva di luce viene fatta assegnando a ciascun asteroide un indice sulla qualità dei dati riportati, che può variare da 1 a 4 a seconda che i dati fotometrici siano sconosciuti o viceversa privi di incertezza. Le indagini quindi dovranno essere rivolte principalmente ai pianetini che rientrano nelle prime due classi, quelle i cui dati sono ignoti o in buona parte incompleti. Alcuni degli oggetti sono segnalati come di "difficile osservazione fotometrica", ad esempio perché hanno un periodo lungo oppure una piccola variazione in ampiezza; è bene pertanto iniziare le osservazioni facendo esperienza su oggetti ben noti per verificare i risultati ottenuti. Ricordando poi che la maggior parte degli asteroidi ha periodi di rotazione compresi fra 4 e 12 ore, in una singola notte di osservazione sarà possibile ottenere dati su una larga porzione della curva di luce, sebbene per avere risultati scientificamente utilizzabili sia comunque opportuno protrarre le osservazioni per più notti consecutive. Compiendo le misure si deve tenere conto di alcuni effetti dovuti alla variazione nel tempo della distanza dell'asteroide dalla Terra e dal Sole ed alla variazione dell'angolo di fase, dati questi che sono tutti tabulati nelle effemeridi. Tali effetti possono essere rimossi trasformando, con apposite formule, la magnitudine *osservata* nella magnitudine *assoluta*, ossia quella che l'asteroide avrebbe se fosse idealmente posto ad una distanza di 1 UA sia dal Sole che dalla Terra, a 0° di fase (cioè perfettamente all'opposizione): questo è il punto di partenza per la riduzione dei dati e per lo sviluppo dei calcoli successivi.

## Bibliografia

### Libri:

- AA.VV.: Enciclopedia a fascicoli *Astronomia - alla scoperta del cielo*, ed. Curcio, Roma 1986, vol. 1, pagg. 102-109;
- AA.VV.: Enciclopedia a schede *Astronomia - dalla Terra ai confini dell'Universo*, ed. Fabbri, Milano 1991 (Il cielo nella storia, pagg. 193-194; Sistema Solare, pagg. 45-46, 77-78, 87-88, 105-106, 149-150, 235-236, 239-240, 243-244, 249-250, 293-294; Strumenti e metodi, pagg. 29-30, 147-148);
- Paolo Farinella, Paolo Paolicchi, Vincenzo Zappalà: *Gli asteroidi*, ed. Il Castello, Milano 1983;
- Patrick Moore: *Il Guinness dell'astronomia*, ed. Rizzoli, Milano 1990;
- Alessandro Braccesi, Giovanni Caprara, Margherita Hack: *Alla scoperta del Sistema Solare*, ed. Mondadori, Milano 1993;
- Kenneth R. Lang, Charles A. Whitney: *Vagabondi nello spazio*, ed. Zanichelli, Bologna 1994;
- Sergio Foglia: *Manuale per l'osservazione degli asteroidi*, periodico bimestrale *Astronomia UAI* n.2 marzo/aprile 1996, ed. Biroma, Galliera Veneta (PD);
- Mario Rigutti: *Comete, meteoriti e stelle cadenti*, ed. Giunti, Firenze 1997;
- Salvo De Meis, Jean Meeus: *Asteroidi*, ed. Sirio s.r.l., Milano 1997.

### Articoli:

- Clark R. Chapman, "La natura degli asteroidi", *Le Scienze* n.81 maggio 1975;
- Eleanor F. Helin: "Gli asteroidi vicini", *l'Astronomia* n.76 aprile 1988, pagg. 30-38;
- Vincenzo Zappalà: "Asteroidi nel Far West", *l'Astronomia* n.82 novembre 1988, pagg. 6-17;
- Paolo Farinella, Cesare Guaita: "Faccia a faccia con Gaspra", *l'Astronomia* n.117 gennaio 1992, pagg. 4-11;
- Cesare Guaita: "Il vero volto di Toutatis", *Nuovo Orione* n.16 settembre 1993, pagg. 22-29;
- Alberto Cellino: "Immagini di Gaspra", *Nuovo Orione* n.17 ottobre 1993, pagg. 42-45;
- Cesare Guaita: "Piccoli corpi crescono", *l'Astronomia* n.137 novembre 1993, pagg. 28-41;
- Corrado Lamberti: "Brava Galileo! Un successo l'incontro con Ida", *l'Astronomia* n.138 dicembre 1993, pagg. 4-6;
- Paolo Farinella: "Asteroidi 'ubriachi'", *l'Astronomia* n.143 maggio 1994, pagg. 7-8;
- Cesare Guaita: "La sonda Galileo svela i segreti di Ida", *Nuovo Orione* n.25 giugno 1994, pagg. 28-34;
- Corrado Lamberti: "Ida ha un piccolo satellite", *l'Astronomia* n.144 giugno 1994, pagg. 6-7;
- Sergio Foglia: "Osservare gli asteroidi", *Nuovo Orione* n.26 luglio 1994, pagg. 39-46;
- Paolo Farinella: "Pianetini visti da vicino", *l'Astronomia* n.150 gennaio 1995, pagg. 14-23;
- Corrado Lamberti: "Misurata la densità di Ida", *l'Astronomia* n.155 giugno 1995, pagg. 9-10;
- Paolo Farinella: "Asteroidi sull'orlo del precipizio?", *l'Astronomia* n.156 luglio 1995, pagg. 12-13;
- Mario Di Martino: "Obiettivo Eros", *l'Astronomia* n.162 febbraio 1996, pagg. 16-21;
- Dmitrij F. Lupishko: "Il rischio di un impatto cosmico: realtà o fantascienza?", *Nuovo Orione* n.50 luglio 1996, pagg. 36-41;
- Alessandro Morbidelli: "Asteroidi-killer, il Sole ci protegge", *l'Astronomia* n.173 febbraio 1997, pagg. 34-44;
- Salvo De Meis: "Incontri ravvicinati con gli asteroidi", *Nuovo Orione* n.57 febbraio 1997, pagg. 30-35;
- Paolo Farinella: "Troiani fuggitivi", *l'Astronomia* n.174 marzo 1997, pagg. 9-11;

- Giovanni Dal Lago, Michele Ferrara: “Chirone torna inattivo”, *l’Astronomia* n.174 marzo 1997, pagg. 43-47;
- Cesare Guaita: “Splendida e misteriosa Mathilde”, *Nuovo Orione* n.63 agosto 1997, pagg. 26-29;
- Joseph F. Veverka, Robert W. Farquhar: “NEAR views of Mathilde”, *Sky & Telescope* ottobre 1997, pagg. 30-32;
- Gabriele Cremonese: “Un enorme cratere da impatto su Vesta”, *Coelum* n.3 novembre 1997, pagg. 24-25;
- Corrado Lamberti: “Maxi-cratere su Vesta”, *l’Astronomia* n.181 novembre 1997, pagg. 6-8;
- Dennis Di Cicco: “Nostri mondi lontani”, *Coelum* n.6 febbraio 1998, pagg. 86-92;
- Rodolfo Calanca, Claudio Bottari, Roberto Bonomi, Bill Dillon: “Asteroidi che incrociano l’orbita terrestre”, *l’Astronomia* n.185 marzo 1998, pagg. 44-51;
- Mario Di Martino: “(253) Mathilde: un accumulo di detriti”, *l’Astronomia* n.186 aprile 1998, pagg. 14-15;
- Carlo Blanco: “Near Earth Objects: una minaccia per la Terra”, *Nuovo Orione* n.75 agosto 1998, pagg. 32-37;
- Vincenzo Zappalà: “Asteroidi doppi”, articolo in due parti da *Coelum* n.17 febbraio 1999 e n.18 marzo 1999;
- Vincenzo Zappalà: “La culla dei NEO”, *Nuovo Orione* n.82 marzo 1999, pagg. 30-35;
- Paolo Farinella: “L’odissea dei NEA”, *l’Astronomia* n.203 novembre 1999, pagg. 20-27;
- Alberto Cellino: “Osservare i ‘NEO’ dallo spazio”, *Nuovo Orione* n.101 ottobre 2000, pagg. 32-37;
- Piero Sicoli: “Due secoli fa la scoperta di Cerere”, *l’Astronomia* n.214 novembre 2000, pagg. 30-37;
- Mario Di Martino: “Un Centauro bifronte”, *l’Astronomia* n.215 dicembre 2000, pagg. 10-11;
- Gianfranco Benegiamo: “La notazione simbolica dei primi asteroidi”, *Nuovo Orione* n.104 gennaio 2001, pagg. 44-49;
- Cesare Guaita: “Un anno attorno a Eros”, *l’Astronomia* n.217 febbraio 2001, pagg. 18-31;
- Claudio Elidoro: “Centauri: killer in lista d’attesa?”, *Nuovo Orione* n.117 febbraio 2002, pagg. 40-47;
- Mario Di Martino: “Inflazione asteroidale”, *l’Astronomia* n.233 luglio 2002, pagg. 13-14.