

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BOLOGNA

FACOLTA' DI SCIENZE MATEMATICHE, FISICHE E NATURALI

Dipartimento di Astronomia
Corso di Laurea in Astronomia
Materia di Tesi: Astronomia

**I CORPI MINORI
DEL SISTEMA SOLARE**

Tesi di Laurea di:

CLAUDIO ELIDORO

Relatore:

Chiar.mo Prof.

CORRADO BARTOLINI

Sessione Autunnale

Anno Accademico 1995 - 1996

INDICE

INTRODUZIONE

1. UNA VISIONE D'INSIEME	3
2. L'ORIGINE DEL SISTEMA SOLARE	7
3. METODOLOGIE OSSERVATIVE DEI CORPI MINORI	14

PARTE PRIMA: GLI ASTEROIDI

1. NOTA STORICA	17
2. ORIGINE DEGLI ASTEROIDI	19
3. IL RUOLO DEGLI IMPATTI	25
4. FAMIGLIE DINAMICHE	31
5. CLASSIFICAZIONE	39
6. "INCONTRI RAVVICINATI"	48
951 GASPRA	49
243 IDA	52
433 EROS ED I N.E.A.	54
4179 TOUTATIS	61
7. LA TERRA COME BERSAGLIO	65

PARTE SECONDA: LE COMETE

1. NOTA STORICA	81
2. ORIGINE ED EVOLUZIONE	
2.1 LA NUBE DI OORT E LA FASCIA DI KUIPER	82
2.2 LE COMETE A CORTO PERIODO	88
2.3 FASI EVOLUTIVE FINALI	94

3. MORFOLOGIA E FENOMENI FISICI CONNESSI	
3.1 IL MODELLO DI WHIPPLE	100
3.2 IL NUCLEO	107
3.3 LA CHIOMA	111
3.4 LA CODA	116
PARTE TERZA: KUIPER-BELT OBJECTS	
1. NOTA STORICA	119
2. IL SISTEMA PLUTONE - CARONTE	124
3. CHIRONE ED I CENTAURI	128
4. UNA POPOLAZIONE TUTTA DA SCOPRIRE	134
BIBLIOGRAFIA	139

INTRODUZIONE

1. UNA VISIONE D'INSIEME

Scorrendo le tappe fondamentali della Storia dell'Astronomia, appare evidente come il quadro complessivo del Sistema Solare si sia gradualmente modificato e ampliato man mano che la ricerca e la tecnologia mettevano a disposizione strumenti di indagine più adeguati.

Alla fine del XVII secolo tale quadro era composto da: Mercurio, Venere, Terra (con la Luna), Marte, Giove e Saturno; erano inoltre noti 4 satelliti di Giove (i cosiddetti Galileiani) e 5 di Saturno, e cominciava a prender corpo l'idea che le comete fossero a pieno titolo corpi appartenenti al Sistema Solare (Halley - 1687).

Nel XVIII secolo si aggiunge al gruppo Urano con 2 suoi satelliti, mentre salgono a 7 quelli di Saturno.

Un ulteriore passo in avanti viene compiuto nel secolo scorso: Nettuno, i due satelliti di Marte, 2 ulteriori satelliti di Saturno, altri 2 per Urano ed uno di Giove.

E' inevitabile, parlando di Nettuno, sottolineare come la scoperta di questo pianeta rappresenti uno dei momenti storici della Meccanica Celeste; grazie agli studi accurati delle perturbazioni dell'orbita di Urano compiuti, indipendentemente, da Adams e Le Verrier, Galle il 23 settembre 1846 (tre mesi dopo la pubblicazione dei calcoli di Le Verrier) identificò in cielo il nuovo pianeta: carta e penna avevano preceduto il telescopio e gli avevano indicato la strada.

E' del 1801 la scoperta di Cerere, il primo degli asteroidi: su di essa approfondiremo il discorso in seguito.

Per completare il quadro dei pianeti bisognerà attendere il 18 febbraio 1930 con la scoperta di Plutone avvenuta in modo apparentemente simile a quella di Nettuno: i calcoli erano stati fatti da Lowell e la scoperta fu opera di Tombaugh (anche se, questa volta, la fortuna diede proprio un aiuto decisivo: gli elementi orbitali calcolati teoricamente, infatti, erano abbastanza diversi da quelli reali determinati in seguito, e Plutone si trovava in quella posizione quasi per caso...).

Grazie alle osservazioni effettuate con i mezzi attuali, includendo tra essi le sonde spaziali, la situazione dei pianeti componenti la famiglia del Sole può essere riassunta in questa tabella:

Pianeta	Numero satelliti	Dist. media dal Sole (U.A.)	Periodo (anni)	Massa (M_T) (*)	Raggio (R_T) (*)
MERCURIO	0	0.387	0.240842	0.0559	0.382
VENERE	0	0.723	0.615187	0.8150	0.949
TERRA	1	1.000	1.00000	1.00	1.00
MARTE	2	1.524	1.880816	0.1074	0.532
GIOVE	16	5.203	11.86178	317.9	11.226
SATURNO	22 (**)	9.523	29.45657	95.2	9.407
URANO	15	19.164	84.01880	14.5	4.007
NETTUNO	8	29.987	164.788	17.2	3.882
PLUTONE (***)	1	39.440	247.688	0.0022	0.180

(*) $M_T = 5.97 \times 10^{24}$ kg $R_T = 6378$ km

(**) 17 da Taylor ed altri 5 da Guaita (1996)

(***) Plutone è nell'elenco per ragioni storiche, in quanto è stato "elevato al rango" di pianeta all'atto della sua scoperta: se fosse stato scoperto ai nostri giorni, quasi certamente non sarebbe catalogato come pianeta.

(Dati desunti da: Taylor - Solar System Evolution - 1992)

Tra Marte e Giove, in una regione di spazio compresa tra circa 1.8 e 3.5 U.A., si colloca la FASCIA PRINCIPALE degli ASTEROIDI, formata da circa il 97% degli oltre 30000 (finora scoperti) corpi celesti così chiamati per il loro aspetto "quasi stellare", 7000 dei quali ha orbite determinate in modo accurato.

Il quadro è completato dalla presenza delle COMETE (corpi celesti per i quali non è possibile trovare una "collocazione spaziale" ben definita in quanto caratterizzati da un'ampia gamma di parametri orbitali) e dalla recente introduzione di una nuova classe di oggetti celesti, indicati genericamente con il termine di KUIPER-BELT OBJECTS (ma ai quali talvolta ci si riferisce (Stern, 1992) con il termine di ICE DWARFS o più genericamente con quello di OGGETTI TRANS-NETTUNIANI) la cui scoperta ha reso non più solamente ipotetica l'esistenza della FASCIA DI KUIPER.

Con il termine **CORPI MINORI** si definiscono tutti i corpi del Sistema Solare con la sola esclusione dei Pianeti e del Sole.

Si potrebbe obiettare che il termine non sia certo il più adatto: ci sono, infatti, almeno 2 satelliti (Titano e Ganimede) che hanno dimensioni maggiori di quelle di Mercurio.

In questo studio, comunque, utilizzerò il termine **CORPI MINORI DEL SISTEMA SOLARE** in una accezione molto più ristretta, escludendo tutti i satelliti: verranno perciò analizzati gli **ASTEROIDI**, le **COMETE** ed i **KUIPER-BELT OBJECTS**, cercando di verificare anche, dove possibile, se le conoscenze che possediamo circa questi corpi si adattano o meno alla teoria della formazione del Sistema Solare.

Questa soluzione forse può apparire riduttiva e drastica, ma la ritengo necessaria per focalizzare l'attenzione su questi corpi solitamente trascurati, certo della validità di una affermazione di Hartmann (1976):

"I corpi minori del sistema solare costituiscono importanti punti di collegamento tra il presente ed il passato".

Volendo, con intento quasi didattico, anticipare i tempi e riassumere subito in modo schematico e con un linguaggio il più semplice possibile gli elementi fondamentali che distinguono tra loro asteroidi, comete e Kuiper-belt objects, si potrebbe farlo con la seguente tabella:

	dove si trovano	di cosa sono fatti
ASTEROIDI	Tra Marte e Giove	Composti carbonacei e silicacei, metalli
COMETE	Nube di Oort e Fascia di Kuiper	Materiali volatili (H ₂ O, CH ₄ , ecc.)
KUIPER-BELT OBJECTS	Tra 30 e 100 U.A.	Ghiaccio e rocce

Come avviene inevitabilmente per tutte le schematizzazioni, anche questa da un lato offre certamente elementi significativi per inquadrare i corpi descritti, ma dall'altro non tiene conto del fatto che è veramente impossibile tracciare un confine netto tra le varie classi.

Le comete e gli asteroidi, nelle loro accezioni più comuni, possiamo pensarli come i rappresentanti estremi di un insieme molto variegato di oggetti celesti, nel quale trovano evidentemente posto anche molteplici corpi che presentano caratteristiche intermedie (basti pensare ai numerosi nuclei di comete ormai "spenti", praticamente indistinguibili da un asteroide).

Dopo queste precisazioni e prima di iniziare una analisi dettagliata, ritengo sia necessario presentare un breve quadro descrittivo della nascita e dell'evoluzione del Sistema Solare: sarà questo il quadro di riferimento nel quale collocare i vari corpi sopra menzionati.

2. L'ORIGINE DEL SISTEMA SOLARE

La teoria ormai accettata circa l'origine e l'evoluzione del Sistema Solare è sostanzialmente (come idea di partenza) quella di Kant (1755) e Laplace (1796): una nube di gas e polveri che, sotto l'azione della gravità, tende a condensarsi.

Bisogna sottolineare il **duplice aspetto** della teoria che deve spiegare la nascita del Sistema Solare: da una parte vi è un **problema astrofisico**, correlato alla formazione della stella Sole da risolvere alla luce delle teorie e dei modelli stellari, e dall'altra parte un **problema planetologico**, da risolvere alla luce dello studio dei meteoriti, dei corpi minori, delle superfici e degli interni dei pianeti. (Coradini et al., 1980).

Appare dunque evidente il fatto che la genesi di un sistema planetario e la sua evoluzione dipendano in modo sostanziale dalle fasi evolutive della stella ad esso associato.

Una osservazione preliminare sull'analisi della evoluzione di un sistema planetario è che siamo in una situazione profondamente diversa e più complicata di quella affrontata nello studio dell'evoluzione stellare.

L'analisi e lo studio dell'evoluzione stellare ha la possibilità di guardare sia nel *passato* sia nel *futuro*: si possono, cioè, osservare stelle in diverse fasi della loro evoluzione ed in tal modo verificare le ipotesi formulate.

Lo studio dell'evoluzione planetaria ha, invece, a disposizione *solo il nostro sistema planetario*, ed in esso, inoltre, è possibile individuare pochi relitti delle epoche passate.

Un dato ormai condiviso da tutti è che il processo di formazione stellare avvenga all'interno delle nubi molecolari giganti (prevalentemente composte da H₂ per decine di migliaia o anche milioni di masse solari a temperature di pochi gradi Kelvin): le parti più dense di queste strutture si suddividono in nubi più ridotte, di massa compresa

tra 0.01 e 100 masse solari, che cominciano a contrarsi per autogravitazione (Lamzin, 1995).

Non è ancora stato identificato con certezza, a questo proposito, il meccanismo che rompe il sostanziale equilibrio della nube e innesca il processo di collasso, anche se è ormai largamente condivisa l'ipotesi di Lin delle "onde di densità" associate alla struttura a spirale della Galassia: la compressione del gas nell'attraversamento dei fronti d'urto è ritenuto il meccanismo responsabile della formazione stellare nelle galassie a spirale (Gratton, 1978).

In ogni caso, con il sopravvento della gravità (fisicamente garantito solo se la massa coinvolta supera il valore critico dato dalla massa di Jeans), la materia "cade" verso il centro della nube in un tempo dell'ordine di 10^5 anni.

Si origina così una protostella: un corpo dotato di luminosità decine di volte superiore a quella solare, la cui presenza può, però, essere rilevata solamente da osservazioni IR.

La radiazione emessa, infatti, viene rapidamente assorbita dall'involucro che ancora circonda la protostella e riemessa nella regione IR dello spettro.

Stando ad un recente lavoro di Mannings ed Emerson (1994), le osservazioni nel dominio millimetrico, oltre che rivelarci stelle nelle fasi iniziali, potrebbero anche darci la prova di un sistema planetario in formazione.

Significativa, a questo proposito, l'evidenza di gusci di polvere circumstellare rilevati dal satellite IRAS:

Stella	α LYR	α PSA	β PIC	ϵ ERI
Tipo stellare	A0	A3	A5	K2
Massa stellare (M_{sol})	2.0	1.75	1.5	0.8
Luminosità (L_{sol})	58	13	6.5	0.37
Distanza (pc)	8.1	7.0	16.6	3.3
T guscio ($^{\circ}$K)	85	55	100	45
Raggio guscio (A.U.)	85	94	20	23
Periodo orbitale (anni)	554	689	73	123

(Da: Weismann, The galaxy and the solar system, 1986, p.234)

Associata alla fase di protostella, infatti, se la materia in caduta è dotata di un moto di rotazione, vi è la formazione di un disco, nel quale gli attriti facilitano lo smaltimento del momento angolare in eccesso e si attiva un processo di aggregazione.

Alcuni attribuiscono proprio all'interazione tra un disco di accrescimento ed il campo magnetico di una protostella tutti i fenomeni tipicamente collegati alle T Tauri, fenomeni che precedenti teorie non erano riusciti a spiegare in toto. (Lamzin, 1995).

Il processo di formazione di un disco sfocerebbe gradualmente nella formazione di varie masse sferiche (**planetesimi**): per giungere a formare oggetti con dimensioni dell'ordine di 1 km si ipotizza un tempo di circa 10^4 anni (Taylor, 1992).

Il gradiente termico giocherebbe in questa fase un ruolo importantissimo concentrando nei corpi più prossimi alla stella i materiali con densità più elevata e relegando in quelli più lontani i materiali volatili.

Il passo successivo può essere identificato con alcuni dei fenomeni osservati nelle stelle di tipo T Tauri: per cause ancora ignote si arresta l'accrescimento di materia sulla protostella e si sviluppa un potente "vento stellare" (con velocità dell'ordine di alcune centinaia di km/sec e portata di miliardi di tonnellate/sec) in grado di spazzare le polveri residue della nebulosa iniziale.

L'origine di questo vento stellare è probabilmente da ricercarsi nella accensione del deuterio, nell'attivazione, cioè, delle reazioni nucleari tipiche delle stelle. (Taylor, 1992).

Lo scenario finale, dunque, è quello di una stella all'inizio della sua evoluzione (fase zero del diagramma H-R o stadio finale dell'evoluzione di pre-sequenza principale) attorno alla quale gravitano dei corpi celesti di dimensioni diverse: tra questi planetesimi inizia un complesso processo di accrezione e collisione nel quale giocano un ruolo fondamentale le perturbazioni gravitazionali dei corpi con massa maggiore.

Sempre tenendo ben presenti le precauzioni già evidenziate allorchè si operino delle schematizzazioni, il processo di formazione del Sistema Solare può essere riassunto nelle seguenti fasi (Taylor, 1992; Hoyle, 1979):

FASE "ZERO"

Inizio addensamento gravitazionale: si parte da una nube interstellare la cui situazione di equilibrio viene perturbata da un fattore esterno.

Oltre l'onda di densità di Lin, una seconda possibile causa che viene ipotizzata per l'origine del Sole e del Sistema Solare è costituita da una vicina esplosione di supernova: si potrebbe così giustificare la presenza di alcuni isotopi la cui sintesi difficilmente potrebbe essere spiegata in altro modo.

Ad ogni buon conto ha inizio il collasso gravitazionale, assicurato dalla presenza di materia in quantità sufficiente a garantire la massa di Jeans.

FASE 1

Collasso della materia della primordiale nebulosa solare (gas e polvere) in un disco rotante (dissipazione di momento angolare).

Ripetuti episodi di condensazione ed evaporazione possono spiegare le inclusioni refrattarie di CAI (*calcio-alluminio intrusion*) rilevate in alcune meteoriti.

FASE 2

Caduta del disco verso il piano mediano della nebulosa in un tempo di 10^4 - 10^6 anni e conseguente formazione di un *denso disco di polveri*.

Si verificano episodi di fusione che coinvolgono metalli e silicati e che possono spiegare la formazione di *condruli*; si tratta di inclusioni sferoidali, tipicamente di circa 0.5-1.5 mm, presenti nei meteoriti condritici e composti in genere da olivina (silicato di Fe e Mg).

FASE 3

Aggregazione delle polveri in planetesimali a seguito di collisioni a bassa velocità.

In questa fase si innesca il *bruciamento dell'H* nel nucleo del proto-Sole ed inizia la fase *T-Tauri* e *FU-Orionis* che ha una durata di circa 10^6 anni.

Ad una distanza di circa 4 U.A. si può situare la *snow-line* (linea immaginaria in corrispondenza della quale avviene la condensazione del ghiaccio d'acqua, fenomeno in grado di incrementare la densità locale della nebulosa planetaria ed innescare il meccanismo di accrezione): i primi stadi della formazione dei pianeti si sono svolti sullo sfondo di una luminosità molto più elevata di quella attuale.

Tutto il gas presente (H, He ed altri) viene rimosso dalla regione interna (vento T-Tauri): rimangono solamente i planetesimi di una certa massa già formati.

La massa originaria della nebulosa è stimabile in almeno 1750 masse terrestri, delle quali circa 1300 costituite da H ed He sono in qualche modo andate perdute.

FASE 4

Nella zona dove il ghiaccio d'acqua diventa stabile (~ 5 U.A.), ha inizio l'*accrezione di Giove* che raccoglie anche parte dei gas espulsi dalla zona interna.

L'accrescimento del nucleo del proto-Giove deve essere avvenuta in un tempo di 10^5 - 10^6 anni ed altrettanto tempo è servito per la sua formazione definitiva; tutto si deve comunque essere svolto prima che il gas venisse completamente dissipato.

Dunque Giove è un vero e proprio pianeta e non una stella mancata e la sua origine è da ricercarsi in meccanismi di accrescimento e non direttamente dal frazionamento della nebulosa originaria.

E' riconducibile a questa fase anche la formazione dei *nuclei di Saturno, Urano e Nettuno*, la cui formazione, però, avviene molto più lentamente.

Saturno impiega un tempo due volte superiore a quello di Giove; a differenza di Giove, inoltre, ha un asse di rotazione inclinato rispetto al piano dell'orbita, indicazione che deve essersi condensato da più corpi di grandezza considerevole.

Urano completa l'accrescimento in circa 10^7 anni; *Nettuno* nel doppio di questo tempo, processo paragonabile come durata a quello della formazione dei pianeti interni.

La formazione di Urano e Nettuno deve quindi essere avvenuta quando ormai buona parte di H ed He erano sfuggiti.

Fernandez e Ip (1983) collocano in questa fase l'origine di planetesimi che, immessi in orbite molto eccentriche dall'azione di Urano e Nettuno, avrebbero poi costituito sia la Nube di Oort sia una sorta di fascia cometaria transnettuniana (seguendo in ciò le teorie avanzate negli anni '50 da Edgeworth e Kuiper).

FASE 5

Formazione dei *pianeti interni*, in tempi di 10^7 - 10^8 anni.

E' ragionevole ipotizzare, tra questi, una situazione "disagiata" per Mercurio e Marte: il primo risente della vicinanza del Sole ed il suo accrescimento si sviluppa in una zona molto povera di materiale; il secondo risente dell'azione di svuotamento esercitata da Giove nella zona della Fascia Principale degli asteroidi.

Tale azione di svuotamento era duplice: da un lato l'acquisizione e l'inglobamento di planetesimi qui sviluppatasi, dall'altro lato la loro espulsione dalla suddetta zona.

FASE 6

Formazione dei *sistemi satellitari* attraverso meccanismi secondari di accrezione o cattura di planetesimi.

Includiamo in questa fase la formazione della Luna attraverso un urto con un corpo di dimensioni paragonabili a quelle di Marte, evento data-bile 4.4 miliardi di anni fa.

Episodi analoghi hanno coinvolto anche altri pianeti: a seguito di un impatto Venere potrebbe aver invertito il senso di rotazione e, sempre per un impatto violento, Mercurio potrebbe essere stato privato del mantello di silicati.

Le collisioni hanno inoltre caratterizzato, e continuano a caratterizzare, l'evoluzione dei corpi della fascia asteroidale.

A 10^8 anni dalla separazione iniziale della nebulosa, il Sistema Solare aveva completato il suo processo formativo.

3. METODOLOGIE OSSERVATIVE DEI CORPI MINORI

La difficoltà di osservazione visuale degli asteroidi è evidentemente legata alle loro ridotte dimensioni angolari, nel migliore dei casi paragonabili con la massima risoluzione degli strumenti ottici disponibili.

Sfuggono, invece, a questa situazione le comete: fin dall'antichità hanno avuto un posto importante tra i fenomeni celesti proprio grazie alla loro eccellente visibilità.

Nel caso degli asteroidi l'**osservazione delle posizioni** ha permesso di determinare i parametri orbitali di molti di essi.

A partire dal 1891, la ricerca di nuovi asteroidi è stata supportata dal **metodo fotografico**, soprattutto grazie all'opera di Max Wolf dell'Osservatorio del Königstuhl di Heidelberg (è di quell'anno la scoperta di 323-Brucia, primo asteroide individuato con tecnica fotografica).

Grazie all'impiego della tecnica fotografica ed al perfezionamento della strumentazione astronomica, l'aumento di scoperte è stato veramente impressionante: prima del 1891 erano noti 322 asteroidi, nel 1977 si era già a quota 2000, il n° 3000 fu scoperto nel 1984 e si è giunti, nel novembre 1991, al n° 5000. (Calanca et al., 1996).

Oggi siamo di fronte ad una nuova rivoluzione tecnologica: l'impulso proveniente dall'**impiego dei C.C.D.** e dall'**analisi computerizzata delle immagini** può essere paragonato a quanto è avvenuto nel secolo scorso con l'avvento dell'emulsione fotografica con, in più, la possibilità di automatizzare la ricerca grazie al blinking operato dal software.

Grande importanza ha l'**osservazione spettroscopica** alla quale è dovuto in gran parte il bagaglio di conoscenze sulla composizione mineralogica dei corpi minori.

Mentre per gli asteroidi si analizza la luce solare riflessa, per le comete a questa si sovrappongono le bande in emissione di molecole e radicali eccitati dalla radiazione solare.

Sempre sfruttando la luce solare riflessa, ricorrendo alle **osservazioni fotometriche** (curve di luce), si è riusciti, nel caso di molti asteroidi, a determinare con precisione importanti parametri fisici come il periodo di rotazione intorno al proprio asse ed avere una stima della loro forma.

Valutazioni plausibili dell'albedo sono possibili con il **metodo radiometrico**; si confronta la luminosità dell'asteroide in luce visibile con quella a lunghezze d'onda infrarosse valutando che un oggetto più scuro assorbe più luce, si riscalda maggiormente e perciò la sua emissione di radiazione termica è maggiore.

Il grande balzo in avanti nelle conoscenze di questi corpi celesti si è avuto con l'introduzione di due nuovi strumenti di indagine: **l'astronomia radar** e l'esplorazione ravvicinata con **sonde spaziali**.

Dalla prima riusciamo ad ottenere informazioni apprezzabilmente corrette della forma e dello stato di rotazione dell'oggetto; la grossa limitazione è costituita dal fatto che l'efficacia di questa tecnica è fortemente dipendente dalla distanza Terra-corpo dal momento che l'eco radar (anche con gli apparati più potenti) fornisce informazioni utili in un range di distanze minori di circa 1 U.A. (interessando dunque soprattutto quegli oggetti che hanno passaggi ravvicinati con la Terra).

Per quanto riguarda l'impiego della tecnologia spaziale, bisogna notare che alle osservazioni satellitari (IRAS, ISO, HST), che hanno l'enorme vantaggio di poter by-passare l'ostacolo costituito dall'atmosfera terrestre, si sono affiancate le straordinarie osservazioni ravvicinate delle sonde.

Sicuramente è ancora vivo il ricordo delle sonde Vega e Giotto destinate a studiare la cometa di Halley (1986) e quello della sonda Galileo (1991) inviata verso il sistema di Giove, nonché i risultati osservativi da esse riportati.

Va ricordato, però, che la prima sonda a dover attraversare la fascia degli asteroidi fu la Pioneer 10, lanciata il 3.3.1972 con destinazione Giove.

Una particolare considerazione merita anche lo studio dei **meteoriti**, fino a 60 anni fa considerati oggetti interstellari, ma oggi collegati a ben precise situazioni dinamiche che portano ad identificare il più importante luogo della loro formazione nella fascia degli asteroidi, anche se vi è l'evidenza di meteoriti provenienti dalla Luna e da Marte ed è inoltre ben noto il ruolo svolto dai nuclei cometari nella formazione dei detriti cosmici.

Si tratta in ogni caso di corpi celesti in grado di fornirci informazioni indirette circa i corpi da cui hanno avuto origine.

<p style="text-align: center;">PARTE PRIMA</p> <p style="text-align: center;">GLI ASTEROIDI</p>

1. NOTA STORICA

La ricerca sistematica di una regola chiara che rendesse ragione delle distanze dei pianeti dal Sole sembrava aver trovato alla fine del secolo XVIII la definitiva risposta nella **legge empirica di Titius-Bode** ($d = 0.4 + 0.3 \times 2^N$ con $N = -\infty ; 0; 1; 2; 3; \dots$) anche grazie alla scoperta di Urano, casualmente identificato da W. Herschel il 13 marzo 1781, la cui distanza rispondeva perfettamente a tale legge.

Questa semplice relazione, formulata da J.D. Titius von Wittenberg (1729-1796) e resa popolare da J.E. Bode (1747-1826), sintetizzava in modo semplice ed elegante le conoscenze raggiunte circa le distanze planetarie.

Si manifestava, però, una inspiegabile lacuna in corrispondenza del valore $N=3$.

La considerazione che godeva la legge di Bode era, però, così alta che, nel 1800 il barone Franz von Zach riunì a Lilienthal un gruppo di sei astronomi (il gruppo era chiamato Himmel Polizei) proprio con l'intento di organizzare una accurata ricerca di questo pianeta mancante.

Quando poi, il 1° gennaio 1801, il Direttore dell'Osservatorio di Palermo (padre G. Piazzi), casualmente, scoprì l'esistenza di un pianeta sconosciuto (Cerere) i cui parametri orbitali gli facevano occupare il posto mancante tra Marte e Giove, i pochi dubbi sulla validità della relazione di Bode sparirono.

Ma per poco.

Nel giro, infatti, di 7 anni furono scoperti altri 3 corpi gravitanti a distanze simili (Pallade, Giunone e Vesta); nel 1868 erano un centinaio e nel 1890 trecento.

Grazie all'impiego delle tecniche fotografiche (doppie esposizioni, lunghe esposizioni oppure confronto tra lastre eseguite in tempi differenti) e delle tecniche digitali è stato possibile aumentare enormemente il numero conosciuto di questi corpi celesti: oggi ne sono noti oltre 30 mila le cui dimensioni variano da poche centinaia di metri a poco meno di 1000 km, ma il loro numero è destinato a salire vertiginosamente.

A tale proposito è significativo un grafico (per i piccoli diametri evidentemente teorico) che mette in relazione il numero di oggetti del Sistema Solare con le rispettive dimensioni (*Figura 1.1*).

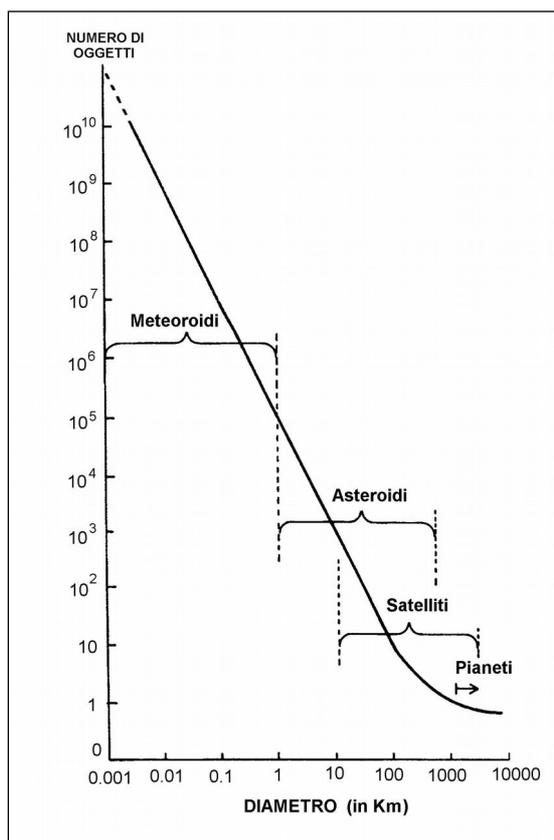


Figura 1.1

Andamento del numero di oggetti del Sistema Solare in funzione delle dimensioni. E' implicita la natura "indicativa" del grafico, soprattutto per quanto concerne le piccole dimensioni.

(Da: Lang - Whitney, Vagabondi nello spazio, p. 206; fig. 7.15)

2. ORIGINE DEGLI ASTEROIDI

Una prima ipotesi circa l'origine degli asteroidi (il termine è dovuto a Herschel, mentre Piazzi preferiva quello di pianetini) fu formulata da Olbers nel 1805, immediatamente dopo la loro scoperta, e può essere definita *ipotesi del pianeta distrutto*; proponeva, infatti, che l'intera fascia fosse stata generata dalla distruzione di un grosso pianeta causata da un impatto catastrofico con un altro corpo planetario.

Tale ipotesi riceveva forza anche dalla dimostrazione fatta da Chladni dell'origine extraterrestre delle meteoriti, identificate proprio come i resti di quell'impatto.

E' comunque molto difficile ipotizzare questo evento estremamente energetico senza mettere in conto il suo possibile pesante influsso sui pianeti più vicini, ed in tal senso appare veramente inspiegabile la "tranquillità" del sistema satellitare di Giove.

Scartata dunque l'idea di Olbers, come spiegare la mancanza di materiale nella fascia degli asteroidi ($10^{-3} M_T$)?

Una risposta ragionevole la attribuisce alla anteriore formazione di Giove, mentre viene scartata l'idea di una discontinuità nella nebulosa originaria; la massa iniziale si presume fosse poche volte quella attuale, ed è stata così ridotta proprio a seguito del meccanismo di espulsione innescato dalla primitiva formazione di Giove (Taylor, 1992).

Attualmente l'ipotesi prevalente è pertanto quella di un pianeta *che non ha potuto formarsi* a causa dell'azione gravitazionale di Giove.

La nebulosa originaria era, come già detto, caratterizzata da una graduale diminuzione della temperatura all'aumentare della distanza dal Sole, ed è evidente che nella regione di Giove ci fosse certamente maggiore disponibilità di "nuclei di aggregazione" data la maggiore abbondanza di sostanze volatili presenti allo stato solido (*snow line*); più in generale si può ipotizzare che la formazione dei planetesimi sia avvenuta con ritmi diversi a differenti distanze dal Sole (Taylor, 1992).

Questo significa che il processo di aggregazione di Giove era certamente più avanzato che non quello dei pianeti più interni (costituiti da materiali rocciosi) e di conseguenza era presente in modo determinante il suo influsso gravitazionale quando le fasi di costruzione dei pianeti più interni erano solo all'inizio.

Il tempo di accrezione di Giove viene stimato in 10^5 anni (Ward, 1989), mentre quello dei pianeti interni in 10^7 - 10^8 anni (Taylor, 1992).

La rapida formazione del massiccio Giove, seguito da Saturno, avrebbe generato regioni di risonanza (Torbett et al., 1982) che, modificando gli elementi orbitali dei planetesimi presenti in quelle zone, avrebbero arrestato la fase di accrezione di un unico corpo nella regione della attuale fascia asteroidale (Taylor, 1992) innescando nel contempo un processo collisionale tutt'ora in corso (Farinella, 1988).

Il ruolo di Giove e delle sue perturbazioni gravitazionali fu evidenziato fin dal 1866: risale a quell'epoca infatti la scoperta, da parte di D. Kirkwood, di vuoti (*Figura 1.2*) nella distribuzione dei semiassi maggiori delle orbite degli asteroidi.

Confrontando i periodi corrispondenti a queste lacune con il periodo di Giove, Kirkwood ipotizzò la presenza di effetti di risonanza tra le orbite: tali effetti produrrebbero a lungo andare sostanziali modificazioni dell'orbita originaria.

Tale ipotesi venne ripresa e approfondita negli anni '80, periodo caratterizzato anche da un notevole aumento di interesse intorno alle problematiche legate allo studio degli asteroidi, fino ad allora considerati in modo abbastanza marginale.

La necessità di inglobare nelle teorie dinamiche anche l'analisi degli asteroidi di tipo Amor-Aten-Apollo caratterizzati da orbite particolarmente eccentriche spinse ad approfondire i meccanismi responsabili dell'evoluzione orbitale e, al primo posto tra questi, proprio i fenomeni di risonanza.

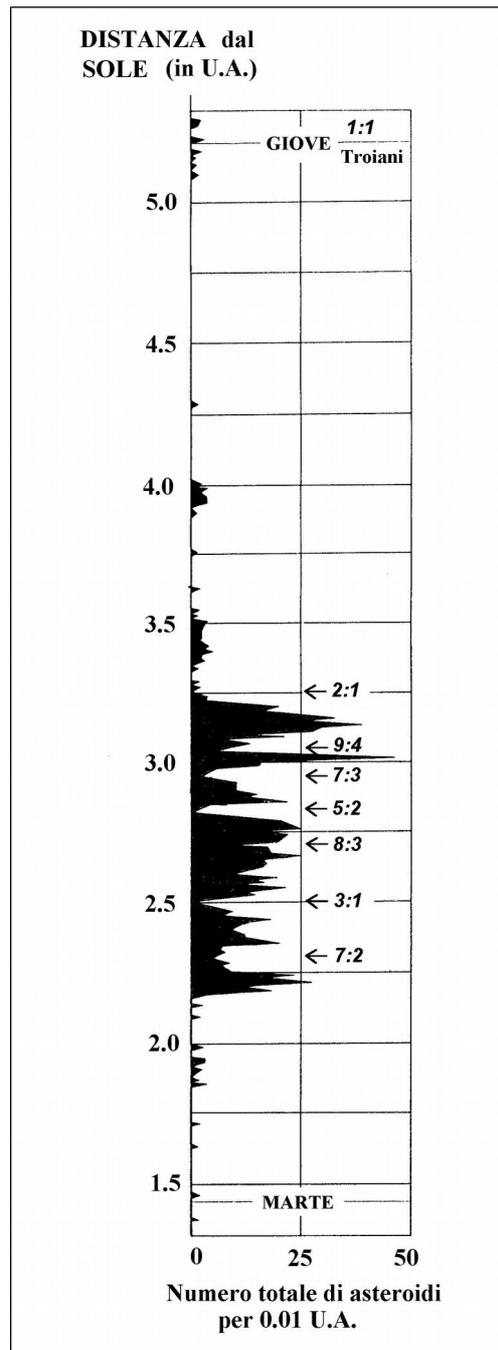


Figura 1.2

Le principali lacune di Kirkwood (evidenziate dalle frecce).

A fianco di ciascuna è riportata la corrispondente risonanza con Giove.

(Da: Hartmann - I corpi minori del Sistema Solare - Letture da Le Scienze "Il Sistema Solare nelle esplorazioni spaziali", p.262)

Con il termine risonanza si intende quella situazione dinamica in cui le configurazioni delle orbite di due corpi celesti si ripetono periodicamente nel tempo.

Il risultato dinamico prodotto dai fenomeni di risonanza non è univoco, ma si può manifestare sia come stabilizzatore nel tempo della configurazione, sia come causa di oscillazioni periodiche dei parametri orbitali, ma può anche sfociare in variazioni improvvise ed imprevedibili dei suddetti parametri.

Seguendo un asteroide prossimo ad una zona di risonanza si è potuto constatare come la sua orbita, stabile per molte migliaia di anni, venga improvvisamente ed imprevedibilmente modificata fino a portarla ad incrociare quella di Marte o della Terra contribuendo in questo modo ad aumentare una delle lacune di Kirkwood e l'eventualità di una collisione.

Fondamentalmente si distinguono due tipologie di risonanza:

1. risonanza di moto medio, che ha nel fenomeno delle lacune evidenziato dall'analisi di Kirkwood, e riconducibili all'azione di Giove, l'esempio più eclatante.

I risultati dell'azione di queste risonanze sono contrastanti e talvolta discordano con la situazione analizzata attraverso simulazioni al calcolatore.

Per la risonanza 2:1, ad esempio, le simulazioni numeriche non prevedono meccanismi di espulsione efficienti, mentre in realtà si osserva una larga lacuna e questo spinge a dover ipotizzare meccanismi dinamici (o sovrapposizione di più effetti) per i quali i tempi caratteristici siano decine o forse centinaia di milioni di anni (Farinella, 1993).

2. risonanze secolari, consistenti nel fatto che i due corpi risonanti sono caratterizzati da uguale periodo nelle variazioni dell'orbita nello spazio, vale a dire la precessione del piano orbitale e la precessione della direzione del perielio.

I tempi caratteristici degli effetti indotti da queste risonanze sono valutabili in milioni di anni, ma hanno una efficienza confrontabile con quella delle risonanze di moto medio.

Un notevole passo in avanti nella comprensione del fenomeno delle risonanze si è avuto con l'introduzione delle simulazioni computerizzate, ma non sempre si riesce a ricostruire in modo completo le leggi che governano le zone di risonanza anche se la simulazione, grazie all'aumentata rapidità e capacità di calcolo consentita dai computer più recenti, può essere valutata su periodi di centinaia di migliaia di anni.

Il problema di fondo è la sovrapposizione, spesso in modo caotico, di molte risonanze differenti con risultati altamente imprevedibili.

E' in ogni caso innegabile il ruolo di rimescolamento orbitale generato da questi fenomeni, con il conseguente incremento dei fenomeni collisionali non solo tra la popolazione asteroidale, ma anche con corpi di maggiori dimensioni quali i pianeti ed i satelliti.

Un ambito nel quale la conoscenza profonda di questi meccanismi dinamici riveste un ruolo basilare è la ricostruzione delle famiglie dinamiche, argomento che verrà più avanti approfondito.

La rimozione degli effetti imputabili all'azione risonante dei pianeti oltre che al loro influsso gravitazionale diretto costituisce il punto di partenza per la determinazione dei parametri orbitali non perturbati sui quali si fonda l'identificazione delle famiglie.

Ma il risultato di un evento catastrofico, al quale è certamente riconducibile la formazione di una famiglia dinamica, non consta soltanto dei corpi di dimensioni maggiori, anche se è evidente che essi costituiscono gli indizi più eclatanti (e talvolta unici) per ricostruire l'accaduto; è più che ragionevole, infatti, ipotizzare anche la produzione di detriti di ogni dimensione, che l'osservazione non riuscirà mai ad identificare, lanciati con notevoli velocità lontano dal luogo dell'impatto e destinati anch'essi ad essere governati dai meccanismi delle risonanze.

Provando che una famiglia possa essere in grado, per la posizione spaziale nella quale è avvenuto l'impatto o per la particolare energia da

esso liberata, di lanciare questi detriti in una risonanza (si parla in questo caso di **immissione diretta**) oppure che quest'ultima li assorba gradatamente (meccanismo denominato **cattura adiabatica**), si può giungere a spiegare il flusso di materiale meteorico nelle regioni più interne del Sistema Solare (Morbidelli et al., 1995).

In alcuni casi è stato possibile ricondurre un evento meteorico alla famiglia dinamica con la quale sarebbe accomunato: è il caso delle eucriti riconducibili alla famiglia dinamica di Vesta (Taylor, 1992) e delle condriti ordinarie per le quali si è proposto uno strettissimo legame con la famiglia dinamica di Maria (Zappalà et al., 1996).

3. IL RUOLO DEGLI IMPATTI

Già si è avuto modo di evidenziare la presenza e l'importanza delle collisioni quale meccanismo fondamentale per l'accrescimento dei planetesimi fin dalle prime fasi della formazione dei pianeti, ed è ragionevole ipotizzare il permanere di tale meccanismo anche dopo che i corpi maggiori si erano completamente formati.

Anche la stessa obliquità dei Pianeti è consistente con la collisione di corpi molto grandi; se i Pianeti si fossero formati per accrescimento dal disco di polveri oppure solo da piccoli oggetti, la loro rotazione sarebbe normale al piano dell'eclittica in assenza di oggetti grandi che potrebbero turbare l'assestamento mareale.

Si può pertanto ragionevolmente sostenere che proprio essa costituisca la migliore evidenza dei fenomeni collisionali che hanno caratterizzato la fase di accrescimento planetario.

Con l'impatto, oltre alle obliquità planetarie, si può spiegare (Taylor, 1992):

A. la provenienza dell'energia necessaria alla fusione dei pianeti di tipo terrestre con la separazione del nucleo e del mantello;

B. la superficie fortemente craterizzata di quasi tutti i pianeti e satelliti;

C. l'elevato rapporto ferro/silicati di Mercurio, causato dall'espulsione del mantello di silicati a seguito di un impatto con un oggetto di 0.2 masse mercuriane;

D. l'origine della Luna, imputabile all'impatto con un oggetto di 0.15 masse terrestri, così come la sua composizione chimica e l'elevato momento angolare del sistema Terra-Luna.

Come già detto, i fenomeni di tipo collisionale non possono non aver interessato anche la fascia asteroidale, anzi, l'azione gravitazionale di Giove ed il caos dinamico indotto hanno comportato senza dubbio un incremento degli episodi di impatto tra i planetesimi che, per la loro vi-

cinanza, risentivano maggiormente dell'influenza del pianeta gigante.

Volendo analizzare i meccanismi ed i parametri fisici coinvolti in un impatto tra oggetti delle dimensioni di un asteroide, ci si imbatte in notevoli difficoltà legate soprattutto all'enorme quantità di parametri da gestire, ed è pertanto indispensabile cercare di acquisire informazioni attraverso la realizzazione e lo studio di esperimenti di impatto effettuati in laboratorio.

L'applicabilità, poi, delle informazioni raccolte al caso specifico degli asteroidi è resa comunque problematica da due fattori:

1. bisogna estrapolare i risultati sperimentali ed applicarli ad oggetti di massa di 15-20 ordini di grandezza maggiore;

2. non possono essere trascurati gli effetti gravitazionali, che, nel caso degli asteroidi, diventano molto importanti per i residui dell'impatto.

Appare comunque consolidato il fatto che i parametri fondamentali per uno studio del meccanismo delle collisioni sono l'energia cinetica del "proiettile" (E) e la massa del "bersaglio" (M).

In base a questi parametri vengono solitamente distinti 4 casi (Ceroni, 1986; Fujiwara, 1986):

1. *CRATERIZZAZIONE* ($E/M < 10^6$ erg/g): si verifica un "danno" solo superficiale (è l'effetto riscontrabile sulla superficie di tutti i pianeti interni e dei loro satelliti nonché di tutti gli asteroidi dei quali si è potuto avere una serie di immagini ravvicinate).

2. *ZONA DI TRANSIZIONE* ($E/M < 10^7$ erg/g): oltre alla formazione di un cratere si verifica anche una parziale asportazione di materiale dal bersaglio (in quantità dipendenti dal contenuto energetico dell'urto).

3. *DISTRUZIONE PROFONDA o CORE-TYPE* ($E/M < 10^8$ erg/g): viene lasciata intatta soltanto la zona più interna del bersaglio.

4. *DISTRUZIONE TOTALE* ($E/M > 10^8$ erg/g): il bersaglio viene completamente frantumato dalla collisione.

L'osservazione fisica degli asteroidi mostra esempi riconducibili a tutti questi casi.

Se fino a qualche anno fa la craterizzazione era dimostrabile solo per le superfici dei corpi maggiori, l'analisi ravvicinata di alcuni asteroidi e satelliti ha mostrato senz'ombra di dubbio la presenza (talvolta massiccia) dei segni provocati dagli impatti.

L'analisi spettroscopica degli asteroidi fornisce spesso indicazioni che permettono di suggerire che un corpo costituisce ciò che rimane della parte più interna di un asteroide originario frantumato da un urto.

L'idea, suggerita anche dall'analisi delle forme, che molti asteroidi possano essere caratterizzati da una struttura a mucchio di detriti (*rubble pile*) è riconducibile ad un meccanismo di riaccumulazione gravitazionale del materiale prodotto da un urto catastrofico.

E' comunque evidente che il caso statisticamente più frequente è l'impatto tra due oggetti molto differenti tra loro come dimensioni, urto che si traduce praticamente in un incremento della craterizzazione dell'oggetto maggiore.

Esaminando più da vicino, seppure in modo schematico, il meccanismo che porta alla formazione di un cratere, possiamo distinguere tre fasi:

1. **COMPRESSIONE:** si genera un sistema di onde d'urto che trasferiscono energia cinetica dal proiettile al bersaglio; praticamente vengono prodotti due fronti d'urto (bersaglio e proiettile).

2. **ESCAVAZIONE:** il proiettile tenta di procedere nel bersaglio lungo la sua traiettoria primitiva; la resistenza incontrata provoca deformazione, rottura e, successivamente, vaporizzazione dei materiali.

Per gli impatti meteorici questa fase viene stimato avvenga in un tempo che va da un millesimo ad un decimo di secondo (Coradini, 1980).

3. MODIFICAZIONE: la struttura del bordo frana causando un parziale riempimento; sono ugualmente possibili assestamenti isostatici della zona centrale dell'impatto con la formazione di un rilievo ed il riempimento del cratere con materiale di diversa natura.

Un ruolo importantissimo lo giocano la geometria dell'impatto e la composizione chimica dei corpi che collidono.

E' importante infine evidenziare che non viene liberata solo energia meccanica, ma anche una grande quantità di energia termica.

Da misurazioni eseguite durante esplosioni nucleari si è potuto accertare che l'energia dell'onda d'urto dell'esplosione si trasforma per circa il 30% in calore (Coradini, 1980).

Un impatto, dunque, non provoca solamente una variazione della geometria superficiale, ma pesanti influssi di tipo termico (tanto più importanti quanto più sono numerosi gli eventi impattivi) e di tipo dinamico per quanto riguarda i mutamenti indotti nei movimenti del pianeta-bersaglio.

Un problema, infatti, che si è subito presentato nell'applicazione dei modelli di impatto agli asteroidi era quello di rendere ragione dell'esistenza di curve di luce periodiche (indice di un periodo di rotazione determinato e regolare) con l'evidente possibilità che l'urto inducesse nel bersaglio un moto di precessione libera, indicando con tale termine una rotazione che non avviene intorno ad uno degli assi principali d'inerzia del corpo.

Per tale moto irregolare è stato talvolta impiegato il termine non propriamente corretto, ma estremamente significativo, di rotazione "ubriaca".

Il problema di fondo era quello di valutare quanto tempo occorresse affinché la rotazione abbandonasse tale stato irregolare e si stabilizzasse in una rotazione regolare.

Una prima risposta (Burns e Safronov, 1973) prevedeva che la regolarizzazione della rotazione avvenisse in tempi compresi tra 100 mila e

100 milioni di anni, dunque piuttosto brevi se paragonati all'età del Sistema Solare o comunque alla frequenza di collisioni sufficientemente violente.

Alla fine del 1992, dopo l'intensa campagna osservativa mirata a 4179 Toutatis (un asteroide Earth-crossing in posizione favorevole) apparve evidente la sua rotazione non regolare e questo fatto in qualche modo costrinse ad approfondire il lavoro di Burns e Safronov.

Harris (1994) verificò come la regolarizzazione del moto, definito per la sua complessità un "ruzzolare" nello spazio, dipendesse strettamente sia dalle dimensioni che dal periodo di rotazione e talvolta potesse richiedere tempi più lunghi dell'età del Sistema Solare.

Mettendo in un grafico (**Figura 1.3**) questi valori per gli asteroidi di cui è stata finora osservata la curva di luce e tracciando i confini tra regioni del piano in cui ci si deve aspettare tempi di "regolarizzazione" differenti (linee diagonali) si può notare come quasi tutti gli asteroidi siano compresi nella regione caratterizzata da tempi più bassi, confermando in tal modo le prime valutazioni di Burns e Safronov.

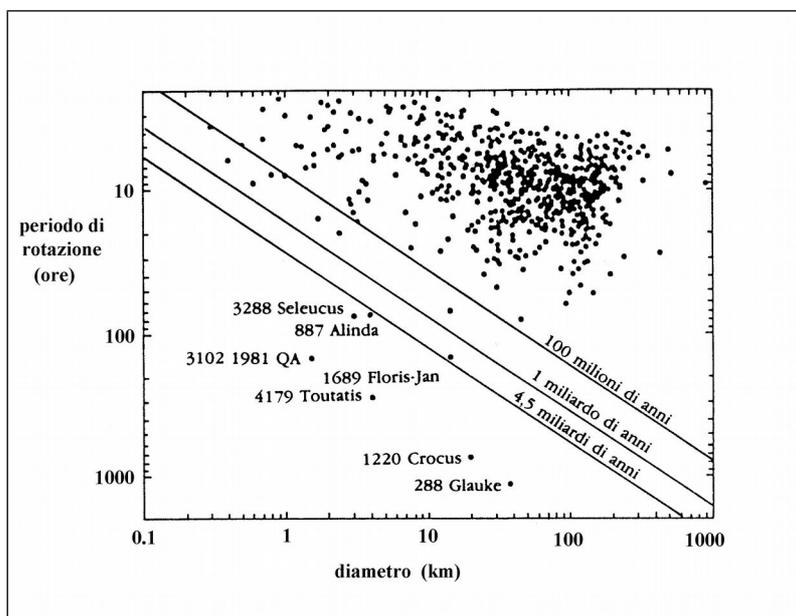


Figura 1.3

Diagramma rotazione/diametro per 632 asteroidi.

(Adattata da: Harris, *Icarus*, **107**, p.210, fig.1; 1994)

Osservando però sul grafico la posizione di 4179 Toutatis e di altri asteroidi si può subito notare come i tempi necessari agli attriti interni di questi corpi per assumere una rotazione regolare sono effettivamente molto più lunghi dell'età del Sistema Solare.

Bisogna comunque sottolineare che, anche se nella fascia asteroidale i fenomeni di collisione sono stati più intensi di quelli verificatisi in altre zone del Sistema Solare, la presenza di una crosta basaltica quale costituente della superficie di Vesta può essere considerata una chiara indicazione che gli impatti subiti da questo corpo (uno dei quali, particolarmente violento, ha originato una famiglia dinamica ed è ritenuto l'origine della tipologia meteoritica delle eucriti) non sono stati così frequenti da modificare in modo drastico la sua superficie, databile circa 4.5 miliardi di anni (Chapman, 1986; Taylor, 1992).

D'altra parte i crateri da impatto, vere e proprie cicatrici lasciate dall'evento, non sono una peculiarità degli asteroidi, ma sono agevolmente identificabili anche con una analisi sommaria delle superfici della Luna e dei pianeti a noi più prossimi; il discorso è valido anche per la Terra, anche se tale evidenza è certamente meno marcata, ma questo argomento sarà oggetto di un approfondimento successivo.

E' opportuno, in ogni caso, evidenziare come non si possa correttamente impostare un discorso relativo agli impatti ed al loro ruolo (anche evolutivo) per la popolazione asteroidale limitandosi unicamente al fenomeno della craterizzazione.

Assumono infatti importanza cruciale anche gli eventi più energetici: le immagini di Gaspra e Ida mostrano che questi corpi sono morfologicamente simili a grossi detriti, ed alla stessa conclusione portano gli studi dei profili di Eros, Toutatis e di moltissimi altri asteroidi.

Da ciò deriva la necessità di prendere in considerazione le conseguenze degli impatti più energetici, riconducendo ad essi la formazione delle famiglie dinamiche.

4. FAMIGLIE DINAMICHE

Dato per acquisito il fatto che i meccanismi di collisione sono stati determinanti per l'evoluzione fisica e dinamica degli asteroidi, è logico ipotizzare la possibilità di identificare, attraverso analisi dinamiche, quali corpi si possano essere formati in seguito ad un impatto, ricostruendo in tal modo vere e proprie famiglie di oggetti riconducibili ad una origine comune.

L'ipotesi di fondo è che tali oggetti possano essere riconosciuti grazie al fatto di presentare elementi orbitali molto simili proprio in forza del comune luogo di formazione.

Tale ipotesi fu in qualche modo verificata già nel 1918 dal giapponese Hirayama, il quale, diagrammando le caratteristiche orbitali (semiasse, eccentricità e inclinazione) degli asteroidi, notò l'esistenza di ben definiti addensamenti di oggetti, e questa situazione lo portò ad introdurre il concetto di **famiglie dinamiche** (*Figura 1.4*).

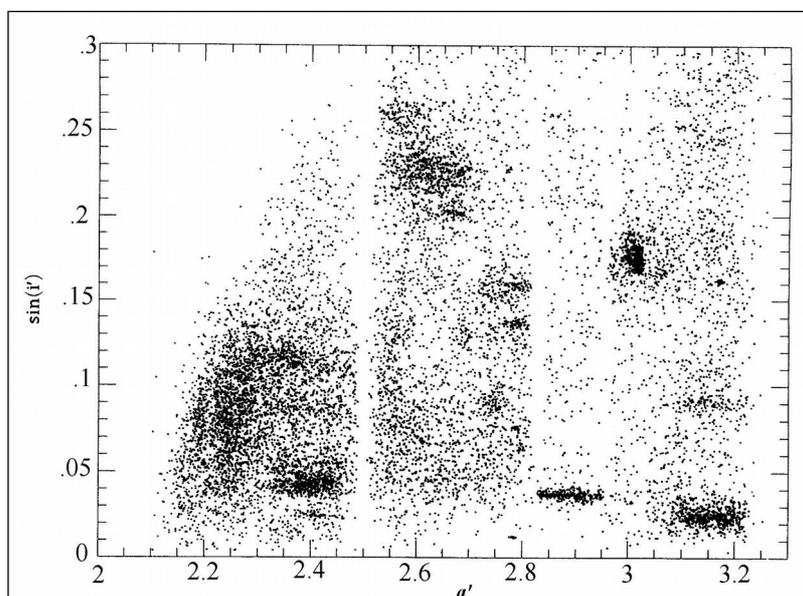


Figura 1.4

Diagramma $\sin i'$ - a' per oltre 12000 asteroidi.

Sono evidenti gli addensamenti corrispondenti alle principali (e più popolose) famiglie dinamiche. Si possono individuare anche le lacune corrispondenti a zone di risonanza.

(Da: Zappalà e Cellino, Asteroid Families, 1993)

In sostanza si tratta di oggetti non fisicamente vicini nello spazio, ma caratterizzati da parametri orbitali originari (detti *elementi propri*) molto simili, e ciò viene collegato ad un'origine comune; di alcune di queste famiglie è anche stata tentata una probabile ricostruzione (*Figure 1.5 e 1.6*).

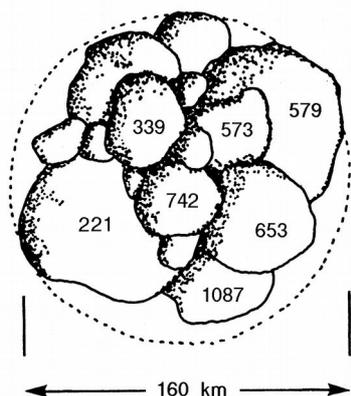


Figura 1.5

Parziale ricostruzione della famiglia di Eos; in essa si riconoscono: 221 Eos, 339 Dorothea e 653 Berenike.

(Da: Lang - Whitney, *Vagabondi nello spazio*, 1994)

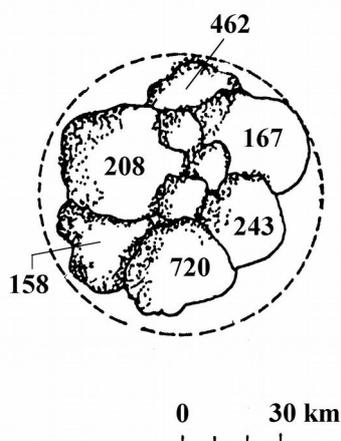


Figura 1.6

Parziale ricostruzione della famiglia di Koronis; in essa si riconoscono: 158 Koronis, 167 Urda, 208 Lacrimosa, 243 Ida, 462 Eriphyla e 720 Bohlina.

(Da: Lamberti, *l'Astronomia*, **138**, 6; 1993)

Il termine famiglia ha in sè 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 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 gli asteroidi per i quali coincidono le analisi fisiche e quelle dinamiche.

Indirizzando la nostra attenzione sulla classificazione dinamica, possiamo rilevare che la determinazione del numero delle famiglie e l'identificazione degli asteroidi ad esse appartenenti è un problema affrontato, dopo Hirayama, da molti ricercatori con differenti risultati.

Dall'introduzione del concetto di famiglia dinamica fino all'inizio degli anni '80 sono state introdotte sette classificazioni.

Alcune caratteristiche sono riassunte nella seguente tabella:

Autore	Anno	N. oggetti	N. famiglie
Hirayama	1918/1933	1223	9
Brouwer	1951	1563	18
Arnold	1969	1735	37
Lindblad e Southworth	1971	1735	
Carusi e Massaro	1978	1861	10
Kozai	1979	2125	72
Williams	1979	1796	104

(Adattata da: Carusi, Valsecchi, *Astron. Astrophys.*, **115**, 332, table 8; 1982)

Le differenze tra queste classificazioni vengono analizzate da Carusi e Valsecchi (1982) e ricondotte a 5 possibili fattori:

1. metodo utilizzato per il calcolo degli **elementi propri**; con questo termine si intendono i parametri orbitali calcolati rimuovendo gli effetti delle perturbazioni indotte dai pianeti (effetti gravitazionali e di risonanza).

2. criterio di **accettazione degli oggetti** da classificare.

3. dimensioni numeriche del **campione a disposizione**.

4. metodi utilizzati per l'**identificazione** delle varie famiglie.

5. criterio di **esclusione o accettazione** dei singoli asteroidi come membri di una famiglia (evidentemente legato strettamente al metodo di identificazione utilizzato).

Dal lavoro citato emerge un sostanziale accordo su quelle famiglie che, usando il termine nel senso più stretto, possono essere definite *famiglie di Hirayama*, vale a dire: Themis, Eos, Koronis, Maria (ex Egeria) e Flora.

Ad esse si possono affiancare Phocaea e Nysa, non considerate da Hirayama, ma identificate dagli altri ricercatori.

Riguardo alle altre famiglie emerge un quadro molto variegato nel quale per alcuni casi si possono notare sostanziali accordi, mentre per altri esistono anche notevoli diversità tra le classificazioni.

Un aumento di interesse e di motivazione si è avuto verso la fine degli anni 80.

Ad esso hanno contribuito molti fattori, ma forse quelli decisivi possono essere identificati (Zappalà et al., 1990) con:

1. approfondimento degli studi dinamici sulle orbite degli asteroidi, soprattutto per quanto riguarda i meccanismi di risonanza, e dunque maggiore affidabilità nella determinazione degli elementi propri;

2. aumento notevole delle informazioni sulle tipologie tassonomiche e sui dati fisici (dimensioni, profili, ...) degli asteroidi, e dunque possibilità di approfondire le analisi sulle singole famiglie;

3. nuovi modelli collisionali in grado di offrire una controparte teorica alla situazione descritta attraverso le famiglie dinamiche, ormai accettate come risultato di impatti asteroidali molto violenti.

Una fondamentale innovazione è stata l'introduzione dell'idea che si potesse realizzare una classificazione di famiglie dinamiche per mezzo

di procedure interamente automatiche, dunque basate su criteri oggettivi.

Uno di questi metodi (Zappalà et al., 1990) è chiamato *hierarchical clustering* e consiste (in una descrizione sommaria) nell'applicazione dei seguenti passi:

1. i dati di riferimento utilizzati sono gli elementi propri (a' , e' , $\sin i'$) del campione di asteroidi preso in considerazione;

2. viene definita, nello spazio tridimensionale degli elementi propri, una metrica che consenta di determinare le distanze tra gli elementi di questo spazio;

3. si determinano i raggruppamenti esistenti calcolando le mutue distanze (δv) tra gli elementi dello spazio, ed in base a queste si costruisce un diagramma a stalattite (δv -N);

4. si deve a questo punto individuare quale raggruppamento costituisca una possibile famiglia dinamica e quale, invece, sia frutto di un addensamento casuale; in altre parole si tratta di determinare quale sia il valore di soglia al quale "tagliare la stalattite".

Naturalmete quest'ultimo passo non è frutto di scelte arbitrarie, ma proviene dall'introduzione di una popolazione asteroidale fittizia (e casuale) la cui distribuzione fornisce i valori di soglia cercati.

L'introduzione di criteri oggettivi nella determinazione delle famiglie dinamiche ha comportato un'ulteriore crescita di interesse e nuovi studi.

Molto importante l'analisi (Zappalà et al., 1995) effettuata su una popolazione di 12487 asteroidi attraverso due differenti tecniche di clustering (*hierarchical clustering* e *wavelet analysis*, quest'ultimo basato sul concetto di densità nello spazio degli elementi propri) i cui risultati sono poi stati comparati.

Per fare il punto sulla attuale situazione in merito alle conoscenze relative alle famiglie dinamiche, ritengo sia fondamentale riportare proprio i risultati ottenuti nello studio appena citato.

Gli asteroidi del campione considerato (7871 dei quali non hanno numerazione) sono stati suddivisi in tre gruppi in base alla posizione occupata nella Fascia Principale; le caratteristiche di questa suddivisione possono essere riassunte in questo schema:

	ZONA INTERNA	ZONA INTERMEDIA	ZONA ESTERNA
a_{\min} (UA)	2.065	2.501	2.825
a_{\max} (UA)	2.501	2.825	3.278
N_{TOT}	5451	3711	3325
N_{NUM}	1691	1274	1651

(Adattata da: Zappalà et al., *ICARUS*, **116**, p.293 tav.I; 1995)

Le tabelle seguenti riassumono, per ciascuna zona, la situazione delle famiglie identificate come tali **da ambedue i metodi** di clustering.

In ogni tabella viene riportato il **nome** identificativo di ciascuna famiglia (a volte differisce tra i due metodi), il **numero di oggetti** individuato come appartenente alla famiglia da ciascuna delle due tecniche (HCM = hierarchical clustering method, WAM = wavelet analysis method) ed infine il numero di **oggetti comuni** ai due gruppi.

TABELLA I - Zona Interna

Id (HCM)	N HCM	Id (WAM)	N WAM	N COM
8 Flora	604	43 Ariadne	575	434
44 Nysa	381	35 Hertha	374	300
4 Vesta	231	4 Vesta	242	187
20 Massalia	49	20 Massalia	45	33
163 Erigone	45	163 Erigone	49	42

(Adattata da: Zappalà et al. - *ICARUS*, **116**, p.310, table VIII; 1995)

TABELLA II - Zona Intermedia

Id (HCM)	N HCM	Id (WAM)	N WAM	N COM
15 Eunomia	439	15 Eunomia	303	298
1 Ceres	89	93 Minerva	88	84
170 Maria	77	170 Maria	83	74
668 Dora	77	668 Dora	79	75
145 Adeona	63	145 Adeona	67	61
125 Liberatrix	44	847 Agnia	74	35
110 Lydia	26	110 Lydia	50	26
808 Merxia	26	808 Merxia	29	26
569 Misa	25	569 Misa	27	23
1726 Hoffmeister	22	110 Lydia	50	15
1726 Hoffmeister	22	272 Antonia	12	7
2085 Henan	22	847 Agnia	74	19
410 Chloris	21	410 Chloris	27	21
1644 Rafita	21	1644 Rafita	23	21
128 Nemesis	20	58 Concordia	38	20
1128 Astrid	10	1128 Astrid	11	10
1639 Bower	10	342 Endymion	15	10

(Adattata da: Zappalà et al. - *ICARUS*, **116**, p.311, table IX; 1995)

TABELLA III - Zona Esterna

Id (HCM)	N HCM	Id (WAM)	N WAM	N COM
24 Themis	550	24 Themis	517	491
221 Eos	477	221 Eos	482	444
158 Koronis	325	158 Koronis	299	289
10 Hygiea	103	10 Hygiea	175	97
490 Veritas	22	92 Undina	36	22
137 Meliboea	13	137 Meliboea	16	13
1298 Nocturna	18	10 Hygiea	175	18
293 Brasilia	10	293 Brasilia	18	10

(Adattata da: Zappalà et al. - *ICARUS*, **116**, p.312, table X; 1995)

Si può notare un sostanziale accordo tra i due metodi, almeno per quanto riguarda le famiglie più numerose ed importanti, ma sono evidenti anche notevoli differenze (piccoli gruppi identificati come famiglie da un metodo e non classificati in modo così sicuro con l'altro, raggruppamenti confinanti riuniti da una tecnica e non dall'altra, ...).

Queste differenze non fanno che confermare come non sia possibile stilare una lista delle famiglie limitandosi ad impiegare le analisi dei soli parametri dinamici, ma queste devono essere sostenute e avvalorate da altre indagini (spettrofotometria, dimensioni, albedo, ecc.), cioè si deve confermare una omogeneità di parametri fisici che possano testimoniare l'origine comune.

In questa direzione si può collocare la recente survey spettroscopica dei piccoli asteroidi della Fascia Principale (Xu et al., 1995) che non solo ha chiaramente mostrato per alcune famiglie l'omogeneità tassonomica degli asteroidi ad esse appartenenti, ma ha anche evidenziato, per altre, una notevole varietà di tipologie.

Questa conclusione, se da un lato sottolinea una volta di più la problematicità talvolta presente nell'identificazione delle famiglie, dall'altro rende merito, se ancora fosse necessario, alla felice intuizione di Hirayama.

Emerge inoltre la fondamentale e pressante esigenza di costruire modelli evolutivi teorici che siano in grado di fornire situazioni dinamiche in linea con le attuali conoscenze della distribuzione spaziale e dimensionale degli asteroidi.

5. CLASSIFICAZIONE

La suddivisione degli asteroidi in classi tassonomiche si basa sulla presenza o assenza nel loro spettro di bande di assorbimento, segni indicatori delle caratteristiche mineralogiche degli asteroidi.

L'intuizione che si potesse operare una distinzione tra gli asteroidi in base alle caratteristiche spettrali è da attribuire, nel 1929, a Bobrovnikoff del Lick Observatory il cui intento era quello di poter operare un confronto tra gli asteroidi e le meteoriti, seguendo in ciò l'idea, da sempre presente nello studio di questi corpi, che le due classi di oggetti celesti fossero intimamente collegate.

Vi erano però grosse difficoltà nella corretta associazione tra meteoriti ed asteroidi e provenivano sostanzialmente da due cause: anzitutto l'inevitabile alterazione chimica dei meteoriti, indotta dallo shock termico conseguente all'interazione con l'atmosfera, fatto che 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 (Chapman, 1975).

Solo negli anni '50 furono iniziate, da Kuiper e Gehrels, misurazioni di fotometria fotoelettrica di alta qualità usando lo standard UBV; i risultati ottenuti consentivano di poter operare una prima grossolana differenziazione in due gruppi diversi: uno nel quale i colori erano rossastri e la luminosità assoluta relativamente elevata e l'altro in cui i colori più neutri si accompagnavano ad una luminosità inferiore.

Le differenze di colore venivano così interpretate come indice di una diversa composizione delle superfici, ipotizzando per i primi una struttura superficiale composta in prevalenza da silicati e metalli, mentre le superfici di quelli più scuri dovevano essere ricche di materiale carbonaceo opaco.

A partire dagli anni '70 si è verificato un notevole incremento d'interesse nel mondo scientifico per gli asteroidi, e questo ha portato notevoli e proficue ripercussioni anche sull'aspetto dell'analisi spettroscopica di questi corpi.

Il perfezionamento degli strumenti di osservazione rendeva inoltre possibile la registrazione simultanea di più regioni dello spettro (senza dunque dover ricorrere a rilevazioni in tempi differenti), con l'enorme vantaggio di ottenere misure insensibili alle inevitabili variazioni di flusso imputabili alla rotazione di un oggetto di forma irregolare.

Anche nel campo della rilevazione spettrale è stato cruciale l'avvento dei CCD, l'impiego dei quali ha consentito di spingere l'osservazione fino a corpi della fascia principale con diametro dell'ordine del km (Burbine e Binzel, 1993).

Grazie all'aumento di interesse della comunità scientifica per gli asteroidi, anche la differenziazione in classi è stata oggetto di ricerche e di approfondimenti.

La tassonomia attualmente considerata più degna di nota è dovuta a Tholen (1984) e si basa sui dati relativi alla survey in otto colori su un campione di 589 asteroidi iniziata da Zellner e collaboratori nel 1979 (Zellner et al., 1985).

Essa prevede 14 classi: ad esse ne è stata aggiunta un'altra (K) per opera di Bell e Tedesco (1989) a seguito dell'osservazione della famiglia di Eos, ed altre due (J e O) da Xu et al. (1995) a seguito dell'osservazione di piccoli asteroidi della fascia principale.

Delle 14 classi identificate da Tholen, 11 provengono direttamente dagli spettri rilevati dalla survey di Zellner e 3 (E, M e P) dalla valutazione dell'albedo visuale (Burbine e Binzel, 1993).

Come è naturale che l'aumento delle conoscenze in materia potesse portare all'introduzione di nuove classi, è altrettanto lecito aspettarsi che alcune classi possano essere a loro volta suddivise in sottogruppi, e questo si è verificato per gli asteroidi di tipo S nel momento in cui si è appurato che le caratteristiche spettrali estremamente variegata potevano giustificare una ulteriore suddivisione.

Per tale gruppo tassonomico, Gaffey e collaboratori proponevano la distinzione in sette sottoclassi [S(I) - S(VII)], nelle quali S(I) corrisponde ad una struttura prevalentemente costituita da olivina, S(VII) ad una struttura di pirossene e le classi intermedie abbondanze variabili di questi due componenti.

La tabella seguente (Taylor, 1992) illustra le caratteristiche delle principali classi:

<i>Classi a bassa albedo (<0.1)</i>
--

Classe C: comune nelle parti esterne della fascia principale e simile come composizione superficiale ad alcuni tipi di driti (CI e CM).
con-

Comprende le sottoclassi B, F e G con minori distinzioni spettrali e di albedo.

Classe D: rara nella fascia principale, ma predominante al di là della risonanza 2:1 con Giove a 3.25 U.A., il colore rosso-
siccio è forse dovuto a materiali kerogen-like.

Non vi sono meteoriti analoghe.

Classe P: comune nella parte più esterna della fascia principale, probabilmente ricca di C.

Non vi sono meteoriti analoghe.

Classe T: rara e di composizione sconosciuta, probabilmente con-
driti carbonacee fortemente alterate.

Classe K: possibile progenitore delle condriti CV e CO.

Classi ad albedo moderata

- Classe A:** tipologia rara con spettro molto rosso, con caratteristiche infrarosse di assorbimento tipiche dell'olivina, forse simile alle brachiniti.
- Classe M:** comune nella fascia principale, probabilmente composta di metallo Fe-Ni, come le meteoriti metalliche.
- Classe Q:** l'asteroide 1862 Apollo e forse altri due Earth-Approaching sono gli unici esemplari di questa classe, e possono essere i progenitori delle condriti ordinarie (H, L ed LL).
- Classe R:** l'unico appartenente è l'asteroide 349 Dembowska, che sembra avere una superficie di olivina, pirossene ed alcuni metalli. Probabilmente analogo alle acondriti ricche di olivina.
- Classe S:** comunissima nella parte interna della fascia principale e tra gli asteroidi Earth-approaching, con proporzioni variabili di metalli, olivina e pirossene. E' probabilmente apparentata alle pallasiti e ad alcune meteoriti metalliche.
- Classe V:** formata da 4 Vesta, 3551 Amor, 1983 RD e molti altri, mostra forti caratteristiche del pirossene, simile alle acondriti basaltiche.

Classi ad albedo elevata (>0.3)

- Classe E:** tipologia rara, forse simile alle condriti enstatiti.

In merito alla suddivisione in classi ed alla appartenenza di un asteroide ad esse è opportuno sottolineare alcuni fattori:

1. La separazione tra le classi non è molto netta, e ci sono notevoli margini di incertezza; non è infrequente, quindi, l'appartenenza contemporanea di un asteroide a diverse classi tassonomiche.

La tassonomia, infatti, è basata sulle caratteristiche spettrali e non fornisce automaticamente una interpretazione mineralogica.

2. Rivestono particolare importanza, per il numero elevato di asteroidi ad esse assegnati, tre classi principali: C (**carbonacei**), S (**silicati**) ed M (**metallici**).

Annotiamo inoltre la particolarità della classe D, nella quale predominano gli asteroidi Troiani (posti nei punti lagrangiani L4 e L5 di Giove), caratterizzata da corpi molto scuri e rossastri, ricchi forse di composti organici relativamente complessi e simili ai nuclei delle comete (Farinella, 1988); somiglianza evidenziata anche da indagini recenti (Marzari et al., 1995) e che ha portato ad ipotizzare legami molto più profondi tra le due categorie di corpi celesti.

3. Uno studio globale sulla distribuzione statistica delle varie classi deve assolutamente tener conto del ruolo giocato dalla natura chimica della superficie in quanto da essa dipende l'albedo e, di conseguenza, la maggiore o minore osservabilità di un asteroide.

4. Analizzando il legame tra classe di appartenenza e distanza dal Sole (**Figura 1.7**) si può evidenziare come le varie classi tendano ad occupare ciascuna una particolare zona ed è naturale interpretare questo dato come ulteriore conferma del ruolo giocato dalla temperatura nella nebulosa solare primordiale (i materiali rocciosi brillanti erano meno volatili e sono rimasti all'interno, a differenza di quelli più scuri, ricchi di carbonio).

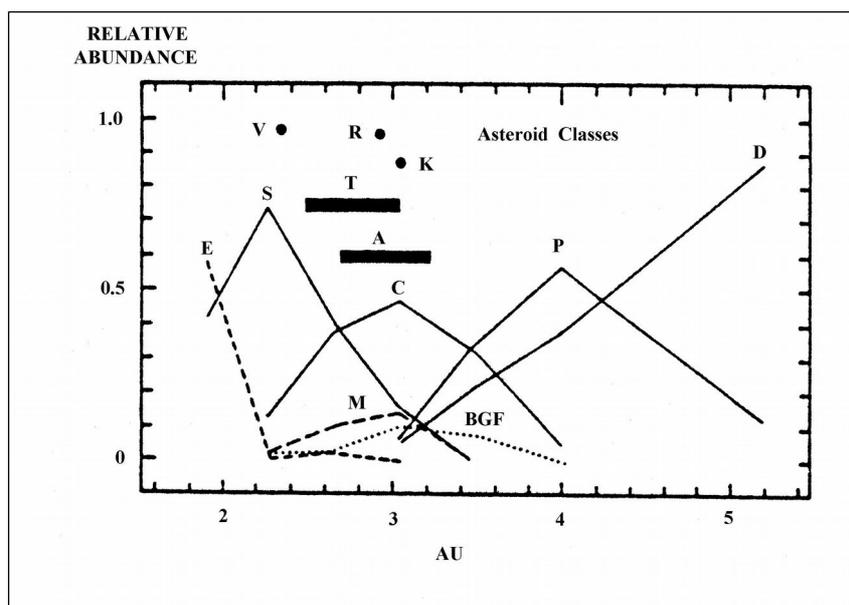


Figura 1.7

Distribuzione dei tipi tassonomici nella Fascia Asteroidale in funzione della distanza dal Sole.

(Da: Taylor - Solar System Evolution, p.225, fig.5.11.4)

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

Gli oggetti del gruppo **primitivo** si collocano nella zona esterna della Fascia Principale (gruppo di Hilda e Troiani) e sono stati sottoposti ad un riscaldamento nullo o comunque limitato.

L'acqua potrebbe dunque essere presente solo come ghiaccio e la bassa temperatura non consentirebbe le reazioni di idratazione per le quali è necessaria la presenza di acqua, 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.

La presenza di oggetti di questo tipo andrebbe diminuendo fino a diventare nulla ad una distanza di 3.5 U.A., suggerendo l'idea che l'accrescimento dei pianeti di tipo terrestre sia avvenuta partendo proprio da planetesimi ignei (Taylor, 1992).

La tabella seguente illustra le caratteristiche delle singole classi (raggruppate nelle 3 super-classi di Bell) attraverso il confronto con le caratteristiche spettrali dei materiali meteoritici rilevate in laboratorio:

SUPERCLASS	CLASS	INFERRED MINERALS	ANALOGOUS METEORITES
<i>PRIMITIVE</i>	D	clays, organics	(none)
	P	clays, organics	(none)
	C	clays, C, organics	CI, CM chondrites
	K	ol, pyx, carbon	CV, CO chondrites
<i>METAMORPHIC</i>	T	?	?
	B+G+F	clays, opaques	altered carb. chond.
	Q	pyx, ol, gray NiFe	H, L, LL chondrites
<i>IGNEOUS</i>	V	plag, pyx, ol	basaltic achondrites
	R	ol, pyx	ol-rich achondrites ?
	S	pyx, ol, red NiFe	pallasites, irons ?
	A	ol	brachinites
	M	NiFe	irons
	E	Fe-free pyx	aubrites

(Da: Burbine - Binzel, Asteroids, Comets, Meteors 1993, p. 257, table I)

Uno dei rompicapo con il quale si ha a che fare nello studio comparato di asteroidi e meteoriti (spesso indicato con il termine di *para-*

dosso spettrofotometrico) è l'assenza di oggetti che possano costituire la sorgente delle condriti ordinarie.

Le condriti ordinarie sono il tipo di meteoriti più comune (costituiscono più dell'80% del flusso meteorico sulla Terra), ma nessuno tra i possibili candidati della fascia asteroidale presentava le caratteristiche spettrali rilevate in laboratorio.

Vi sono due teorie che cercano di spiegare questo fatto:

la **prima ipotesi** è che vi sia un errore nell'interpretazione degli spettri ottenuti dagli asteroidi e che le superfici degli asteroidi costituiti da condriti ordinarie siano state in qualche modo alterate;

la **seconda ipotesi** è che i corpi costituiti da condriti siano di piccole dimensioni, al limite delle possibili osservazioni.

E proprio la ricerca della soluzione di questo rompicapo ha spinto alcuni ricercatori (Xu et al., 1995) ad intraprendere un'analisi spettroscopica sui piccoli asteroidi della fascia principale.

Nel corso di questa survey è stato così identificato per la prima volta un oggetto (3628 Boznemcova) che mostra uno spettro tipico delle condriti ordinarie e per il quale è stata proposta la collocazione nella nuova classe O.

Un altro asteroide (il Mars-crosser 2078 Nanking) ha evidenziato uno spettro simile a quello delle condriti H.

Questi fatti costituiscono una scoperta cruciale per la soluzione del paradosso delle condriti, ma rimane ancora irrisolto il problema costituito dal ridottissimo numero di oggetti di questo tipo finora individuati, il che rende praticabile anche la prima ipotesi.

L'idea di fondo (Chapman, 1996) è che gli asteroidi di tipo tassonomico S siano le sorgenti delle condriti ordinarie, ma la loro composizione reale sarebbe mascherata dagli influssi della radiazione solare, che renderebbe le superfici apparentemente più rosse e più metalliche di quanto non siano in realtà (*invecchiamento*).

Questa ipotesi sarebbe stata confermata anche da esperimenti di laboratorio eseguiti da Moroz et al. (1996): irraggiando ripetutamente

frammenti di condrite ordinaria con un laser (simulando in tal modo il bombardamento ad opera di micrometeoriti) si è osservato che lo spettro del meteorite frantumato subiva un cambiamento, diventando simile allo spettro di un asteroide di tipo S.

In quest'ottica si colloca anche una **terza**, recentissima **ipotesi** che identifica quali sorgenti delle condriti ordinarie alcuni oggetti di tipo S (come 6 Ebe e 7 Iris), la famiglia dinamica di Maria e la risonanza 3:1 con Giove, ma su di essa ritorneremo in seguito parlando di 433 Eros.

6. "INCONTRI RAVVICINATI"

Si notava all'inizio di questa tesi come le sonde spaziali abbiano enormemente incrementato la nostra conoscenza anche dei corpi minori del sistema solare.

Vale pertanto la pena soffermarsi brevemente su due asteroidi interessati da questo tipo di osservazione evidenziando le scoperte, le conferme di ipotesi e gli inevitabili nuovi interrogativi.

Si esamineranno poi altri due asteroidi, anch'essi studiati molto da vicino, una "vicinanza", però estremamente pericolosa per la Terra in quanto si tratta di asteroidi appartenenti alla categoria degli Earth-grazing (EGA) o near-Earth (NEA), corpi che sfiorano il nostro pianeta percorrendo orbite che possono attraversare quella terrestre.

In questa duplice ottica va letto, pertanto, il titolo volutamente ad effetto: non si intende, cioè, solamente lo sforzo della scienza che cerca di avvicinarsi ad alcuni corpi per poterli studiare a fondo, ma anche la situazione che si manifesta con il passaggio nei pressi della Terra di alcuni corpi celesti in seguito all'azione esercitata da quel groviglio di influenze gravitazionali che governano tutta la dinamica del Sistema Solare.

951 GASpra

Venne scoperto nel 1916 da G. N. Neujamin e non fu mai particolarmente considerato - destino comune a tutti gli asteroidi fino a non molto tempo fa - fino a quando non ci si accorse che "era sulla strada" della sonda Galileo nel suo viaggio verso Giove.

Diventò così il primo asteroide avvicinato da una sonda spaziale (29 ottobre 1991).

E' caratterizzato da una forma fortemente irregolare: descrivendolo come un ellissoide triassiale (18.2 x 10.5 x 8.9 km) si ottiene uno scostamento di oltre il 10% rispetto alle dimensioni reali.

Questa forma irregolare era già stata rilevata dallo studio della curva di luce, dal quale era emersa anche la rotazione (antioraria) con un periodo di circa 7 ore.

Il profilo di Gaspra è consistente con l'idea che gli asteroidi possano essere mucchi di detriti (*rubble piles*) composti dall'aggregazione di molteplici corpi di diverse dimensioni.

E' pure consistente, però, con il fatto che Gaspra possa essere il frammento più interno di un corpo originario distrutto da una collisione (Chapman, 1994).

A questo proposito si stima che l'impatto, estremamente violento, possa essere avvenuto circa 500 milioni di anni fa e si potrebbe collegare l'origine di Gaspra alla famiglia di Flora (un unico corpo progenitore con dimensioni dell'ordine di 200 km), ma la collocazione è dubbia perchè Gaspra si trova alla "periferia" dell'addensamento di Flora.

Ciò che spinge, però, a scegliere per Gaspra una struttura interna compatta e non di agglomerato è la presenza di solchi sulla sua superficie (facilmente rilevabili dalle immagini inviate dalla sonda Galileo), il cui uniforme orientamento (sono disposti lungo due direttrici) viene interpretato come indicazione di una struttura monolitica ricoperta da uno strato di detriti (*regolith*) valutabile in 30-200 m (Veverka et al., 1994).

Annotiamo, per inciso, che tali strutture superficiali erano state riconosciute solamente su Phobos, satellite di Marte, ed erano state, anche in quel caso, interpretate come originate dalle deformazioni superficiali indotte da un impatto e successivamente ricoperte e parzialmente mascherate dai detriti superficiali.

Sulla base delle caratteristiche spettrali, Gaspra è classificato come asteroide della classe tassonomica S; questo significa che la sua superficie si stima sia composta di olivina, pirosseni e composti metallici (ferro-nichel) e porta ragionevolmente a supporre che questo asteroide provenga dal nucleo di un corpo di massa maggiore.

La peculiarità di Gaspra è la superficie relativamente liscia, punteggiata da piccoli e recenti crateri.

L'età desunta dalla craterizzazione è di 200 milioni di anni, e ciò conferma che si tratta di un asteroide relativamente giovane.

Lo studio dei crateri ha inoltre permesso di rivedere le stime sulla abbondanza dei piccoli corpi (diametro dai 10 ai 100 metri), parametro essenziale per poter valutare con ragionevolezza l'entità, l'efficienza e la rapidità del processo collisionale che ha coinvolto e coinvolge tutt'ora gli asteroidi.

Si è potuto stimare che il numero di mini-asteroidi sia legato al diametro (D) da una legge del tipo $D^{-3.3}$ anziché $D^{-2.5}$ come era per i corpi studiati finora e questo implica un aumento notevole della popolazione di asteroidi con dimensioni dell'ordine del centinaio di metri (Farinella, 1995).

Per completezza bisogna aggiungere che la distribuzione di diametri del tipo $N(>D) \sim D^{-2.5}$ deriva dalla teoria analitica di J.S. Dohnany (1969) che studia l'evoluzione collisionale di oggetti che risponda agli impatti in modo indipendente dalle dimensioni.

A questo proposito un recente studio di Campo Bagatin (1994) ha mostrato che tutte le simulazioni di evoluzione della popolazione asteroidale inducono a concludere che la distribuzione finale non è rappresentata da una legge di potenza con esponente ben definito e costante, bensì dalla composizione di varie leggi di potenza con esponenti

variabili a seconda delle dimensioni, anche se mediamente oscillanti intorno al valore di Dohnany.

Fondamentale importanza nello studio dell'evoluzione collisionale dell'intera popolazione asteroidale assume la scelta del taglio inferiore nelle dimensioni degli oggetti in essa coinvolti.

Se è vero che un valore numerico finito è indispensabile per impostare la simulazione del processo evolutivo, è altrettanto vero che nella realtà esistono meccanismi naturali (ad esempio il vento solare) che tendono rapidamente ad eliminare le particelle di piccole dimensioni, rendendo in tal modo il taglio numerico sui piccoli diametri non solamente un mero espediente di calcolo, bensì la corretta simulazione di un processo fisico reale.

243 IDA

E' stato il secondo obiettivo asteroidale della sonda Galileo (28.08.1993).

Anche questo asteroide è caratterizzato da una forma fortemente irregolare con l'asse maggiore di circa 58 km e quello minore di 23 km.

Si considera appartenente al tipo tassonomico S e la sua densità viene stimata tra 2.2 e 2.9 g/cm³.

La sua superficie, notevolmente più craterizzata di quella di Gaspra e che rende Ida forse uno degli oggetti più densamente craterizzati del Sistema Solare, suggerirebbe una genesi collisionale collocabile circa 2 miliardi di anni fa (Chapman, 1994).

Questo dato però è notevolmente discordante dalle ipotesi avanzate da studi precedenti sulla famiglia di Koronis, alla quale Ida appartiene, che collocano l'evento generatore della famiglia circa 20 milioni di anni fa.

Probabilmente nella sua estrema craterizzazione ha giocato un ruolo importantissimo la differente collocazione nella fascia principale ed il conseguente differente flusso di "proiettili" rispetto ad altri asteroidi della famiglia.

Molto più di quanto rilevato su Gaspra, Ida presenta segnali evidenti dell'esistenza sulla sua superficie di uno spesso strato di *regolith*: dalle immagini è possibile individuare la presenza di massi, tracce di movimenti di rotolamento e variazioni di albedo su piccola scala.

Vi è anche la presenza di un certo numero di crateri molto grandi, ai quali è riconducibile la formazione dello strato più profondo di *regolith* (Chapman, 1994).

Una interessante peculiarità di Ida è la scoperta (febbraio 1994) che questo asteroide è dotato di un piccolo satellite, Dactyl, (con dimensioni di circa 1.5 km) orbitante ad una distanza di 90 km con un periodo di circa 20 ore.

Dactyl è il primo satellite naturale di un asteroide ad essere scoperto e fotografato, ed è costituito più o meno dello stesso tipo di materiale che compone Ida.

Sulla provenienza di questo satellite (staccatosi da Ida in seguito ad una collisione oppure prodotto della stessa collisione che ha generato Ida?) non si è ancora riusciti a trovare una risposta univoca: l'unico dato certo è che sembra sia senz'altro da scartare l'ipotesi di una cattura gravitazionale.

Un oggetto così piccolo, infatti, verrebbe deviato, a meno che non intervenga una forza esterna che lo rallenti fino a rendere possibile la sua cattura.

La sonda Galileo ha inoltre rilevato durante il passaggio su Ida variazioni del campo magnetico solare, il che farebbe supporre un elevato contenuto di materiali magnetici, ma l'ipotesi contrasta con il valore della densità di Ida, troppo bassa per rendere questo asteroide simile come composizione ai meteoriti metallici o metallo-silicatici.

Ed è proprio l'anomalo valore della densità che spinge Chapman (1996) ad ipotizzare per Ida una struttura complessa: questo asteroide sarebbe costituito da condriti ordinarie (caratterizzate da una densità di 3.5 g/cm^3) con una struttura interna ad agglomerato (*rubble pile*), la cui bassa densità porterebbe il valore complessivo a quello stimato.

Questa idea troverebbe conferma dal confronto tra gli spettri della superficie originaria e più antica di Ida e quelli provenienti dalle zone di recente craterizzazione (originatesi meno di 100 milioni di anni fa), caratterizzati da minore arrossamento e dalla presenza di bande di assorbimento più profonde.

Forse l'impatto ha riportato alla luce la superficie primitiva dell'asteroide ed essa non è stata ancora esposta per sufficiente tempo alle radiazioni affinché lo spettro possa essere arrossato e le bande di assorbimento grandemente indebolite, come per il resto di Ida.

433 EROS ED I N.E.A.

Questo asteroide fu scoperto da G. Witt nell'agosto 1898.

Esso è divenuto il capostipite di un particolare gruppo di oggetti chiamati N.E.A. (Near-Earth Asteroid), comprendendo con tale termine quegli asteroidi le cui orbite si avvicinano o incrociano l'orbita terrestre.

L'eventualità di un possibile impatto del sistema Terra-Luna con questo asteroide era già stata considerata fin dal 1933, allorchè Sir Phillip Roberts, direttore della British South-African Astronomical Society, aveva calcolato un possibile impatto di Eros con il nostro satellite, impatto che avrebbe dovuto avvenire circa 11 anni più tardi (Dyson, 1995).

I calcoli non erano fortunatamente corretti, ma la vicenda può mostrare che l'ipotesi di un possibile impatto di Eros con la Terra è sempre stata considerata una eventualità tutt'altro che remota, soprattutto se rapportata ai tempi di evoluzione cosmica.

Wetherill e Shoemaker (1982) avevano ipotizzato il 24% di probabilità che questo corpo collidesse con la Terra entro un tempo di 400 milioni di anni; la velocità d'impatto era stimata in circa 14 km/sec e l'evento avrebbe originato un cratere di circa 250 km di diametro.

La valutazione della possibile scala dei tempi per un impatto è stata però recentemente riconsiderata da Michel et al. (1996), che hanno studiato l'evoluzione dinamica dell'orbita di Eros su un periodo di due milioni di anni, studio effettuato adottando un modello di Sistema Solare puramente gravitazionale, tenendo conto di tutti i pianeti, escluso Plutone, ed inglobando la massa di Mercurio in quella del Sole.

Dalla simulazione è stata riconfermata l'esistenza di una risonanza orbitale con Marte in grado di perturbare l'orbita di asteroidi Mars-crossing, come Eros, trasformandoli in Earth-crossing: per un modello calcolato dalla simulazione tutto questo porterebbe ad un impatto con la Terra in un tempo di 1.14 milioni di anni.

La conclusione presentata dal lavoro citato è però ancora più rassicurante poichè si afferma che, se esistono significative possibilità (dell'ordine del 50%) che Eros diventi un Earth-crosser e possa collidere con il nostro pianeta, ciò avverrebbe in una scala di tempi dell'ordine di 10^8 - 10^9 anni.

La preoccupazione che Eros o qualche altro asteroide possa impattare la Terra è comunque certamente fondata, e su di essa, come su tutte le complesse problematiche connesse con tale evento, è necessario dedicare un successivo approfondimento.

Tornando, invece, ad occuparci dei N.E.A., talvolta chiamati Earth Grazing (E.G.A.), Earth Crossing (E.C.A.) o Earth Approachers, sottolineiamo come la peculiarità di questi oggetti sia costituita dalle loro orbite, che li portano ad avvicinarsi o ad incrociare pericolosamente l'orbita della Terra.

Vengono convenzionalmente suddivisi in tre gruppi:

1. ATEN: hanno orbite che li pongono all'interno dell'orbita della Terra e la incrociano nei pressi del loro afelio; vengono considerati una sottoclasse degli Apollo ed il loro numero è stimato in circa 100 (Taylor, 1992).

2. APOLLO: sono asteroidi caratterizzati da un valore del semiasse superiore a 1 U.A. e dal perielio minore di 1.017 U.A. (afelio della Terra), dunque attraversano la nostra orbita, ed il loro numero è stimato in circa 1000 (Taylor, 1992).

3. AMOR: non possono avere un impatto diretto con la Terra, ma solamente degli avvicinamenti dal momento che il loro perielio è maggiore dell'afelio terrestre.

Descrivendo le circostanze della scoperta del primo oggetto posto nelle vicinanze del sistema Terra-Luna, Rabinowitz (1993) identifica in

questo modo le tre classi degli Earth-Approachers:

ATEN	$a < 1.0 \text{ U.A.}$	$q > 0.983 \text{ U.A.}$
APOLLO	$a > 1.0 \text{ U.A.}$	$q < 1.017 \text{ U.A.}$
AMOR	$a > 1.0 \text{ U.A.}$	$1.017 \text{ U.A.} < q < 1.3 \text{ U.A.}$

La distinzione può essere visualizzata in un disegno che mostra le orbite (approssimate) di oggetti dei tre gruppi paragonandole a quella della Terra (*Figura 1.8*).

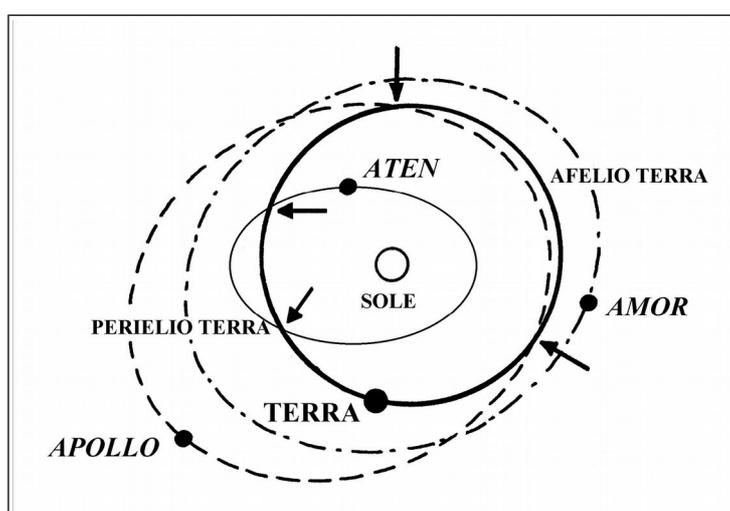


Figura 1.8

Situazione orbitale rispetto alla Terra degli oggetti Aten-Apollo-Amor (disegno indicativo). Le frecce indicano i punti di possibile incontro di questi oggetti con il nostro pianeta.

Dati recenti (novembre 1996) riportano un totale di 384 asteroidi di questo tipo, di cui 183 Apollo, 179 Amor e 22 del tipo Aten (Di Martino, comunicazione personale).

Si stima che la loro vita media sia 10^7 - 10^8 anni, dopo di che vengono espulsi dal Sistema Solare oppure collidono con un pianeta.

Date le loro ridotte dimensioni, si presume che siano frammenti collisionali ed è probabile, inoltre, che il 40% di questi oggetti possa

essere costituito da nuclei cometari spenti (Taylor, 1992).

Ed è al gruppo degli oggetti di tipo Amor, che si stima sia formato da 1000-2000 corpi (Taylor, 1992), che appartiene 433 Eros.

Storicamente Eros è sempre stato per l'Astronomia un asteroide molto importante: è grazie a precise misure astrometriche che H. Spencer Jones è riuscito, durante l'opposizione del 1930-31, a determinare il valore della parallasse solare in modo estremamente preciso, con una incertezza di solamente 1/1000 di secondo d'arco; è ancora grazie alle perturbazioni della sua orbita rilevate tra il 1926 ed il 1945 che W. Raabe ricavò il valore della massa del sistema Terra-Luna rispetto al Sole.

Nel corso di questo secolo, l'incontro più ravvicinato con la Terra si è verificato il 23 gennaio 1975, quando la distanza tra i due corpi celesti fu solamente 0.15 U.A..

La campagna osservativa internazionale organizzata in tale occasione ha permesso di ottenere la curva di luce (**Figura 1.9**) e da questa il periodo di rotazione (5.27 ore), la direzione dell'asse polare ed il senso di rotazione.

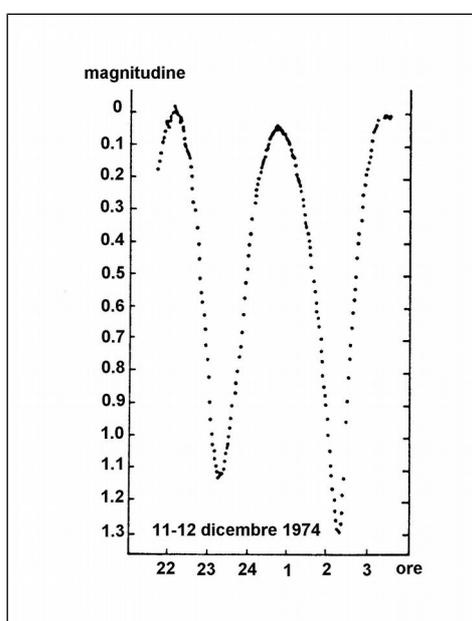


Figura 1.9

Curva di luce di Eros (Osservatorio di Pino Torinese)
(Da: Di Martino, *L'Astronomia*, **162**, p.20; 1996)

L'analisi radar suggerisce che si tratta di un corpo molto irregolare, di dimensioni 40 x 14 x 14 km, con un emisfero piatto e quello opposto di forma convessa.

Bottke e Melosh (1996), studiando gli effetti delle forze di marea presenti negli incontri ravvicinati tra pianeti ed asteroidi, ipotizzano per i planet-crosser l'esistenza di possibili satelliti in orbita attorno ad essi e concludono affermando che Eros presenta tutte le caratteristiche per avere un possibile piccolo satellite, eventualità ritenuta probabile al 50%.

Un recentissimo studio (Zappalà et al., 1996) collega Eros al gruppo di Maria.

Questa famiglia dinamica prende il nome, come consuetudine, dall'asteroide con numerazione inferiore (170 Maria, con diametro di 44 ± 5 km) e comprende circa 80 membri; si colloca nella Fascia Principale, in una zona prossima alla risonanza 3:1 con Giove, e nello studio citato si suggerisce che possa essere la sorgente dei cosiddetti NEA giganti (433 Eros e 1036 Ganimede).

Ipotesi perfettamente in linea con le recenti scoperte che hanno identificato la suddetta risonanza con Giove come un mezzo dinamico estremamente efficiente per condurre un oggetto nelle regioni più interne del Sistema Solare.

L'evento in grado di produrre frammenti delle dimensioni di Eros e Ganimede (ambedue dell'ordine di 20-30 km di diametro) deve essere stato altamente energetico, lo confermerebbe anche il fatto di avere scagliato oggetti proprio in una zona di risonanza.

Sulla base delle stime delle dimensioni dei corpi appartenenti a questa famiglia, si ipotizza per il corpo progenitore un diametro di circa 85 km.

L'importanza della ricostruzione della famiglia di Maria è ulteriormente aumentata dopo le ultime analisi dei dati spettrali di Eros, dai quali emerge che la superficie di questo asteroide presenterebbe notevole somiglianza con le condriti ordinarie.

Se ambedue i dati (l'appartenenza di Eros alla famiglia e la sua analisi spettroscopica) venissero confermati, si potrebbe ipotizzare per la famiglia di Maria di essere la principale sorgente delle condriti ordinarie, fornendo in tal modo la definitiva risposta al paradosso spettrofotometrico.

L'importanza storica di 433 Eros ricordata poc'anzi è destinata ad aumentare: verso questo asteroide, infatti, è in volo la sonda spaziale NEAR, lanciata il 17.02.96 da Cape Canaveral.

La NEAR (Near Earth Asteroid Rendezvous) fa parte del programma Discovery della NASA ed ha il compito, dopo un primo passaggio ad una distanza di 500 km da Eros (6 febbraio 1999), di porsi in orbita intorno ad esso ad una altezza di circa 40 km.

Al termine della missione (31 dicembre 1999) si potrà disporre di una mappa dell'asteroide con una risoluzione variante tra i 3 e i 5 metri, della distribuzione mineralogica superficiale (ed in tal modo confrontare la composizione chimica di Eros con quella delle meteoriti conosciute), ed inoltre appurare se gli asteroidi più piccoli siano frammenti solidi di roccia oppure aggregati porosi di frammenti collisionali.

Il progetto prevede anche (27 giugno 1997) un fly-by di 253 Mathilde, un asteroide di tipo tassonomico C della Fascia Principale con dimensioni di 61 km, consentendo in tal modo di avere le prime immagini ravvicinate di un asteroide di questo tipo.

Non è da escludere, infine, una variazione del programma originario in modo da far posare la sonda sul suolo di Eros.

E questo mi dà modo di sottolineare un ulteriore aspetto del problematico rapporto Terra-NEA.

La riuscita della missione NEAR, infatti, può mostrare che non è solo fantascienza l'ipotesi di uno sfruttamento delle risorse racchiuse in questi asteroidi: essi potrebbero infatti rappresentare delle potenziali riserve di metalli e di altre materie prime localizzate in regioni dello spazio prossime al nostro pianeta.

Una prova indiretta che alcuni asteroidi siano costituiti da metallo praticamente allo stato puro è fornita dal meteorite Sikhote-Alinskij caduto nel 1947 nella Russia orientale, composto dal 94% di ferro e dal 6% di nichel.

Analizzando l'attuale situazione delle tecnologie disponibili, vi è chi ipotizza l'inizio di uno sfruttamento minerario dei NEA nell'arco di 2-3 decenni (Lupishko, 1996).

4179 TOUTATIS

Questo asteroide (appartenente alla tipologia Apollo) fu "scoperto" il 5 gennaio 1989: in realtà era già stato rilevato fotograficamente il 10 e 14 febbraio 1934!

Presenta le caratteristiche spettrali tipiche dei corpi prevalentemente rocciosi, appartenendo così al tipo S.

Il diametro medio è di 4.6 km, il periodo di rivoluzione è circa 4 anni e, dato che la sua distanza media dal Sole è di 2.5 U.A., si colloca in una lacuna (risonanza 3:1).

La ricostruzione, effettuata utilizzando le immagini radar ottenute nel dicembre 1992 (Hudson e Ostro, 1995), propone per Toutatis un profilo estremamente irregolare, molto somigliante a due blocchi rocciosi (di diametro rispettivamente di circa 2.5 e 4.2 km) in contatto tra di loro.

Da segnalare anche l'individuazione sulla superficie di questo asteroide di crinali e di concavità, queste ultime interpretate come crateri di impatto.

L'origine del profilo così irregolare di Toutatis resta, comunque, un mistero e le ipotesi vagliate prendono in considerazione sia la possibilità di un impatto, o meglio una sequenza di impatti, sia l'eventualità che si possa trattare di un asteroide formato proprio da due corpi distinti a contatto.

Anche per altri asteroidi si era evidenziata la probabile struttura binaria (ad esempio 4769 Castalia) e per alcuni analizzati dalla sonda Galileo si sono avanzati fondati sospetti che, al di sotto della apparenza di corpo unico, si nasconda la natura di componenti a contatto avvolti e "nascosti" da uno strato superficiale di polveri e detriti.

L'esistenza di asteroidi doppi sembrerebbe quindi tutt'altro che rara e potrebbe essere la chiave per comprendere meglio i meccanismi di accrescimento e distruzione che hanno caratterizzato e caratterizzano gli asteroidi.

L'orbita di Toutatis è in continua evoluzione, in particolare diminuisce il valore dell'eccentricità mentre sta aumentando la distanza perielica (da 0.9025 U.A. attuali tende ad assumere il valore di 1.00 U.A.).

Questo non significa rotta di collisione con la Terra, ma certamente situazioni osservative ancora più favorevoli di quelle verificatesi nel dicembre 1992 (3.620.000 km di distanza): nel settembre 2004 Toutatis passerà ad una distanza dalla Terra di 1.570.000 km e si tratterà del passaggio più ravvicinato di un corpo celeste conosciuto (asteroide o cometa) fino all'anno 2060.

La sua orbita notevolmente allungata ($e = 0.64$) non può non ricordare quella delle comete a corto periodo.

Ed effettivamente Toutatis appartiene ad un gruppo di asteroidi, i **Tauridi**, caratterizzati proprio da parametri orbitali molto simili a quelli della cometa Encke, come si può evincere dalla seguente tabella:

NOME OGGETTO	a (UA)	e	i
5143 Heracles	1.83	0.771	9.2
4341 Poseidon	1.84	0.679	11.9
2101 Adonis	1.88	0.764	1.4
4183 Cuno	1.98	0.637	6.8
2212 Hephaistos	2.17	0.833	11.8
2201 Oljato	2.18	0.711	2.5
4486 Mithra	2.20	0.662	3.0
Cometa Encke	2.22	0.850	11.9
6063 1984 KB	2.22	0.764	4.8
4197 1982 TA	2.30	0.773	12.2
4179 Toutatis	2.51	0.640	0.5

(Da: Valsecchi et al., *ICARUS*, **118**, 169; 1995)

Studi recenti (Valsecchi et al., 1995) hanno indagato sull'eventualità che si potesse trattare di corpi con origine comune, i resti di un impatto tra grosse comete della famiglia di Giove, ma il quadro emerso dalle simulazioni dinamiche offre un'altra spiegazione.

Dall'analisi è emersa, infatti, la pesante importanza delle perturbazioni imputabili ai fenomeni di risonanza, in grado di spiegare la presenza di molti corpi dotati di orbite simili a quella della cometa Encke provenienti sia dalla Fascia Principale degli asteroidi sia dalle comete della famiglia di Giove.

In altre parole: la popolazione attualmente presente nella regione dei Tauridi sarebbe l'indicazione dell'esistenza di un meccanismo dinamico (governato dalle risonanze secolari) che collegherebbe tra loro asteroidi della Fascia Principale e comete della famiglia di Giove.

Questo non esclude la possibilità di un evento impattivo all'origine dei Tauridi, ma impone che tale evento debba essere molto recente (dell'ordine di poche migliaia di anni).

L'ipotesi della possibile origine cometaria per molti N.E.A. è stata ulteriormente rafforzata dall'identificazione dell'asteroide 3200 Fetonte (scoperto l'11 ottobre 1983 grazie ai dati raccolti dall'Infrared Satellite IRAS) con lo sciame meteorico delle Geminidi.

Anche per altri sciami meteorici (uno dei quali attribuito proprio a Toutatis) è stata identificata una origine asteroidale, come riportato nella seguente tabella:

SCIAME METEORICO	ASTEROIDE
Kappa Aquaridi	4179 Toutatis
Arietidi	1566 Icarus
Arietidi-Tauridi	1982 TA, 1984 KB, 5025 PL
Bootidi	1987 PA
Fi Bootidi	1620 Geographos, 1978 CA
Camelopardidi	1221 Amor, 3288 Seleucus
Sigma Capricornidi	2101 Adonis
Tau Erculidi	1087 SJ3
Geminidi	3200 Phaeton
Chi Orionidi	2201 Oljato

(Tratta da: *L'ASTRONOMIA*, **160**, 28; 1995)

Il moto di rotazione di Toutatis è molto lento (con un periodo di 5.41 giorni al quale si sovrappone un moto di precessione con periodo di 7.35 giorni) e questo potrebbe spiegare come la reciproca attrazione gravitazionale sia in grado di annullare la forza centrifuga mantenendo a contatto le due componenti.

Come si è già avuto modo di dire, non si tratta di una rotazione regolare, ma di un vero e proprio ruzzolare nello spazio.

Significativa a questo proposito la descrizione fatta da Scott Hudson della Washington State University:

"Toutatis non ha mai ciò che noi comunemente chiamiamo giorno. La sua rotazione è il risultato di due differenti moti che si combinano originando una rotazione la cui orientazione rispetto al Sole non si ripete mai ugualmente".

(Internet: <http://bang.lanl.gov/solarsys/toutatis.htm>; maggio 1996).

7. LA TERRA COME BERSAGLIO

Precisiamo subito che al di sotto del titolo, forse più di stampo giornalistico che non scientifico, si nasconde l'intenzione di analizzare il fenomeno della **caduta di materia interplanetaria sulla Terra**.

Tutti i popoli hanno nelle loro tradizioni storiche e protostoriche racconti riguardanti la caduta di meteoriti, ma fino all'inizio del secolo scorso questi racconti erano considerati, negli ambienti scientifici, con molto scetticismo e venivano classificati il più delle volte come leggende popolari di dubbia veridicità.

Anche a fronte di riscontri oggettivi documentati quali il ritrovamento di meteoriti, la tendenza era quella di ricercarne l'origine in fenomeni prettamente terrestri (soprattutto eruzioni vulcaniche).

La prima dettagliata esposizione della natura extraterrestre delle meteoriti è del 1794, anno della pubblicazione del libro di E.F.F. Chladni (Wasson, 1984): è da quel momento che iniziò la ricerca sistematica di questi "sassi" di provenienza spaziale (i primi due ritrovamenti sono, infatti, del 1801 e 1802).

Non è molto semplice descrivere il flusso di materia che quotidianamente cade sul nostro pianeta dal momento che esso è costituito da componenti la cui massa può abbracciare circa 40 ordini di grandezza (da 10^{-20} a 10^{20} kg).

Solitamente viene suddiviso in tre grandi categorie: **la polvere cosmica** (fino a circa 10^{-9} kg), **i meteoroidi** (fino a circa 10^7 kg) ed infine i corpi collegati ad **eventi più energetici**, associati anche a fenomeni luminosi (bolidi), a corpi di caduta (meteoriti) e ad impatti con formazione di crateri sulla superficie terrestre.

Si è pure annotato più volte che le interazioni impattive tra oggetti cosmici di diversa massa non sono eventi isolati nell'evoluzione del Sistema Solare, e l'evidenza della craterizzazione presente in tutti i corpi ne è la prova schiacciante.

Non è stato indenne da tali eventi (e non lo è tutt'ora) neppure il nostro pianeta, anche se la sua morfologia superficiale potrebbe suggerire un passato relativamente tranquillo da questo punto di vista.

Va certamente notato, a questo proposito, il ruolo di scudo protettivo giocato dall'atmosfera, ma, nonostante questa difesa, vi sono stati nel passato della Terra eventi di grande potenza distruttiva.

Tali eventi, in grado di sconvolgere anche radicalmente la biosfera, hanno lasciato segni talvolta ancora ben visibili, come mostra la seguente tabella che riporta i maggiori crateri da impatto, le dimensioni e l'epoca ipotizzata per l'evento:

LOCALITA'	DIAMETRO (km)	ETA' (10⁶ anni)
SUDBURY, Canada	140	2000
VREDEFORT, Sudafrica	140	2000
POPIGAI, Russia	100	40
PUCHEZ-KATUNKI, Russia	80	200
MANICOUAGAN, Canada	70	200
LABYNKYR, Russia	60	?
SILJAN, Svezia	52	360
KARA, Russia	50	60
CHARLEVOIX, Canada	46	360
ARAGUAINHA DOME, Brasile	40	<250
CHICXULUB, Messico (*)	200	65
RIES CRATER, Baviera (**)	24	15

(Da: Farinella et al., *Gli asteroidi*, 1983)

(*) (Da: Carusi, *Le Scienze*, **317**, 42; 1995)

(**) (Da: Di Martino, *L'Astronomia*, **164**, 14; 1996)

E' importante anche sottolineare le difficoltà che si incontrano nell'identificare queste strutture da impatto: la vegetazione, anzitutto, pone grossi ostacoli all'osservazione aerea (problema che non si pone per le altre superfici planetarie, perfettamente sgombre da schermi di questa natura).

Non va trascurata neppure l'azione dei movimenti tettonici e quella erosiva dei venti e dei fenomeni atmosferici, in grado di introdurre alterazioni notevoli nella zona dell'impatto

Ma non esistono (fortunatamente) solo i grossi impatti: se si considera un intervallo di massa che va da 10^{-21} kg a 10^{15} kg, il flusso totale della materia interplanetaria che arriva ogni anno sulla Terra è 1.7×10^8 kg (Ceplecha, 1992; Cevolani e Foschini, 1996).

L'origine del flusso è da attribuirsi a tre componenti: *cometaria, asteroidale e getti espulsi da superfici di pianeti e satelliti a causa di impatti.*

Solo il 30% del flusso annuo è costituito dai meteoroidi di massa compresa tra 10^{-8} e 10^7 g con contributo maggiore da parte del materiale cometario (Cevolani et al., 1995).

La **Figura 1.10** mostra l'istogramma del flusso totale annuo dei corpi interplanetari sulla Terra: in esso viene assunta una densità media per comete e asteroidi di 1000 kg/m^3).

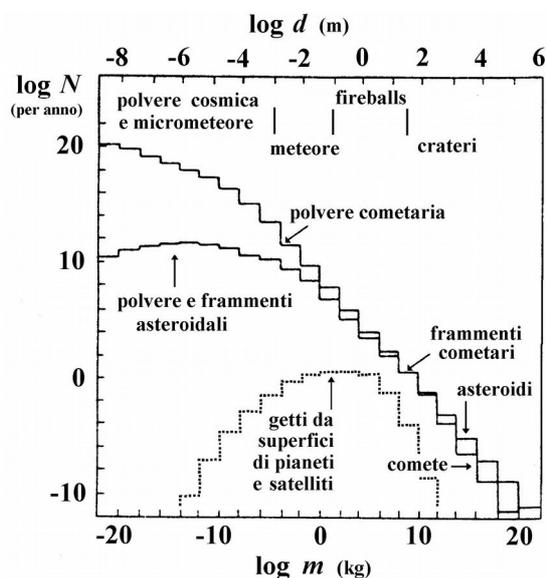


Figura 1.10

Flusso annuo totale dei corpi interplanetari sulla Terra.

Sono riportate le tre componenti: cometaria, asteroidale e getti espulsi da superfici di pianeti e satelliti.

(Da: Cevolani et al., *Il Nuovo Saggiatore*, 5/6, p.102, fig.1; 1995)

Oggi sappiamo che la provenienza della maggior parte dei meteoriti di origine asteroidale è la fascia principale, e vi è ormai la certezza della provenienza di una piccolissima frazione dalla Luna da Marte e da Vesta.

Un esempio di meteoriti provenienti da Marte è costituito dalle nakhlaiti, dal nome della località egiziana (Nakhla) ove è caduta la prima; più in generale le meteoriti provenienti da Marte vengono indicate come SNC (Shergotty, Nakhla, Chassigny) (Taylor, 1992).

Già si è detto che l'asteroide Vesta è stato identificato quale sorgente delle eucriti

Il *meccanismo di trasporto* verso la Terra dei meteoriti può essere suddiviso in due parti:

1. espulsione dalla fascia principale; sono due le regioni interessate: la risonanza 3:1 con Giove, vicino alle 2.5 U.A., ed il bordo interno della fascia principale, a circa 2.1 U.A., dominato da una risonanza secolare.

2. evoluzione orbitale caotica di frammenti che li porta ad incrociare l'orbita terrestre; questa evoluzione può essere *a traiettoria veloce* (vita media inferiore a 10^6 anni, situazione dominata dalle risonanze) oppure *a traiettoria lenta* (vita media di 10^7 - 10^8 anni, situazione dominata dagli incontri ravvicinati con i pianeti interni) (Menichella, 1995).

L'analisi del rischio di un impatto con la Terra è stata oggetto di un lavoro di Chapman e Morrison (1994) ed ha portato ad una valutazione quantitativa di questa eventualità, paragonandola ad altre cause di morte.

Nella tabella seguente, che sintetizza le valutazioni dei due autori, si può notare come l'impatto di un oggetto cosmico costituisca un evento

paragonabile ad altri più famigliari della nostra esperienza quotidiana.

CHANCES OF DYING FROM SELECTED CAUSES (USA)	
<i>Cause of death</i>	<i>Chances</i>
Motor vehicle accident	1 in 100
Murder	1 in 300
Fire	1 in 800
Firearms accident	1 in 2,500
Asteroid/comet impact (lower limit)	1 in 3,000
Electrocution	1 in 5,000
ASTEROID/COMET IMPACT	1 in 20,000
Passengers aircraft crash	1 in 20,000
Flood	1 in 30,000
Tornado	1 in 60,000
Venomous bite or sting	1 in 100,000
Asteroid/comet impact (upper limit)	1 in 250,000
Fireworks accident	1 in 1 million
Food poisoning by botulism	1 in 3 million
Drinking water with EPA limit of TCE (*)	1 in 10 million

(*) EPA, Environmental Protection Agency; TCE, trichloroethylene.

(Da: Chapman e Morrison, *Nature*, **367**, 39; 1995)

Gli impatti di corpi esterni sul sistema atmosfera-Terra possono essere catalogati in una scala di rischio che Carusi ha suddiviso in quattro livelli (Carusi, 1995):

PRIMO LIVELLO: eventi che non costituiscono alcun rischio significativo per la biosfera.

Sono compresi in questo gruppo le interazioni con corpi le cui dimensioni variano dalla regione millimetrica (ed inferiore) fino a qualche metro.

Un esempio particolarmente significativo è stato il bolide con dimensioni iniziali di 1.5-3.0 m e massa di 10^4 - 10^5 kg esploso ad una altezza di circa 30 km sopra Lugo di Romagna il 19.01.1993 (Cevolani, 1994).

Un dato certamente confortante è che, in generale, i corpi rocciosi di massa inferiore a 100 tonnellate vengono disintegrati nel loro attraversamento dell'atmosfera: la maggior parte della loro energia cinetica viene dissipata in tempi dell'ordine del secondo (o anche meno) con la conseguente esplosione del corpo (Cevolani et al., 1995).

Questi episodi vengono definiti *fireball* o *bolidi*.

Di molti di essi non vi è rilevazione a terra, ma soltanto attraverso i satelliti di sorveglianza.

Il Dipartimento della Difesa degli Stati Uniti ha reso pubblici i risultati delle osservazioni dei satelliti-spia effettuate dal 1972 in poi, permettendo così di ricostruire gli episodi di interazione di oggetti di dimensioni dell'ordine di una decina di metri con l'alta atmosfera.

Questi flash, la cui energia è stimata dell'ordine di 10000 kton, sono stati rilevati con una frequenza media non inferiore ad un evento all'anno (Lupishko, 1996).

SECONDO LIVELLO: eventi che coinvolgono corpi con dimensioni comprese tra 10 e 100 m, la cui incidenza temporale è valutata dell'ordine di un evento ogni secolo.

Appartiene a questo secondo gruppo il ben noto evento-Tunguska del 30.06.1908, un bolide di circa 60 m esploso ad una altezza di circa 8 km, la cui onda d'urto sconvolse oltre 2000 km² di fitta foresta siberiana.

Proprio per analizzare l'evento-Tunguska ed i problemi correlati agli eventi impattivi si è svolto a Bologna (15-17 luglio 1996) l'International Workshop TUNGUSKA96.

Ancora una volta è emersa l'esistenza di due "scuole di pensiero": una associa l'evento ad un asteroide (Sekanina, 1996), mentre l'altra ad un nucleo cometario (Grigorian, 1996).

Degna di nota (da un punto di vista storico-filosofico) una osservazione di A. Montanari (Oss. Geologico di Coldigioco), che ha evidenziato come la contingenza storica possa giocare un ruolo decisivo nell'evoluzione di un evento impattivo.

"Se l'evento-Tunguska fosse accaduto cinquanta anni più tardi (un battere di ciglia paragonato ai tempi geologici) e poche decine di gradi più a Ovest (un niente nella vastità delle distanze planetarie) avrebbe potuto causare una catastrofe globale: l'esplosione di Tunguska avrebbe distrutto Mosca proprio all'epoca della crisi della Baia dei Porci, e probabilmente noi non saremmo qui a parlarne..." (Montanari, 1996).

Simile in dimensioni (ma differente in composizione e struttura) il piccolo asteroide metallico di poche decine di metri che 50.000 anni fa originò il Meteor Crater, una voragine profonda 183 m e con diametro di 1.2 km, impattando la Terra ad una velocità di circa 20 km/sec.

Cevolani et al.(1995) associano questi bolidi dei primi due livelli ad una categoria di asteroidi recentemente scoperta (Rabinowitz, 1993) e denominati S.E.A. (Small Earth Approachers), una popolazione di piccoli asteroidi nelle vicinanze del sistema Terra-Luna che ha costretto a riconsiderare il rischio per la biosfera di un impatto con corpi di dimensioni dell'ordine di 10 m in quanto il loro numero, desunto per estrapolazione dalle osservazioni, è di circa 150 milioni, 100 volte maggiore di quello ipotizzato in precedenza.

Una possibile spiegazione è che questi corpi siano residui di comete estinte o frammenti collisionali di asteroidi più grossi con perielio vicino alla Terra

TERZO LIVELLO: in questo gruppo vengono annoverati impatti con oggetti aventi dimensioni dell'ordine di 1 km.

La situazione, nell'eventualità di un simile impatto, comincia ad essere rischiosa per la biosfera a causa dell'elevata quantità di polveri immesse nell'atmosfera: i cambiamenti climatici che ne derivano possono

estendersi nel tempo (anche per alcuni mesi).

La soglia che separa il secondo dal terzo livello corrisponde ad un evento la cui potenza esplosiva può essere quantificata dell'ordine di un milione di megatoni (la bomba di Hiroshima liberò 15 kilotoni, cioè 6×10^{13} J).

QUARTO LIVELLO: è il caso estremo e comprende gli impatti con piccoli asteroidi, dell'ordine della decina di km; la situazione descritta in precedenza assume un carattere globale.

L'impatto stesso ed i fenomeni da esso scatenati comporterebbero per tutto il nostro pianeta conseguenze apocalittiche, uno scenario spesso ipotizzato anche come conseguenza di un conflitto termonucleare su scala planetaria (Gehrels, 1996).

La sequenza temporale delle letali conseguenze imputabili ad un impatto di questo livello può essere così sintetizzata:

1. L'aspetto iniziale è certamente il verificarsi di quei fenomeni puramente meccanici ascrivibili direttamente all'impatto, quali la formazione di un cratere ed il conseguente terremoto ad esso associato, con effetti catastrofici entro un raggio di alcune centinaia di chilometri.

Si stima (Carusi, 1995) che un oggetto di 10 km di diametro possa produrre un cratere di almeno 100 km di diametro.

Ipotizzando, poi, una caduta in mare (evento certamente più probabile dato il rapporto terre emerse/mari sul nostro pianeta) si deve considerare anche il conseguente maremoto (*tsunami*), la cui potenza distruttiva sarebbe tutt'altro che trascurabile.

Un oggetto di 200 metri (inquadabile ancora nel secondo livello!) potrebbe dare origine in mare aperto ad onde alte 3.5 metri, che raggiungerebbero i 100 metri di altezza sulle coste (Carusi, 1995).

Parallelamente a questi fenomeni meccanici sono da annotare quelli termici indotti sul luogo dell'impatto dall'energia liberata dall'urto stesso e, nelle zone limitrofe, dalla ricaduta dei materiali incandescenti (*eiecta*).

2. Soppressione della fotosintesi clorofilliana a causa dell'oscurità provocata dal permanere in sospensione nell'atmosfera delle polveri e delle ceneri prodotte dagli incendi innescati dalla ricaduta del materiale incandescente originatosi con l'urto, e già questo comporta conseguenze irreparabili non solo per il regno vegetale, ma per l'intera biosfera in quanto viene meno un anello basilare della catena alimentare.

3. Produzione nell'atmosfera di NO_x (ossidi di azoto) e HNO_3 a causa dello shock termico e conseguente verificarsi del fenomeno delle piogge acide.

4. Diminuzione della temperatura ambientale per l'effetto-scudo delle polveri e delle ceneri, riduzione che può essere quantificata in 10-20 gradi e perdurerebbe per un periodo di alcuni anni.

5. Se l'effetto iniziale dell'immissione in atmosfera delle polveri è quello di provocare una diminuzione della temperatura, la situazione successiva sarà caratterizzata da un suo drastico innalzamento.

Il conseguente aumento di vapore d'acqua nell'atmosfera concorrerà a sua volta ad incrementare ulteriormente l'effetto serra prolungandone gli effetti anche per molte migliaia di anni.

Il valore di soglia dell'immissione nella stratosfera di particelle di polvere che darebbe inizio a quello che è stato definito "inverno da impatto", è di circa 10^{13} kg, circa 100 volte maggiore della quantità stimata per le maggiori eruzioni vulcaniche negli ultimi due secoli, comprese quelle di Pinatubo nel 1991 e Tambora nel 1816, responsabile di "*un anno senza estate*" (Chapman e Morrison, 1994).

L'esempio che può essere proposto quale rappresentativo di questo ultimo livello è l'evento K/T, un impatto con un asteroide con dimensioni di una decina di km avvenuto 65 milioni di anni fa (periodo tra il Cretaceo ed il Terziario) al quale si attribuisce l'estinzione dei dinosauri.

In verità vi è anche chi spiega l'estinzione dei dinosauri non come conseguenza di un impatto, ma come il risultato del flusso di radiazioni altamente energetiche associato ad una esplosione di supernova verificatasi a 880 a.l. dalla Terra (Maffei, 1977 e 1982).

Attualmente, però, sembra che la tesi dell'impatto quale spiegazione dell'evento K/T sia quella più accreditata.

Tesi, tra l'altro, avvalorata anche dall'abbondanza di iridio rilevata in strati geologici corrispondenti all'epoca suddetta difficilmente inquadrabile se non ascrivendola ad un apporto esterno alla Terra (Alvarez et al., 1980).

Dopo anni di ricerche sembra che si sia riusciti ad individuare il cratere prodotto da quella collisione: è stata scoperta, infatti, nel nord della penisola dello Yucatan (Messico), grazie a misure gravimetriche confermate da immagini ottenute dallo Shuttle Endeavour, una depressione di circa 180 km di diametro (cratere Chicxulub) che potrebbe essere stata causata proprio dall'impatto con un corpo di 10-20 km di diametro (Gehrels, 1996).

Ma non è stata questa l'unica occasione di profondi mutamenti dell'ecosistema terrestre ascrivibili, secondo alcuni, alle conseguenze di impatti con corpi esterni.

Si è potuto rilevare da osservazioni geologiche e paleontologiche l'esistenza di una serie di eventi che periodicamente hanno coinciso con estinzioni di specie viventi sul nostro Pianeta (Montanari, 1996).

Si è cercato anche di trovare, nel ripetersi di questi eventi, una periodicità stretta ipotizzando l'esistenza di un oggetto celeste responsabile di ciò, una stella di piccola massa, di tipo spettrale M, legata gravitazionalmente al Sole (i sistemi binari sono circa il 40% della popolazione stellare) con il perielio all'interno della Nube di Oort e afelio a circa 0.7 pc.

I parametri di questa stella (già chiamata Nemesis) sono stati fissati per poter meglio rispondere degli effetti provocati e della loro periodicità.

La forte perturbazione gravitazionale esercitata sugli oggetti della Nube di Oort provocherebbe la loro immissione verso la parte più interna del Sistema Solare, con il risultato di provocare una fitta "pioggia" di comete e asteroidi sui pianeti ed i loro satelliti.

La pseudo-periodicità rilevata (circa 30 milioni di anni) costituisce la base per determinare, secondo la terza legge di Keplero, le dimensioni dell'orbita.

Sono stati effettuati, e sono tutt'ora in corso, programmi di ricerca di questa stella, ma fino ad ora senza risultati (Tomadini e Galletta, 1995).

Tralasciamo pertanto l'ipotesi-Nemesi e torniamo ad analizzare le problematiche connesse con gli eventi impattivi che vedono come bersaglio il nostro Pianeta.

La tabella seguente sintetizza alcuni parametri caratteristici degli impatti tipici dei quattro livelli presentati.

I valori di riferimento sono gli stessi utilizzati da E. Shoemaker nel recente Convegno di Bologna TUNGUSKA96 per ricostruire le dimensioni dell'oggetto caduto in Siberia nel 1908, vale a dire:

densità = 2.3 g/cm³ (meteoriti CI)

velocità = 17.8 km/sec (velocità media di un asteroide Earth-crossing)

LIVELLO	DIAMETRO (m)	MASSA (ton)	E. CINETICA (J)
PRIMO	10	1.20 x 10 ³	1.91 x 10 ¹⁴
SECONDO	100	1.20 x 10 ⁶	1.91 x 10 ¹⁷
TERZO	1.000	1.20 x 10 ⁹	1.91 x 10 ²⁰
QUARTO	10.000	1.20 x 10 ¹²	1.91 x 10 ²³

Esprimendo l'Energia Cinetica in kilotoni (1 kton = 4.2 x 10¹² Joule) otteniamo i seguenti valori tipici:

PRIMO LIVELLO 45.4 kton
 SECONDO LIVELLO 4.54 x 10⁴ kton
 TERZO LIVELLO 4.54 x 10⁷ kton
 QUARTO LIVELLO 4.54 x 10¹⁰ kton

I grafici riportati dalle *Figure 1.11* e *1.12* mostrano il tempo medio di attesa per l'impatto contro la Terra di asteroidi: in ascissa è riportata l'energia liberata dall'urto espressa in megatoni ($1 \text{ MT} = 4.2 \times 10^{15} \text{ J}$).

La parte tratteggiata indica una statistica basata su piccoli numeri.

Viene anche indicato (*Figura 1.12*) il diametro dell'asteroide responsabile dell'impatto, ipotizzando una velocità di 20 km/sec ed una densità di 3 g/cm^3 ; si possono inoltre notare le collocazioni dell'evento-Tunguska e dell'impatto K/T.

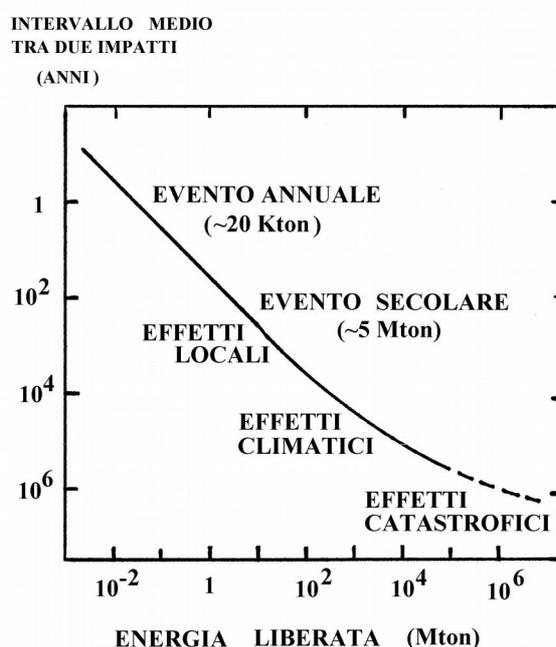


Figura 1.11

Tempo medio di attesa di un impatto Terra-asteroide ed effetti associati.
(Adattato da: Farinella, *Giornale di Astronomia*, 4, 1988)

Nonostante da tempo fossero ben noti tutti questi dati, soltanto di recente si è accentuata la preoccupazione di svolgere un maggiore e più efficace controllo dei potenziali "proiettili" che potrebbero impattare la Terra.

Verso la fine del 1990 è stato attivato lo Spacewatch Telescope presso l'Osservatorio di Kitt Peak a Tucson - Arizona proprio per indi-

viduare gli oggetti particolarmente vicini (e potenzialmente pericolosi) per il nostro pianeta.

Fin dall'inizio i risultati sono stati eclatanti: riferiscono Cevolani e Foschini (1996) che tra il 25.09.90 ed il 30.06.93 questo telescopio ha scoperto 45 nuovi asteroidi in prossimità del sistema Terra-Luna, 2 comete e 2 asteroidi trans-Saturniani.

Tra questi ci sono 4 oggetti di dimensioni comprese tra circa 5 e 50 m e ben 19 hanno un diametro compreso tra 50 m e 5 km.

La ricerca avviene in modo automatizzato, in quanto, ottenute le immagini per mezzo di CCD, è un computer che si occupa di confrontare le osservazioni della zona di cielo acquisite in tempi diversi individuando quali oggetti si siano spostati.

In questo modo è possibile localizzare fino a 600 asteroidi in una notte (Gehrels, 1996).

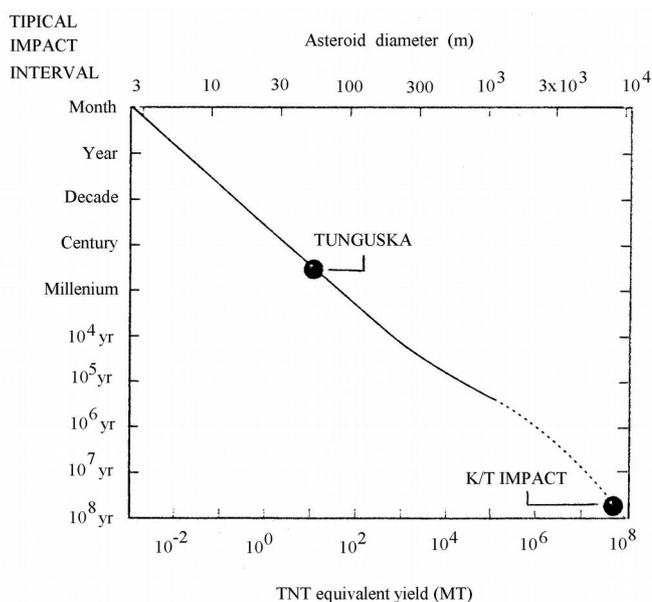


Figura 1.12

Stima degli intervalli di attesa di impatti Terra-asteroide. La linea tratteggiata è per raccordare il grafico all'energia minima stimata da Alvarez per l'evento K/T.

(Da: Chapman e Morrison, *Nature*, **367**, p.35, fig.1; 1994)

Spacewatch ha così portato alla scoperta di moltissimi asteroidi con dimensioni dell'ordine delle decine di metri ed ha permesso di constatare che il loro numero supera le previsioni di un fattore 40, ma

per il momento non si è ancora riusciti a risalirne all'origine (Gehrels, 1996).

Nel 1992 a San Pietroburgo (Russia) è stato istituito l'International Institute of Asteroid Hazard Problems, un organismo che coordina la ricerca sugli asteroidi dei Paesi che facevano parte dell'ex Unione Sovietica (Lupishko, 1996).

Anche a livello europeo si sta facendo qualcosa: il Consiglio d'Europa ha votato (gennaio 1996) una raccomandazione destinata ai Paesi membri nella quale si invitano i Governi a prendere in considerazione un piano di ricerca e censimento di quei corpi celesti (asteroidi e comete) potenzialmente pericolosi per il nostro pianeta.

A questa raccomandazione è seguita (Roma, 4 aprile 1996) per iniziativa di A. Carusi (Istituto di Astrofisica Spaziale - CNR) la nascita della Spaceguard Foundation.

Il CNR, poi, ha approvato la costituzione di una rete di osservazione (ITANET) alla quale hanno aderito, per il momento, gli Osservatori di Torino, Padova, Milano, Catania e Roma. (Caprara, 1996).

Germania, Italia e Francia, inoltre, hanno da poco dato il via al programma EUNEASO (EUropean Near-Earth Asteroid Search Observatories) che prevede di utilizzare i telescopi Schmidt dell'Osservatorio Australe Europeo (ESO) e dell'Osservatorio della Costa Azzurra (Nizza) dotati di speciali camere CCD (Di Martino, 1996).

E' importante sottolineare che gli studi sull'attività e sul flusso della materia interplanetaria (studi compiuti anche con l'impiego di tecniche radar, che garantiscono una copertura temporale su tutto l'arco delle 24 ore) trovano significativa attenzione anche per lo sviluppo di modelli di impatto con veicoli spaziali.

I meteoroidi forniscono, poi, ottimi esempi di impattori ad altissima velocità, potendo raggiungere valori prossimi a 72 km/sec, praticamente la velocità orbitale della Terra (29.7 km/sec) sommata alla velocità di fuga dal Sistema Solare presso la Terra (42 km/sec).

Storicamente si è cominciato ad occuparsi in modo approfondito del flusso di materia interplanetaria verso la Terra proprio quando, dopo i primi piccoli passi, la tecnologia astronautica metteva in cantiere progetti più ambiziosi: la permanenza dell'uomo nello spazio doveva essere il più possibile garantita dai rischi connessi con eventuali impatti (si era negli anni '60 ed era in pieno svolgimento la "corsa allo spazio" tra americani e sovietici).

E' del 4 agosto 1969 il rientro in atmosfera (e relativa disintegrazione) della sonda Pegasus-3; era stata lanciata il 30 luglio 1965 da Cape Canaveral proprio con lo scopo, come le due altre sonde omonime che l'avevano preceduta, di ottenere valutazioni attendibili sul flusso di materia interplanetaria che potesse interessare i veicoli spaziali.

Le superfici di raccolta erano costituite da due pannelli lunghi 15 metri e larghi 4.6, compattati a fisarmonica al momento del lancio ed aperti come gigantesche ali non appena raggiunta l'orbita; le ampie superfici e la permanenza attiva in orbita per alcuni mesi rendevano possibili valutazioni statisticamente attendibili.

Va aggiunto che il progetto Pegasus servì alla NASA anche come banco di prova del vettore S-IV, in seguito impiegato, dopo alcune modifiche, come terzo stadio del gigantesco Saturno V, destinato a portare l'uomo sulla Luna.

Attualmente, però, non sono soltanto i meteoroidi a costituire un problema per le Agenzie Spaziali: anche gli stessi frammenti di navicelle e satelliti artificiali ormai fuori uso o disintegratisi nel tempo devono essere tenuti accuratamente sotto controllo.

La Rete di Sorveglianza Spaziale degli U.S.A. sta impiegando radar e sensori ottici e infrarossi per seguire le tracce di più di 7500 oggetti spaziali con dimensioni maggiori di 10 cm.

Solamente il 6% di tutti questi oggetti catalogati sono satelliti ancora in attività, mentre oltre il 40% sono frammenti di satelliti disintegrati e stadi superiori di razzi.

A questi vanno aggiunti i frammenti più piccoli, compresi tra 1 e 10 cm, il cui numero oscilla presumibilmente tra 30 mila e 100 mila (Cevolani e Trivellone, 1996).

Si è già iniziato anche ad affrontare il problema di come poter scongiurare un impatto di un asteroide con il nostro pianeta e sono state studiate e proposte varie alternative (Ahrens e Harris, 1992).

L'idea di fondo è che, mentre per oggetti con diametro dell'ordine del centinaio di metri è possibile una deviazione dall'orbita grazie ad un impatto con un razzo dotato di massa sufficientemente elevata (*direct-impact deflection*), per corpi di dimensioni maggiori (1-10 km) è necessario il ricorso ad esplosioni nucleari.

Si tratterebbe, in sostanza, di utilizzare cariche nucleari fatte detonare in prossimità dell'asteroide e sfruttare l'onda d'urto per deviarlo dalla sua traiettoria.

In alternativa, si propone di collocare le cariche direttamente sulla superficie dell'asteroide interessato, ma questa seconda ipotesi potrebbe avere come conseguenza la disgregazione in larghi frammenti, e dunque il permanere di una forte situazione di rischio.

PARTE SECONDA

LE COMETE

1. NOTA STORICA

Il dato storico più facilmente rilevabile a proposito delle comete è senza dubbio tutta quella congerie di superstizioni e credenze popolari che ne facevano minacciosi segni celesti di sventura, situazione nella quale certamente giocava un ruolo fondamentale il carattere decisamente anomalo di questi fenomeni celesti.

A differenza dei pianeti, facilmente identificati sulla sfera celeste, per le comete si trattava di apparizioni improvvise ed imprevedibili, apparentemente al di fuori di ogni possibile regola.

Galileo stesso, nel 1623, le considerava "*apparenze prodotte dai raggi solari*".

La svolta decisiva fu impressa da Newton e Halley alla fine del XVII secolo allorchè, attraverso lo studio dettagliato delle orbite di alcune comete, giunsero alla conclusione che tali orbite erano ellittiche, dunque paragonabili ai moti periodici dei pianeti.

Questo significava che per alcune di esse erano ipotizzabili precedenti passaggi (confermati dall'analisi storica) e prevedibili future apparizioni (puntualmente avvenute).

Ormai a pieno titolo anche le comete entravano a far parte del gruppo di corpi gravitanti attorno al Sole con orbite perfettamente descritte dalle leggi di Keplero.

2. ORIGINE ED EVOLUZIONE

2.1 LA NUBE DI OORT E LA FASCIA DI KUIPER

Pur con l'estrema limitatezza dei dati a disposizione (una ventina di comete a lungo periodo delle quali erano note le orbite originarie), nel 1950 J.H. Oort presentò uno studio sulla provenienza delle comete: oggi, anche se con alcune correzioni, il quadro tracciato dall'astronomo olandese non è stato sostanzialmente modificato.

Con il termine *comete a lungo periodo* si intendono quelle caratterizzate da orbite con periodi superiori a 200 anni e costituiscono la gran parte (84%) delle comete con orbite conosciute.

Esse entrano nella zona planetaria del Sistema Solare con qualsiasi angolazione, inclinazione casuale rispetto all'eclittica, e circa il 50% è caratterizzato da rivoluzione retrograda.

Partendo da queste osservazioni sulla casualità delle caratteristiche orbitali, Oort concluse che la zona di provenienza dovesse essere una NUBE SFERICA; analizzando poi le distanze degli afeli delle comete a lui note nel 1950 determinò il raggio del guscio di maggiore densità di questa nube, quantificandolo in 40.000 U.A.

Tale ipotesi è confermata anche dalle più recenti osservazioni: le orbite delle nuove comete indicano per tutte una provenienza da questa Nube, il cui raggio viene oggi stimato in oltre 50.000 U.A.

Attualmente si distinguono nella Nube di Oort due differenti regioni chiamate rispettivamente NUBE ESTERNA e NUBE INTERNA.

La *Nube Esterna* è più o meno sferica e si estende a partire all'incirca da 20.000 U.A.: la sua popolazione è stimata in 2×10^{12} oggetti, circa il 40% della popolazione originaria.

La *Nube Interna* si stima contenga $2 \times 10^{12} - 10^{13}$ comete; la sua localizzazione è tra 3.000 e 20.000 U.A. e, a differenza di quella Esterna, non avrebbe una forma sferica, ma più schiacciata, a forma di toro.

Nello stesso periodo in cui Oort avanzava la sua teoria, vi era chi ipotizzava l'esistenza di un grande anello di detriti primordiali oltre l'orbita di Nettuno, una sorta di "anello saturniano" che cinge il Sistema Solare, costituito da detriti che non avevano potuto condensarsi in grossi corpi: la teoria proposta nel 1951 da Gerard Kuiper (da cui la definizione di **KUIPER BELT**) e ancora prima, nel 1949, da K.E. Edgeworth, si dimostra oggi corretta anche grazie all'apporto dell'H.S.T.

La Fascia di Kuiper viene attualmente localizzata tra l'orbita di Nettuno e 100 U.A., con la presenza dunque di una lacuna tra la stessa Fascia e la Nube Interna di Oort.

La popolazione caratteristica della Kuiper Belt sarebbe costituita sia da oggetti molto piccoli (raggio di pochi km) che da corpi di dimensioni maggiori (da 50 ad alcune centinaia di km).

La scoperta di questi corpi è praticamente preclusa all'osservazione da Terra, tranne, forse, per quelli di dimensioni maggiori, come dimostrano le scoperte inaugurate da D.Jewitt e J.Luu nel marzo 1992 con l'identificazione di 1992 QB₁.

Indispensabile, pertanto, il ricorso all'osservazione spaziale.

Ed è proprio grazie alle prestazioni consentite dall'H.S.T. che si sono identificati, in orbite situate oltre quella di Nettuno, 29 oggetti il cui raggio, ipotizzando una albedo del 4%, è stato stimato in 5-10 km (Cochran et al., 1995)

Un approccio statistico basato sulle scoperte effettuate fin'ora conduce ad ipotizzare, nella regione compresa tra 30 e 50 U.A., l'esistenza di una popolazione di $\sim 3.5 \times 10^4$ oggetti tipo QB₁ (vale a dire corpi con raggio compreso tra 50 e 200 km) e di una popolazione cometaria (oggetti con raggio di 1-6 km) di $\sim 10^{10}$ elementi (Stern, 1996).

Questi oggetti sembrano confinati in un disco abbastanza sottile nei pressi del piano dell'eclittica, e questo non può che deporre a favore dell'identificazione di questa zona con il serbatoio da cui provengono le *comete a corto periodo* (intendendo con questo termine le comete caratterizzate da orbite con periodo inferiore a 200 anni).

Una ulteriore prova a favore di questa ipotesi proviene dalle integrazioni numeriche: esse hanno mostrato la stabilità dinamica per una significativa frazione degli oggetti che si sono formati nella Kuiper Belt, ma nel contempo hanno evidenziato la possibilità, in seguito a piccole instabilità gravitazionali indotte dai pianeti giganti, che questi oggetti possano rifornire adeguatamente l'attuale popolazione delle comete a corto periodo (Stern, 1996).

L'importanza di queste scoperte (Cochran et al., 1995) risiede nel fatto che è la prima volta che oggetti delle dimensioni delle comete a corto periodo vengono individuati nella loro probabile zona di origine.

Questo significa che per la prima volta si riesce ad identificare su basi osservative una regione del Sistema Solare quale origine delle comete a corto periodo.

Da quanto detto appare evidente come, allo stato attuale, sia ormai considerata certa l'esistenza di un disco di materia nella periferia della zona planetaria, proprio come suggerito da Edgeworth e Kuiper negli anni '50.

Tornando alla ipotesi iniziale di Oort, essa prevedeva che le comete potessero essersi formate nella Fascia Asteroidale ed in seguito allontanate dal Sistema Solare dall'azione gravitazionale di Giove.

Ciò avrebbe richiesto la formazione di un'enorme massa di comete in quanto, statisticamente, quelle espulse definitivamente dal Sistema Solare avrebbero dovuto essere molte di più di quelle rimaste nella Nube di Oort.

Gioca a sfavore di questa ipotesi anche la valutazione della temperatura che doveva prevalere vicino a Giove in quanto porterebbe ad escludere la formazione di molecole più complesse di quella dell'acqua.

Secondo Cameron (1976) le comete si sarebbero formate direttamente nella Nube di Oort; a grandi distanze dal Sole, infatti, il gas in via di collasso della nebulosa solare primordiale non avrebbe avuto la densità sufficiente da permettere una aggregazione in corpi piuttosto

grandi, ecco dunque che tale aggregazione si sarebbe arrestata dando origine ai nuclei cometari.

Lo stesso Cameron, però, suggerisce un possibile meccanismo alternativo: esso prevede che la nebulosa iniziale fosse frazionata, vale a dire costituita da un frammento centrale più grande (che poi darà origine al Sole e al disco protoplanetario) e da frammenti di dimensioni minori (che avrebbero in tal modo originato delle "nebulose cometary") orbitanti attorno ad esso.

Sarebbero queste nebulose (a forma di disco) i luoghi di formazione delle comete, ed è da queste nebulose orbitanti intorno al Sole che verrebbero estratte, attraverso i meccanismi perturbativi descritti più avanti, le comete a lungo periodo (**Figura 2.1**).

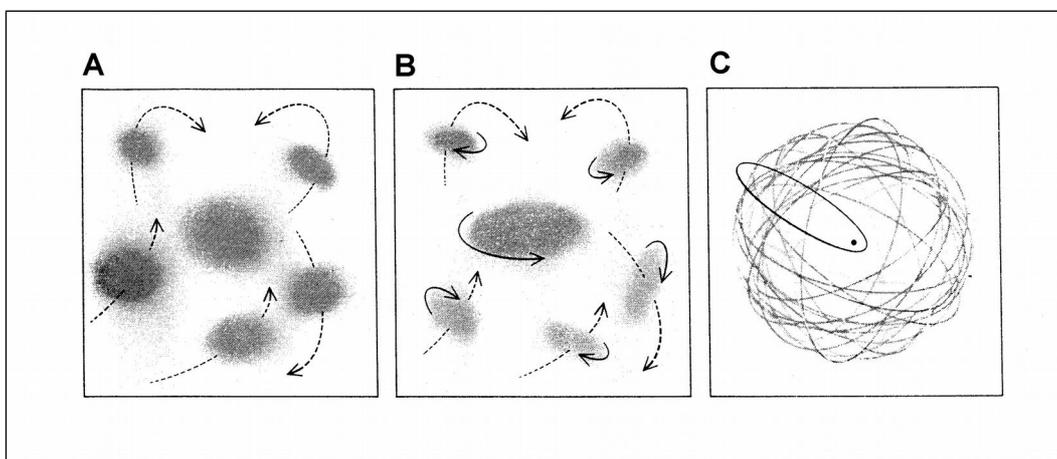


Figura 2.1

Ipotesi di Cameron sulla formazione delle comete:

A) frammenti di nube orbitanti intorno al frammento principale;

B) fase di addensamento (formazione di dischi);

C) situazione dopo la pulizia operata dal vento T-Tauri.

(Da: Cameron, L'origine e l'evoluzione del Sistema Solare, Letture da Le Scienze - Il Sistema Solare nelle esplorazioni spaziali, p.30)

Un'altra ipotesi (Fernandez e Ip, 1983) lega la formazione della Nube di Oort all'aggregazione più lenta di Urano e Nettuno rispetto agli altri pianeti.

Nella zona di formazione di questi pianeti vi era una elevata disponibilità di planetesimi ed il meccanismo di aggregazione era caratterizzato da una bassa efficienza a causa dell'assenza di gas (situazione ben diversa da quella che aveva portato alla rapidissima accrezione di Giove e, successivamente, di Saturno).

Questi due fattori avrebbero fatto sì che i planetesimi potessero risentire degli effetti gravitazionali di Urano e Nettuno (anche se di dimensioni inferiori delle attuali) a tal punto da essere lanciati su orbite già paragonabili a quelle dei corpi costituenti la Nube di Oort.

Si può comunque affermare che la Nube Esterna di Oort segna il confine del Sistema Solare ed è plausibile pensare che essa possa estendersi fino a coprire circa 1/3 della distanza che ci separa da Proxima Centauri, vale a dire circa 80.000 U.A.

E' inevitabile che a queste enormi distanze dal Sole le comete possano facilmente essere perturbate nel loro moto.

I due fattori fondamentalmente ritenuti responsabili della perturbazione del moto sono:

1. Il passaggio ravvicinato in prossimità del Sole **di un'altra stella** (evento che si verifica con frequenze tipiche di alcuni milioni di anni);

2. Forza mareale della Via Lattea, evidenziata dalla tendenza delle nuove comete ad evitare il piano galattico ed i suoi poli.

Il moto del Sole nella Galassia, infatti, è caratterizzato anche da una componente verticale attraverso il disco: nel tempo in cui il Sole effettua una rotazione completa intorno al centro galattico ($T \sim 3 \times 10^8$ anni) esso compie quattro o cinque oscillazioni sopra e sotto il piano galattico (Gratton, 1978), e questi passaggi, con una periodicità di circa 30 milioni di anni, portano una leggera perturbazione nella Nube

Per inciso è proprio questa la periodicità che si tenta di spiegare ricorrendo all'ipotesi-Nemesi in merito alle periodiche estinzioni di massa (periodicità ancora tutta da confermare) che hanno caratterizzato

l'evoluzione biologica sul nostro pianeta e alle quali si è accennato nella parte riguardante gli asteroidi.

Questo "disturbo" della situazione dinamica delle comete può avere conseguenze tra loro opposte: o la cometa viene spostata su un'orbita iperbolica, dunque viene slegata gravitazionalmente dal Sole venendo perciò espulsa dal Sistema Solare, oppure viene sospinta verso la zona dei pianeti dove potrà di nuovo subire profonde modifiche orbitali.

2.2 LE COMETE A CORTO PERIODO

Già si è detto che con questo termine vengono indicate le comete caratterizzate da periodi orbitali inferiori a 200 anni; sottolineiamo che a questa tipologia appartengono tutte le comete che, provenienti, secondo le ipotesi più recenti, dalla Fascia di Kuiper, hanno subito l'influenza gravitazionale dei pianeti, influenza tanto pesante da essere in grado di generare vere e proprie *famiglie* di comete associate a ciascun pianeta.

Non è automatico, però, che il transito nella zona planetaria del Sistema Solare abbia come unico sbocco la cattura di una cometa.

Per ognuna che, per così dire, resta intrappolata nelle regioni interne del Sistema solare ve ne sono sicuramente molte che, immesse su orbite paraboliche o iperboliche, ne vengono irrimediabilmente espulse.

Non è sempre stato così automatico il collegamento tra le comete a corto periodo, e le regioni più periferiche del Sistema Solare (Nube di Oort o Fascia di Kuiper); si è tentato, infatti, più volte di identificare altri serbatoi più vicini al Sole, ma con risultati non sempre accettati dalla comunità scientifica.

Ricordiamo a questo proposito la teoria dell'astronomo sovietico Vsekhsvyatskii che, negli anni '70, ipotizzava un'origine legata ad eruzioni vulcaniche avvenute sui pianeti maggiori o sui loro satelliti (Maftei, 1977).

In quegli stessi anni Rabe ipotizzava che una possibile sorgente delle comete a corto periodo potesse essere identificata nei meccanismi di evoluzione dinamica degli asteroidi Troiani (oggetti in risonanza 1:1 con Giove, dei quali si è già parlato nel capitolo relativo agli asteroidi), la cui somiglianza fisica con i nuclei cometari spenti già aveva portato a ipotizzare un meccanismo inverso, vale a dire la cattura di nuclei cometari da parte di Giove.

Recenti simulazioni dinamiche (Marzari et al., 1995) hanno cercato di valutare in modo attendibile l'efficienza del meccanismo di "evaporazione" dei Troiani quale possibile sorgente delle comete a corto perio-

do, ma le conclusioni non sono esaustive, anche per la scarsa conoscenza dei parametri reali di questi asteroidi.

Resta comunque il dato di fatto che il meccanismo evolutivo collisionale testato si è mostrato in grado di immettere una significativa frazione dei membri delle famiglie simulate in orbite cometary caotiche.

Che i pianeti (soprattutto quelli di massa maggiore o più distanti dal Sole) potessero avere un ruolo importantissimo nella perturbazione delle orbite di altri corpi celesti era già stato supposto da P.S. de Laplace, il quale introdusse a questo proposito il concetto di **sfera di attività**, intendendo con questo termine quella sfera, concentrica al pianeta, entro la quale l'azione gravitazionale del Sole diventava inferiore a quella del pianeta stesso.

Anche un calcolo approssimato della formula di Laplace ci permette di osservare come i pianeti di massa maggiore non siano automaticamente quelli più influenti: nel grafico riportato in **Figura 2.2** si può notare infatti l'importanza che riveste Nettuno grazie alla sua enorme distanza dal Sole (4.5 miliardi di km).

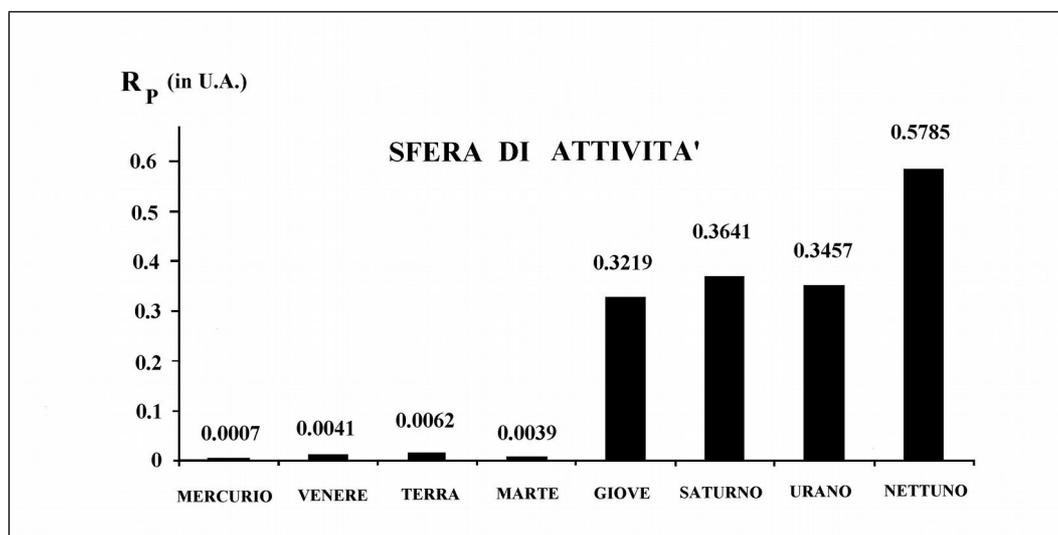


Figura 2.2

Calcolo indicativo del raggio della sfera di Laplace secondo la formula

$$R_p = a_p * (M_p/M_{Sol})^{2/5}$$

Lo studio analitico delle perturbazioni delle orbite è sempre stato oggetto di studio (è l'irrisolto problema degli n corpi della Meccanica Celeste); nel caso delle comete, poi, la situazione perturbativa è notevolmente aggravata dall'esigua massa di questi corpi celesti.

E' evidente che quanto più una cometa si avvicinerà alla sfera di attività di un pianeta, tanto più la sua orbita originaria potrà subire sostanziali modifiche.

Questo, ovviamente, non significa automaticamente trasformazione di una cometa nuova (cioè che proviene per la prima volta dalla Nube di Oort o dalla Fascia di Kuiper) in una cometa a corto periodo, talvolta può comportare, anzi, l'immissione della cometa su un'orbita iperbolica o parabolica (con la conseguente espulsione dal Sistema Solare) oppure su un'orbita di collisione con il Sole o con qualche altro pianeta (il recente impatto della Shoemaker-Levy 9 con Giove del luglio 1994 ne è un esempio).

La situazione dinamica illustrata nella **Figura 2.3** non è riferita ad alcuna cometa reale, ma mostra come dall'orbita originaria la cometa si trasferisca su un'orbita differente e, conseguentemente, quella che in origine era la zona del perielio diventa, a seguito dell'azione del pianeta, l'afelio della nuova orbita.

Se questa azione perturbatrice porta la cometa all'interno della zona planetaria del Sistema solare è inevitabile che il meccanismo descritto in precedenza si ripeta con altri pianeti (Giove ha ora l'influenza maggiore) e si parla in questo caso di **cattura graduale**.

Il meccanismo appena descritto genera per ogni pianeta perturbatore una famiglia di comete, tutte caratterizzate dagli afeli nei pressi dell'orbita del pianeta.

La **Figura 2.4** mostra, a tal proposito, le orbite di alcune comete appartenenti alla famiglia di Giove.

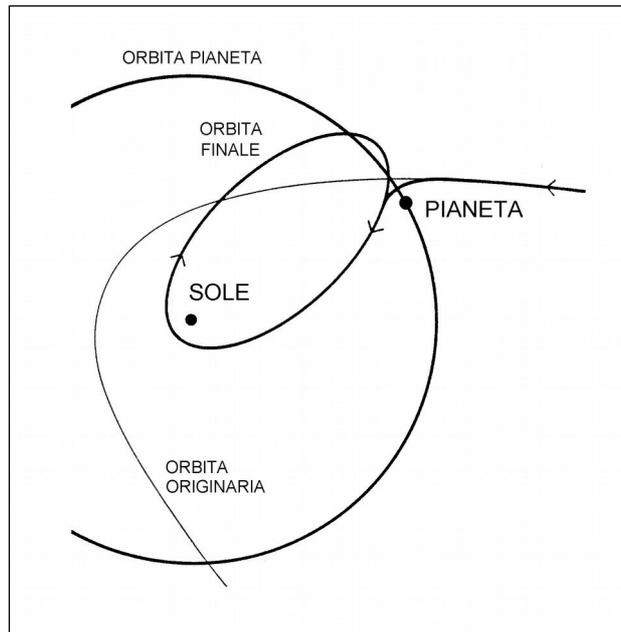


Figura 2.3

Meccanismo di cattura di una cometa da parte di un pianeta.
 (Da: Maffei, I mostri del cielo, p.26, fig.5)

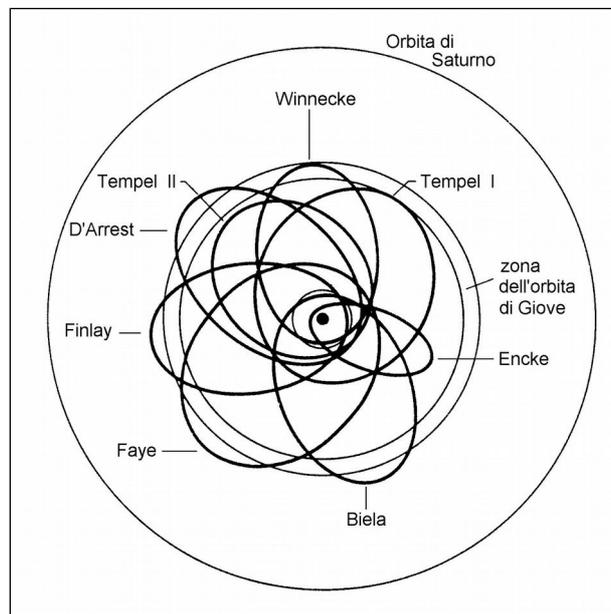


Figura 2.4

Orbite di alcune comete della famiglia di Giove.
 (Da: Maffei, I mostri del cielo, p.27, fig.6)

Si sono sempre avanzati seri dubbi sul fatto che le comete a corto periodo possano aver avuto origine da quel gigantesco serbatoio di comete che è la Nube di Oort.

L'analisi dei loro parametri orbitali (soprattutto il basso valore dell'inclinazione) solleva, infatti, forti perplessità sulla possibilità che un'orbita inizialmente caratterizzata da inclinazione casuale (in quanto proveniente da una Nube sferica) possa essere modificata ed appiattita in modo così efficiente dalle perturbazioni planetarie.

In un recentissimo studio, Stern e Campins (1996) identificano due possibili regioni che costituiscano il serbatoio delle comete a corto periodo:

1. una prima regione è la zona oltre l'orbita di Nettuno (Fascia di Kuiper), nella quale le perturbazioni dei pianeti giganti sono in grado di modificare le eccentricità delle orbite su scale di tempi comparabili all'età del Sistema Solare.

E' questa stabilità del meccanismo su lunga scala, infatti, il criterio principale di identificazione del luogo di origine per le comete a corto periodo.

2. la seconda regione è identificabile con il lento "evaporare" dinamico dei Troiani, ma il meccanismo di estrazione di oggetti da questa seconda zona, stando anche alle simulazioni dinamiche cui si accennava in precedenza (Marzari et al., 1995), sembra molto meno efficiente.

Le recentissime scoperte di oggetti tipo-Halley nella Kuiper Belt (Cochran et al., 1995) e le valutazioni dinamiche sulla popolazione ivi collocata (Stern, 1996) non fanno altro che deporre a favore della prima ipotesi.

L'analisi dinamica, inoltre, suggerisce che la popolazione cometaria non sia primordiale, bensì il prodotto di un processo collisionale a cascata, che ha rifornito il numero di piccoli corpi (~ 1 km) inizialmente carente (Stern, 1996).

Accettando, però, per le comete a corto periodo una origine più prossima a noi della Nube di Oort non possiamo non ipotizzare per esse una composizione chimica che le possa differenziare dalle comete a lungo periodo.

Un tassello certamente da non trascurare di questo mosaico che si va componendo è proprio la recente scoperta della forte presenza di etano (C_2H_6) prodotta dalla zona nucleare della cometa Hyakutake, già interpretata proprio come discriminante di possibili differenziate tipologie di comete (Mumma et al., 1996).

Un dato indiscutibile è, comunque, che l'evoluzione delle comete, soprattutto di quelle a corto periodo, è caratterizzata proprio dalla permanenza nelle vicinanze del Sole.

E' vero che, talvolta, l'influenza della nostra stella si fa sentire in modo pesante anche con le comete a lungo periodo, ma è evidente che sono quelle che effettuano passaggi più frequenti al perielio a dover subire gli influssi più determinanti.

2.3 FASI EVOLUTIVE FINALI

La situazione certamente meno traumatica che possiamo ipotizzare per una cometa è sicuramente quella che prevede l'**esaurimento del materiale volatile** di cui è costituita o l'**impossibilità per i gas di abbandonare il nucleo cometario**.

I ripetuti passaggi in vicinanza del Sole fanno sì che il calore e l'azione del vento solare disperdano nello spazio i materiali volatili e le polveri, dando luogo in tal modo alle spettacolari apparizioni di questi corpi celesti visibili dalla Terra.

La lunghezza della vita di una cometa è dunque, in questo caso, influenzata dalla quantità di materia iniziale e dal ritmo di perdita di massa, fattore, questo, strettamente legato al valore del perielio, al tempo che la cometa trascorre nei dintorni del Sole ed al numero di passaggi su quell'orbita.

Una volta esaurito il materiale volatile, la cometa perderebbe la sua caratteristica essenziale trasformandosi in un corpo tipicamente asteroidale che non modificherebbe la propria orbita, ma risulterebbe difficilmente individuabile dalla Terra.

Da un confronto di orbite cometarie con alcune orbite di asteroidi (soprattutto alcuni N.E.A.) emerge qualcosa di più di un semplice sospetto che si possa trattare di nuclei di comete a corto periodo ormai spenti catturati dall'azione perturbatrice della Terra o sospinti in questa orbita dai già citati meccanismi dinamici delle risonanze secolari.

Di questa possibilità si è già parlato a proposito dell'asteroide 4179 Toutatis e del gruppo dei Tauridi.

Un confronto grafico tra l'orbita della cometa Encke e quella dell'asteroide 2212 Hephaistos (un oggetto Apollo, appartenente anch'esso ai Tauridi, che, con diametro di 8.7 km, è probabilmente il maggiore degli Earth-crosser conosciuti) ci permette di notare la effettiva somiglianza delle due orbite (*Figura 2.5*).

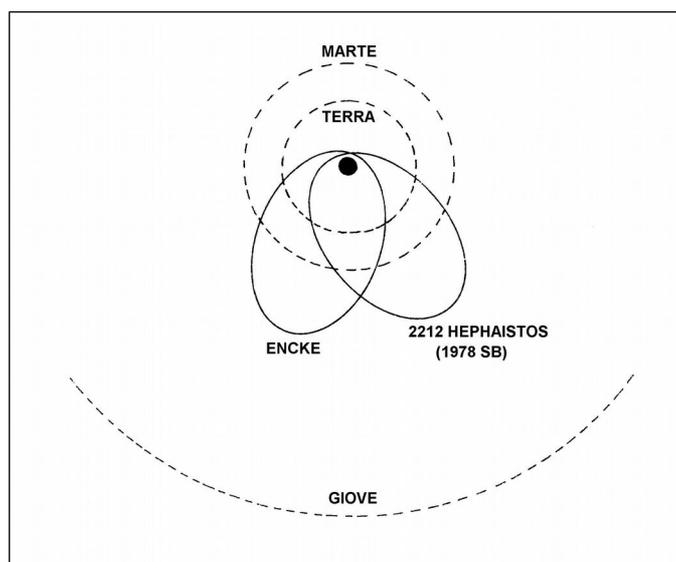


Figura 2.5

Confronto indicativo tra le orbite della cometa Encke e dell'asteroide 2212 Hephaistos.

(Da: Pancaldi, Vagabondi del cielo, p.90)

Situazione analoga all'esaurimento del materiale volatile si ha anche nel momento in cui la crosta di materiale inerte sulla superficie del nucleo raggiunge un tale spessore da impedire ogni ulteriore fuoriuscita di materiale volatile.

Un secondo possibile scenario per la fine di una cometa può essere quello che comporta una **modifica della struttura** del corpo celeste.

Con questo termine intendo un duplice fenomeno: da una parte una frammentazione limitata del nucleo cometario, dall'altra una polverizzazione totale, e di ambedue queste situazioni possiamo avere riscontri osservativi.

Un esempio della frammentazione limitata del nucleo è costituito dalla Ikeya-Seki (1965), che penetrò nella corona solare passando a circa 450 mila km dalla superficie del Sole, e al suo riapparire mostrò il nucleo spezzato in due.

La differenziazione dei due nuclei cometari era completa, come dimostra il fatto che le due nuove comete erano caratterizzate da periodi diversi (878 e 1.055 anni).

Un secondo esempio ancora più eclatante della possibilità di frammentazione del nucleo di una cometa è rappresentato dalla cometa West (1975), il cui nucleo si suddivise in 4 parti dando luogo così ad altrettante nuove comete.

L'ultimo evento di questo tipo è avvenuto verso la metà di novembre 1995 ed ha riguardato la cometa Schwassmann-Wachmann 3.

Questa cometa era tra quelle osservate con particolare cura perchè avrebbe potuto essere un possibile obiettivo di una missione spaziale dell'ESA riguardante lo studio ravvicinato di un nucleo cometario (Missione ROSETTA in programma nel primo decennio del prossimo secolo).

Dalla osservazione della Schwassmann-Wachmann 3 (Osservatorio di Meudon) erano emersi nel settembre-ottobre 1995 alcuni dati inattesi, vale a dire una intensa produzione di molecole di ossidrile OH ed un elevato incremento di magnitudine (una luminosità circa 1000 volte maggiore del previsto).

L'osservazione effettuata con strumenti più potenti e con l'impiego del CCD (ESO 3.5 m NTT) ha messo in evidenza (12.12.1995) la frammentazione del nucleo in 3 distinte parti, alle quali se ne aggiungeva una quarta scoperta con osservazioni nel lontano IR (10 micrometri).

Della frammentazione questa volta non si può incolpare Giove (come nel caso della Schoemaker-Levy), ma la causa è presumibilmente da imputare a stress termici che hanno interessato l'interno del nucleo in occasione del passaggio al perielio (settembre 1995) ad una distanza di 0.93 U.A. dal Sole.

La presenza di grosse fenditure nella struttura del nucleo avrebbe consentito, nel momento di maggiore irraggiamento, l'evaporazione di una grande quantità di materiale interno e questo fenomeno avrebbe ulteriormente ingrandito le crepe scatenando in tal modo il processo disgregativo.

Il verificarsi della frammentazione del nucleo ha come inevitabili risvolti non solo la riduzione di massa del nucleo cometario con la conseguente riduzione della vita della cometa (anche se questo è certamente l'aspetto più evidente), ma anche il forte squilibrio strutturale indotto dalle fratture, responsabili di situazioni molto più catastrofiche.

E' il caso della cometa di Biela, una cometa a corto periodo (6.7 anni) scoperta nel 1826, accomunata a rilevazioni di passaggi antecedenti (rispettivamente del 1772 e del 1805) ed in seguito osservata regolarmente fino al 1845, anno in cui si verificò il fenomeno di frammentazione del nucleo in 2 parti.

Le due nuove comete furono osservate nuovamente al passaggio successivo (1852), ma poi se ne perse ogni traccia.

Il dato importante è che nel 1877 fu osservata una fitta pioggia meteorica (*stelle cadenti*), subito collegata da G. Schiaparelli con il transito della Terra in una zona molto prossima all'orbita originaria della cometa di Biela; tale evento si ripeté nel 1885 e l'interpretazione ipotizzata fu quella di una distruzione profonda del nucleo della cometa, i cui detriti si stavano disperdendo nello spazio.

Molti eventi di questo tipo sono tutt'ora osservabili, come si può notare dalla seguente tabella:

Nome Sciame	Massimo	Cometa associata
Liridi	21 Aprile	Thatcher (1861 I)
Eta Acuaridi	5 Maggio	Halley (1910 II)
Draconidi	26 Giugno	Pons-Winnecke (1858 II)
Beta Tauridi	30 Giugno	Encke (1819 I)
Capricornidi	1 Agosto	1948 n
Perseidi	12 Agosto	Swift-Tuttle (1862 III)
Draconidi	10 Ottobre	Giacobini-Zinner (1933 III)
Orionidi	22 Ottobre	Halley (1910 II)
Tauridi	1 Novembre	Encke (1819 I)
Leonidi	16 Novembre	Tempel-Tuttle (1866 I)
Andromedidi	22 Novembre	Biela (1852 III)
Ursidi (UMI)	22 Dicembre	Tuttle (1858 I)

La terza causa della scomparsa di una cometa può identificarsi nella **modifica dell'orbita**, fatto che può comportare sia la possibile espulsione dal Sistema Solare (vale in questo caso ciò che si è detto a proposito della cattura di una cometa), sia l'evento più traumatico di un impatto con un altro corpo celeste (fatto non così raro come può sembrare).

La presenza di piccoli crateri perfettamente allineati (ne sono stati osservati su Callisto, Ganimede e sulla Luna stessa) fu inizialmente interpretata come causata dalla ricaduta di materiale a seguito di un impatto di un grosso asteroide (avvenuto in modo radente per giustificare l'asimmetria della struttura), ma si evidenziavano spesso grosse difficoltà nell'identificazione del cratere primario, le cui dimensioni, tra l'altro, avrebbero dovuto essere tutt'altro che trascurabili.

L'evento Shoemaker-Levy (luglio 1994) ha, però, fatto abbandonare quest'ipotesi facendo propendere per la distruzione di nuclei cometari provocata dall'azione di marea del pianeta a seguito di un passaggio ravvicinato (entro il limite di Roche).

Il calcolo del tasso di distruzione di comete da parte di Giove è stato affrontato da Melosh e Schenk, i quali hanno calcolato una media di un evento ogni 80 anni; hanno avanzato anche ipotesi riguardo alla Terra (un evento ogni 20 mila anni), ma in questo caso la statistica è ridotta a soli due casi rilevati sulla superficie del nostro satellite (Lamberti, 1996).

E' recente l'annuncio della scoperta di una catena di crateri da impatto anche sulla Terra, in Ciad.

I crateri sono stati scoperti grazie alle immagini radar del sistema Spaceborn Imaging Radar C/X-band Synthetic Aperture Radar installato a bordo dello Shuttle Endeavour nell'aprile e nell'ottobre 1994: le immagini rivelano appunto due nuovi crateri (da confermare con analisi del terreno) presso quelli già conosciuti e chiamati Aorouga nel nord del Ciad.

L'identificazione di questi segni da impatto è però ancora soggetta ad indagini e non ha ancora ottenuto una conferma definitiva, anche se vi è già chi (A. Ocampo del J.P.L. e K. Pope del Geo Eco Arc Research)

ipotizza per l'evento una datazione di 360 milioni di anni fa (epoca per altro interessata da una delle grandi estinzioni di massa che hanno caratterizzato la storia del nostro pianeta) (Caprara, 1996).

Permangono comunque ancora molti dubbi circa l'origine cometaria in quanto il meccanismo di distruzione mareale funziona perfettamente anche nel caso di asteroidi non compatti, formati da più corpi tenuti assieme dalla reciproca gravità.

3. MORFOLOGIA E FENOMENI FISICI CONNESSI

3.1 IL MODELLO DI WHIPPLE

Il modello comunemente accettato all'inizio del secolo prevedeva che le comete fossero costituite da un insieme di particelle di materiale meteoritico, di natura estremamente porosa, contenenti una notevole quantità di gas molecolare che, liberato dall'azione del Sole, originava la chioma.

Tale modello, denominato *a mucchio di ghiaia*, trovava la sua ragione d'esistere nell'analisi spettroscopica della chioma ed in quella chimica e morfologica del materiale meteoritico (la cui provenienza era da tempo associata a comete ormai distrutte); il problema della stabilità gravitazionale (considerato cruciale per garantire la sopravvivenza all'azione del Sole) fu risolto nel 1902 da O. Callandrea che dimostrò come per una nube tipica (10 km di raggio e 10^{17} g di massa) la stabilità gravitazionale era garantita (Tempesti, 1985).

Una seria obiezione a questo modello proveniva dalla difficoltà a poter garantire il mantenimento della chioma per tutta la durata del passaggio della cometa accanto al Sole.

Dagli spettrogrammi si può, infatti, ricavare il numero di molecole di C_2 della chioma, stimabile in questo modo in 10^{35} - 10^{37} .

Si ritiene inoltre che la vita media di una molecola della chioma sia inferiore a un giorno, il che significa che ogni giorno la chioma viene completamente rinnovata.

Da analisi di laboratorio si è potuto stimare che il materiale meteoritico a temperatura ordinaria adsorbe mediamente 10^{19} molecole per grammo, il che comporta, ipotizzando un nucleo di 10^{18} g, un totale di 10^{37} molecole adsorbite.

Se assumiamo che il numero totale di molecole sia 10 volte quello di C₂, secondo la teoria del mucchio di ghiaia si ottiene che la chioma potrebbe essere alimentata per un solo giorno...

Nel 1950 F.L. Whipple mise in discussione tale modello e ne propose uno nuovo, *la palla di neve sporca*.

Whipple in sostanza scartava il concetto di nucleo cometario come aggregato di materiale meteoritico legato dalla gravità introducendo al suo posto un nucleo compatto composto di ghiaccio e di materiale non volatile.

Nel modello di Whipple 1 grammo di ghiaccio può produrre da 10²² a 10²³ molecole, il che comporta una disponibilità teorica di 10⁴⁰- 10⁴¹ molecole e dunque una possibile attività cometaria per un tempo da 10³ a 10⁴ volte più lungo.

Nel delineare le caratteristiche del suo modello, Whipple inizia dall'analisi delle temperature di fusione ed ebollizione delle molecole ritenute responsabili della formazione della chioma:

	CH ₄	CO ₂	NH ₃	C ₂ N ₂	H ₂ O
Melting point (°K)	90	217	198	239	273
Boiling point (°K) *	111	195	240	252	373

* at 1 atm

Non appena il nucleo si avvicina al perielio, la radiazione solare vaporizza i ghiacci vicino alla superficie.

Il materiale meteorico con dimensioni al di sotto di un certo limite viene espulso a causa della bassa attrazione gravitazionale del nucleo e da' origine alla formazione di sciami meteorici.

Si può verificare che alcune particelle più grandi o di maggiore densità vengano rimosse dallo shock termico, ma normalmente esse resteranno sulla superficie producendo in tal modo uno strato isolante:

questo sarebbe il responsabile della sostanziale riduzione della perdita di gas del nucleo nei passaggi successivi della cometa.

Se tutta la radiazione solare venisse assorbita, un oggetto sferico posto ad 1 U.A. dal Sole perderebbe in un anno per vaporizzazione dalla sua superficie uno strato di ghiaccio di circa 4 metri.

Bisogna tener presente, però, che se il materiale meteorico è una aggregazione a grana grossa e debolmente cementata, la conduzione del calore sarà bassissima a causa della ridotta superficie di contatto tra le particelle che costituiscono lo strato superficiale del nucleo.

Questo comporta una riduzione del coefficiente di trasmissione del calore di un fattore 10^4 rispetto a quello di un corpo solido compatto, rendendo trascurabile questa modalità di trasferimento del calore tranne che all'interno delle stesse particelle.

Il meccanismo più efficiente per il trasferimento del calore solare dalla superficie del nucleo al suo interno sembra dunque identificabile con la normale radiazione a bassa temperatura assorbita dalle particelle meteoriche.

La parte più interna del nucleo cometario sarà sempre estremamente fredda, non solo per la descritta bassa conduttività termica, ma anche perchè il calore disponibile è stato impiegato nella vaporizzazione, un meccanismo estremamente efficace di refrigerazione nel vuoto.

Oltre alla produzione e al mantenimento della chioma nel corso di un passaggio, vi erano altri 3 fatti cruciali per i quali il modello precedente era inadeguato:

1. La presenza di comete che si avvicinano moltissimo al Sole e non vengono completamente disintegrate.

Il calore dovrebbe far sublimare tutte le sostanze adsorbite e gran parte dello stesso materiale meteorico che le compone; inoltre le forze mareali disperderebbero facilmente i piccoli corpi componenti il nucleo.

2. La presenza di comete periodiche.

Il *banco di ghiaia* non potrebbe adsorbire nuovo materiale per rimpiazzare quello espulso nel passaggio precedente, e questo data la bassissima densità dello spazio interplanetario.

3. Il moto talvolta non gravitazionale delle comete.

Il modello allora vigente non consentiva di spiegare come mai alcune comete anticipavano il ritorno dalla loro orbita ed altre, invece, lo ritardavano; la Encke, ad esempio, anticipa mediamente ogni suo ritorno al perielio di 2 ore e mezza rispetto all'istante calcolato tenendo conto di tutte le perturbazioni gravitazionali, mentre la Halley ad ogni ritorno è in ritardo di circa 4 giorni.

Il modello proposto da Whipple superava brillantemente i tre ostacoli che avevano messo in difficoltà il modello precedente:

1. Un corpo compatto con le dimensioni di un nucleo cometario riesce a passare nelle vicinanze del Sole, senza volatilizzare del tutto, ma solamente in un sottile guscio esterno.

E' certamente possibile che si possano verificare delle fratture del nucleo (fatto avvenuto per la cometa Ikeya-Seki), ma non la sua completa dispersione.

2. Se il nucleo è composto principalmente di ghiacci, non ha la necessità di dover rimpiazzare lungo l'orbita il materiale che, sublimando, ha dato origine alla chioma in quanto la massa stimata di un nucleo cometario compatto può abbondantemente rendere ragione dei numerosi passaggi delle comete periodiche.

3. Che la causa del moto "non gravitazionale" delle comete potesse essere identificata con una forza di reazione conseguente alla espulsione di gas dal nucleo era stato proposto da Bessel nella prima metà

del secolo scorso (si contrapponeva all'ipotesi che proponeva l'esistenza di un mezzo resistente interplanetario), ma i calcoli escludevano che i gas liberati nel modello a mucchio di ghiaia potessero avere intensità sufficiente.

Nel modello di Whipple, invece, le velocità termiche di espulsione delle molecole dal nucleo a seguito della sublimazione di ghiacci (con valori dell'ordine di decine di m/sec) possono giustificare la presenza di un effetto-razzo; nella cometa di Halley, ad esempio, sono stati rilevati dalla sonda Giotto veri e propri getti di gas e polveri uscenti da fessure presenti nella crosta superficiale del lato del nucleo rivolto verso il Sole.

L'anticipo o il ritardo del ritorno al perielio di una cometa può essere spiegato proprio ricorrendo a questo effetto-razzo ed alla presenza di una rotazione del nucleo. (**Figura 2.6**)

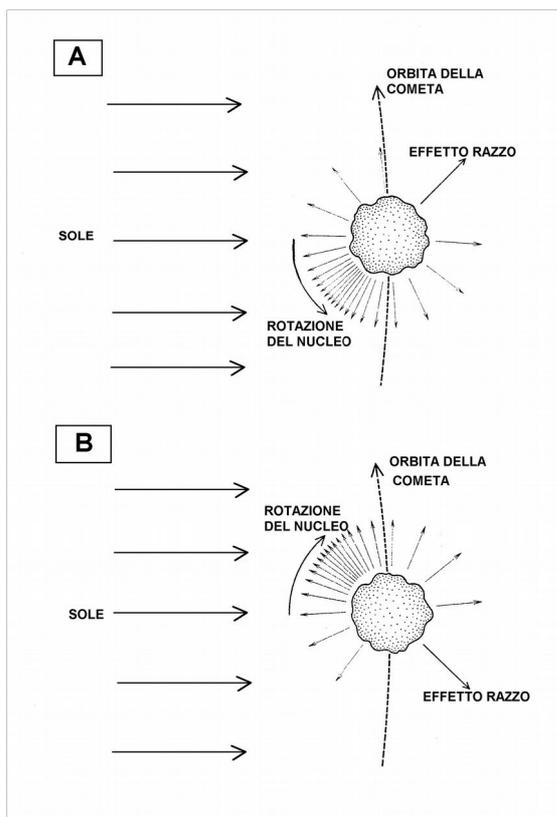


Figura 2.6

Spiegazione dell'effetto-razzo.

A) se la rotazione del nucleo è concorde con il moto di rivoluzione, la reazione del getto spingerà la cometa in avanti sull'orbita, allargandola, facendo in tal modo aumentare il periodo (ritardo al passaggio successivo).

B) se il nucleo ruota in direzione opposta al suo moto orbitale intorno al Sole, l'effetto-razzo causerà una forza frenante che spingerà la cometa verso l'interno in direzione del Sole, con la conseguente diminuzione del periodo (anticipo al passaggio successivo).

(Da: Whipple, La natura delle comete, Letture da Le Scienze "Il Sistema Solare nelle esplorazioni spaziali, p.285)

Una cometa è dunque sostanzialmente composta da un **nucleo**, costituito da un agglomerato di ghiacci e polveri la cui struttura interna ci è sconosciuta, orbitante intorno al Sole; l'innalzamento della temperatura incontrato nel moto di avvicinamento al perielio provoca l'evaporazione dei ghiacci e la conseguente espulsione dal nucleo di materiale volatile e polvere che va a costituire la **chioma**.

L'interazione di questa struttura con il campo magnetico interplanetario e con il vento solare origina una scia visibile denominata **coda**, rivolta sempre, come una banderuola segna-vento in direzione opposta al sole (*Figura 2.7*).

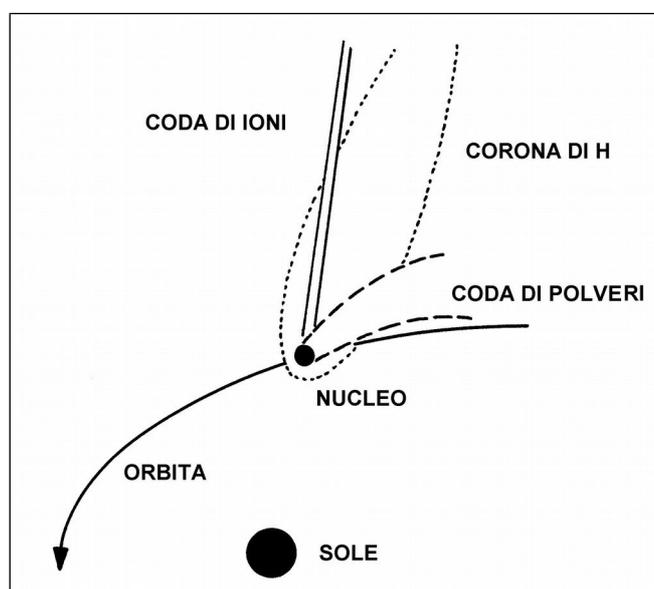


Figura 2.7

Schema di una cometa.

(Riprodotta da: Hamilton, <http://bang.lanl.gov/solarsys/comet.htm>)

Ritengo molto interessante, prima di passare ad analizzare la morfologia delle parti che compongono una cometa (nucleo, chioma e coda) presentare una tabella che riporta le abbondanze relative delle sostanze gassose, volatili (ghiacci) e non volatili (alla temperatura terrestre ordinaria) nei corpi del Sistema Solare verificando in tal modo la consistenza della teoria dell'origine del Sistema stesso.

	Gassose	Volatili	Non volatili
Sole	0.99	0.015	0.0025
Pianeti terrestri	tracce	tracce	1.0
Giove	0.9	0.1	tracce
Urano/Nettuno	tracce	0.85	0.15
Comete	tracce	0.90	0.10

(Da: Tempesti, *Giornale di Astronomia*, VOL.11, N.2, 145; 1985)

Una seconda tabella (desunta dai dati ottenuti dall'esplorazione ravvicinata della cometa Halley) permette un ulteriore confronto tra il materiale cometario ed i valori tipici del sistema solare analizzando i rapporti isotopici di alcuni elementi.

Tale raffronto consente di esprimere due considerazioni:

1. la sostanziale concordanza dei parametri della Halley con quelli riferiti al Sistema Solare per carbonio, azoto e zolfo non può che confermare l'origine "solare" del materiale cometario;

2. la discordanza nel caso del rapporto deuterio/idrogeno può essere interpretata in termini evolutivi, nel senso che l'intensa fotodissociazione dell'acqua produce la liberazione di enormi quantità di idrogeno, e questo fenomeno interessa preferenzialmente l'idrogeno normale, più leggero rispetto al deuterio; da qui l'incremento della quantità relativa di quest'ultimo. (Guaita, 1990).

	Halley	Sistema Solare
D/H	5×10^{-4}	10^{-5}
C₁₂/C₁₃	80±20	89
N₁₄/N₁₅	250±100	270
S₃₄/S₃₂	0.045±0.01	0.044

(Da: *L'Astronomia*, 98, 30; 1990)

3.2 IL NUCLEO

Ciò che stupisce maggiormente quando si voglia affrontare l'analisi di un nucleo cometario è l'impossibilità di una sua osservazione diretta.

Quando la distanza da noi potrebbe essere favorevole per una sua agevole osservazione, infatti, è completamente avvolto e nascosto dalla chioma che esso stesso ha originato; quando, al contrario, tale chioma è assente, il nucleo cometario si trova già ad una distanza tale da non poter essere rilevato per le sue ridotte dimensioni.

Un fenomeno così appariscente come quello associato ad una cometa trova dunque la sua origine in un oggetto celeste che al confronto non può che risultare "deludente"...

Le dimensioni attualmente stimate per i nuclei cometari vanno da alcune centinaia di metri a poche decine di km, stima confermata anche dall'analisi ravvicinata compiuta dalla sonda Giotto della cometa Halley nel marzo 1986 che ha reso possibile determinare le misure del nucleo in 15 x 7.2 x 7.2 km.

A proposito della forma irregolare del nucleo della Halley mostrato dalla Giotto, è tutt'altro che semplice comporre tra loro l'ipotesi che la forma del nucleo dipenda da un meccanismo di sublimazione preferenziale in certe zone e il fatto (rilevato sia dalla Giotto che dalle Vega) che il massimo di attività nel nucleo della Halley sia localizzato proprio agli estremi dell'ellissoide.

Sembra dunque preferibile ipotizzare che la cometa sia nata già di forma irregolare come un agglomerato di frammenti. (Keller e Thomas, 1989).

La stessa missione Giotto ha anche quantificato l'emissione di gas in 2×10^7 g/sec e quella di polvere in $0.3-1.0 \times 10^7$ g/sec.

Da questi dati si può desumere che ogni passaggio della cometa di Halley nei pressi del Sole comporta una perdita di 10^{14} g.

Poichè la stima della massa totale della cometa suggerisce un valore di 10^{17} g, la valutazione dei dati è in grado di confermare abbon-

dantemente i numerosi passaggi della Halley nei secoli scorsi.

Un altro dato estremamente significativo procurato dall'osservazione ravvicinata del nucleo della Halley è il suo colore scuro, in grado di riflettere solamente il 4% della luce solare incidente.

Dopo aver citato la missione Giotto ricordiamo, per dovere di precisione, che il primo incontro di una sonda spaziale con una cometa è stato quello dell'International Cometary Explorer (ICE) l'11 settembre 1985 con la Giacobini-Zinner.

Continuando nell'analisi del nucleo cometario, la **Figura 2.8** schematizza la sua struttura in modo molto significativo e trova sostanziali conferme nelle immagini inviate a Terra dalla sonda Giotto.

Vi si possono notare i vari processi che ne hanno modificato la morfologia iniziale: i più importanti dal punto di vista osservativo sono certamente le fratture che lasciano fuoriuscire i gas e le polveri destinate ad alimentare la struttura della chioma e della coda.

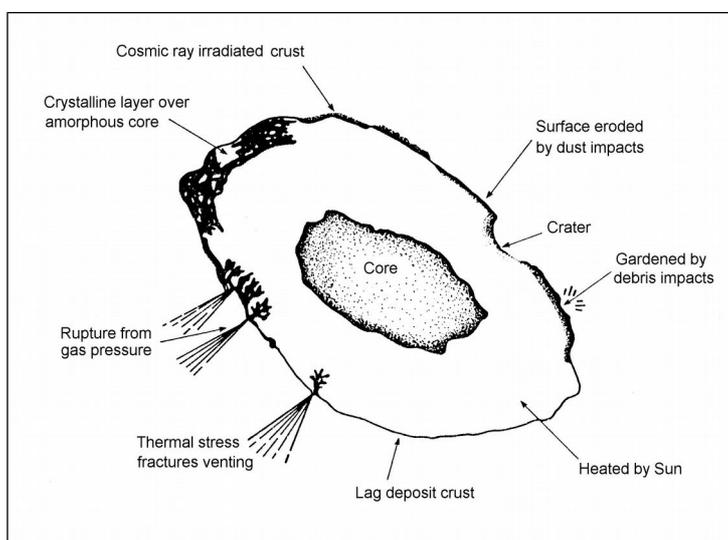


Figura 2.8

Rappresentazione di un nucleo cometario.

(Da: Taylor, Solar System Evolution, p.124, fig.3.10.1)

Un dato importante ottenuto dal fly-by di Giotto è la localizzazione delle zone di sublimazione dei gas, zone che appaiono ben delimitate e corrispondono ad una superficie attiva valutabile in circa il 10% della superficie nucleare.

Da osservazioni radar effettuate sulla cometa Hyakutake è risultato un nucleo di soli 1-3 km, il che fa supporre, data l'intensa attività manifestata, che la porzione di superficie nucleare attiva sia ben superiore al 10% rilevato per la Halley (Cremonese, 1996).

E' fuori dubbio che, una volta esaurita la riserva interna di ghiaccio, oppure nell'impossibilità di fuoriuscita di materiale sublimato a causa della presenza di una sorta di *crosta protettiva*, l'aspetto del nucleo non sarà molto dissimile da quello di un asteroide, ed a questo proposito già si è accennato al fatto che talune classi di asteroidi si presume possano essere nuclei cometari ormai inattivi.

Un ultimo aspetto da sottolineare riguardo al nucleo di una cometa è rappresentato dall'analisi della sua rotazione.

Nella descrizione del modello di Whipple si è già evidenziato che la rotazione del nucleo, associata all'effetto-razzo, è fondamentale per interpretare i movimenti cosiddetti non gravitazionali (anticipi e ritardi) delle comete.

L'ipotesi della rotazione del nucleo si basava inizialmente solo su argomentazioni di tipo statistico (non si conosce nessun corpo celeste che non sia dotato di rotazione), ma l'affinarsi delle tecniche fotometriche (studio delle curve di luce) ha contribuito non poco a confermare i dati teorici.

Permangono talvolta alcuni dubbi nel quantificare con precisione il periodo di rotazione, ma questo dipende dalle evidenti difficoltà osservative legate alle ridotte dimensioni del nucleo, alla sua forma spesso fortemente irregolare ed alla possibile imprevedibilità del meccanismo di emissione di gas e polveri in seguito ad una variazione di reattività al calore solare.

Per la Halley, ad esempio, vi sono indicazioni contraddittorie tra la periodicità di 53 ore suggerita dall'osservazione della riga Lyman-alfa dell'H (confermata dalle immagini ottiche riprese da Giotto), e la periodicità di 7.4 giorni rilevata da misure fotometriche nelle bande del C₂, del CN e dell'OH.

3.3 LA CHIOMA

E' l'elemento morfologico che da' il nome a questi corpi celesti.

Il primo aspetto da evidenziare riguardo la chioma è la sua enorme estensione rispetto al nucleo; per essa, infatti, pur nella impossibilità di effettuare una misura univoca, si possono ipotizzare, al momento del massimo sviluppo, dimensioni tipiche comprese tra 30 mila e 100 mila km.

E' costituita dai gas espulsi dal nucleo e le variazioni delle sue dimensioni nell'avvicinamento al Sole dipendono da due meccanismi tra loro contrastanti: da un lato l'innalzamento della temperatura, che, aumentando la produzione di gas dal nucleo, tende ad estenderla, dall'altro la maggiore pressione di radiazione che tende a ridurla.

La chioma di una cometa è formata da tre gusci concentrici: procedendo dal nucleo verso l'esterno incontriamo un primo ridotto involucro chiamato CHIOMA INTERNA (o chioma molecolare), successivamente la CHIOMA INTERMEDIA (o chioma dei radicali) ed infine un enorme guscio chiamato CHIOMA DI IDROGENO.

La struttura e le dimensioni tipiche di una chioma sono schematicamente indicate nella **Figura 2.9**, notiamo comunque che i valori riportati sono indicativi ed estremamente variabili da una cometa all'altra, come si può evincere anche dalla seguente tabella (i valori riportati sono i diametri espressi in km).

Nome della cometa	Chioma Visibile	Chioma di H
Tago-Sato-Kosaka (1969 IX)	500 mila	15 milioni
Bennett (1970 II)	900 mila	2 milioni
Encke	400 mila	1 milione

(Dati desunti da: Tempesti, *Giornale di Astronomia*, VOL.11, N.2, 145; 1985)

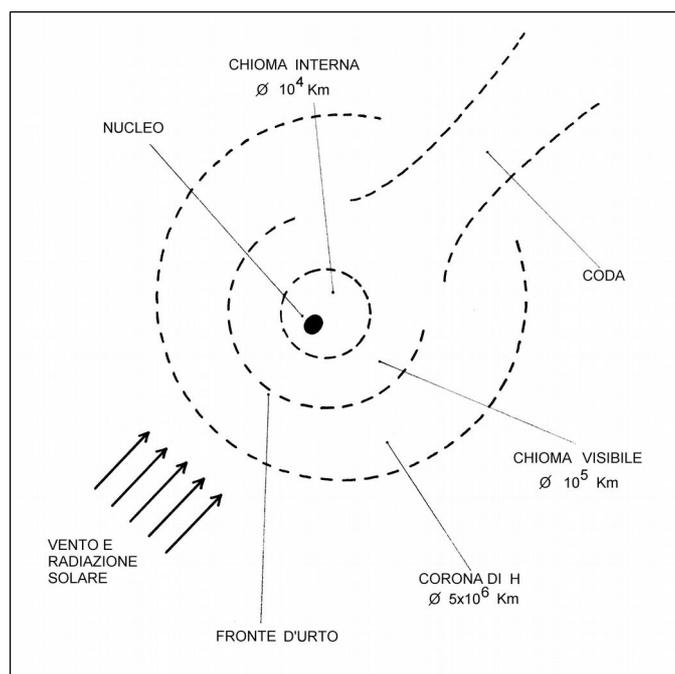


Figura 2.9

Struttura della chioma di una cometa (disegno non in scala).
(Adattato da: Tempesti, *Giornale di Astronomia*, **11**, p.152, fig.2)

La formazione della chioma è l'elemento che consente di individuare le comete tramite osservazione visuale quando ancora si trovano in media a circa 3 U.A. dal Sole.

E' alla ricerca della nebulosità della chioma che volge la sua attenzione il cacciatore di comete, una figura più che mai attuale, come conferma la circostanza che la recentissima cometa 1996 B2 (una delle ultime scoperte in ordine di tempo) è stata individuata il 31.01.96 da un fotoincisore giapponese, Yuji Hyakutake.

A proposito di cercatori di comete è interessante annotare che il *Catalogo di Messier* del 1784 (la prima raccolta di oggetti galattici ed extragalattici di particolare evidenza ottica) è nato proprio come "promemoria" per non considerare erroneamente come cometa una nebulosa o un ammasso stellare.

Parlando della individuazione visuale delle comete è opportuno fare una breve considerazione sulla luminosità di questi corpi celesti.

Se il nucleo fosse un oggetto inattivo alla luce solare, la sua magnitudine dipenderebbe dalla distanza dal Sole (r) e dell'osservatore (Δ) secondo una proporzionalità quadratica, suggerendo una relazione del tipo

$$m = m_0 + 5 \log (\Delta) + 5 \log (r).$$

Ma il nucleo è fortemente reattivo alla radiazione solare e dunque la relazione precedente deve essere sostituita da

$$m = m_0 + 5 \log (\Delta) + 2.5 n \log (r)$$

nella quale la dipendenza è del tipo r^n .

Nella maggior parte dei casi il valore di n è compreso tra 2.5 e 11.5, è dunque molto variabile da una cometa all'altra e, spesso, anche per una stessa cometa.

A questo proposito basterà ricordare la forte delusione associata alla cometa Kohoutek (1973, XII) per la quale il valore di n stimato inizialmente (4.0) avrebbe dovuto portarla alla magnitudine apparente -3; il parametro n , invece, diminuì fino al valore 2.0 e ciò portò la cometa nel momento di massima luminosità soltanto alla 4^a magnitudine.

Fin dalle prime osservazioni spettroscopiche (ad opera di G.B. Donati e W. Huggins nel 1864) risultò che la chioma è costituita da composti del carbonio, dell'idrogeno, dell'ossigeno e dell'azoto.

Nelle chiome di comete che si portano molto vicino al Sole sono state inoltre rilevate le righe di emissione di metalli allo stato atomico quali Na, K, Mn, Cu, Fe, Co e Ni, provenienti certamente dalla vaporizzazione del materiale meteoritico del nucleo.

La coppia di righe gialle del Na fu rilevata per la prima volta analizzando la cometa 1882 II in prossimità del perielio, situato solamente a 0.06 U.A. dal Sole.

L'analisi dettagliata delle sostanze rilevate nelle chiome delle comete ha, fin dall'inizio, suggerito che le molecole osservate non sono quelle fuoruscite dal nucleo, il che comporta che le molecole espulse dal nucleo sono inizialmente più complesse (vengono dette anche **molecole-madri**); esse costituiscono la chioma interna, struttura non direttamente accessibile alle osservazioni.

Queste molecole-madri originano, in seguito alla dissociazione provocata dalla radiazione solare, le cosiddette **molecole-figlie** che costituiscono l'involucro intermedio o chioma visibile.

L'abbondanza spettroscopica dell'ossidrile OH⁺ ed il fatto che venisse rilevato un forte aumento di luminosità e di estensione della chioma a distanze inferiori a 3 U.A. (distanza alla quale si raggiunge una temperatura che consente l'evaporazione del ghiaccio d'acqua) induceva a concludere che proprio il ghiaccio d'acqua fosse quello prevalente tra i ghiacci cometari, ma suggeriva anche la presenza sicura di Idrogeno.

La conferma venne nel 1970 quando il satellite OAO2 per mezzo di osservazioni nell'ultravioletto rilevò attorno alla chioma della Tago-Sato-Kosaka (1969, IX) un enorme involucro di Idrogeno, inosservabile da Terra.

Dall'analisi dei dati relativi a varie comete, rilevati anche da satelliti, si può desumere che l'acqua costituisca circa 80% delle molecole emanate dal nucleo.

Oltre all'acqua, fra le molecole-madri si ha, in quantità però decisamente minore, l'anidride carbonica (CO₂), l'acido cianidrico (HNC), l'ammoniaca (NH₃), il cianuro di metile (CH₃CN) ed il metano (CH₄).

Da osservazioni radio della cometa Hyakutake è emersa la presenza di abbondante emissione (2.2×10^{26} molecole/sec) di etano (C₂H₆) con il picco sulla regione nucleare.

Ed è proprio la localizzazione di questa abbondante produzione a far considerare l'etano come molecola-madre e non prodotto di dissociazione (Cremonese, 1996).

M.J. Mumma e collaboratori (Goddard Space Flight Center) interpretano tale abbondanza come discriminante per ipotizzare due diverse tipologie di comete, caratterizzate da differente luogo di provenienza: quelle ricche di etano si sarebbero formate in regioni più calde del Sistema Solare, mentre le comete prive di questo idrocarburo si sarebbero formate in regioni più fredde (Mumma et al., 1996).

Le molecole-figlie sono principalmente, oltre al radicale OH, il carbonio bimolecolare (C_2) che origina le *bande di Swan*, il cianogeno (CN) e l'ossido di carbonio ionizzato (CO^+).

Ha destato qualche perplessità la scoperta (27.03.1996) di emissione X dalla cometa Hyakutake rilevata dal satellite orbitante tedesco ROSAT (IAUC 6373).

Si tratta della prima cometa in assoluto in cui si osserva la produzione di radiazione X.

Per questa emissione, localizzata in una regione rivolta verso il Sole, sono già state avanzate tre ipotesi: la prima prevede un meccanismo di cattura di raggi X di origine solare da parte di una nuvola di molecole di acqua e successiva riemissione in un processo di fluorescenza, la seconda ipotesi lega la produzione di raggi X a fenomeni di violenta interazione tra il vento solare ed il materiale cometario e la terza spiega il fenomeno come riflessione di raggi X di origine solare ad opera di grani sub-microscopici di polvere espulsi dal nucleo (Caprara, 1996; Cremonese, 1996).

3.4 LA CODA

Pur essendo, per tradizione, il tratto caratteristico (e certamente più spettacolare) di una cometa, non sempre la coda accompagna l'apparizione di questi corpi celesti.

E' in ogni caso molto raro, poi, che essa giunga a proporzioni così ragguardevoli come nel caso della Ikeya-Seki (1965 VIII), una cometa la cui coda ha raggiunto l'eccezionale lunghezza di quasi 1 U.A.

Che la coda fosse in qualche modo collegata con l'emissione di materia dal nucleo sospinta da generiche forze repulsive solari era stato ipotizzato fin dall'inizio del secolo scorso (Olbers e Bessel) anche in forza del dato osservativo che suggeriva sempre per la coda un orientamento volto in direzione opposta al Sole, il che comporta che la coda segua il nucleo durante l'avvicinamento al perielio, ma lo preceda nella fase di allontanamento dal Sole.

Già alla fine dell'800 questa forza veniva identificata con la pressione esercitata dalla radiazione elettromagnetica.

L'analisi spettroscopica delle code cometarie mostra la presenza di due componenti distinte: coesistono, infatti, sia uno spettro continuo di tipo solare, sia uno spettro a bande luminose.

L'interpretazione che ne deriva è che il continuo sia dovuto a riflessione della luce solare ad opera del pulviscolo (espulso dal nucleo assieme ai gas), mentre quello in emissione sia causato da gas eccitato dalla radiazione solare.

Questa duplice natura diventa evidentissima in alcuni casi (ad esempio la cometa Mrkos, 1957 V) in cui si è potuto notare una vera e propria biforcazione della coda cometaria.

Oltre che l'analisi spettroscopica, dunque, anche l'osservazione visuale permette di identificare la tipologia della coda: nel caso della *coda di polveri* si può notare una struttura ad arco, mentre la *coda di plasma* è caratterizzata da una struttura rettilinea disposta lungo la congiungente Sole-cometa.

La tipica forma arcuata della coda di polveri si spiega grazie all'azione di tre componenti: la velocità della cometa nel suo moto orbitale, la forza gravitazionale (attrattiva) esercitata dal Sole sui granuli di polvere e la pressione di radiazione (repulsiva).

Il rapporto tra le ultime due rimane praticamente costante, a pari dimensioni delle particelle, a qualunque distanza dal Sole poichè entrambe variano con l'inverso del quadrato della distanza.

Non è costante, invece, la velocità della cometa nella sua orbita, per la quale vale la terza legge di Keplero.

Questo comporta essenzialmente due conseguenze per la coda di una cometa in avvicinamento al Sole: anzitutto un aumento delle sue dimensioni, e, in secondo luogo, la maggiore evidenza del fenomeno della curvatura della coda di polveri.

Fin verso la metà del secolo si è tentato di applicare lo stesso meccanismo per spiegare le code di plasma; le molecole, però, non hanno nei confronti della radiazione il comportamento puramente meccanico del pulviscolo, ma coinvolgono processi di assorbimento e riemissione della radiazione che solamente lo sviluppo della Meccanica Quantistica ha potuto definire.

La soluzione del problema, giudicata valida ancora oggi, fu formulata negli anni '50 da L.F. Biermann che identificò nel vento solare (fondamentalmente composto da protoni ed elettroni emessi dal Sole con una velocità di 500 km/sec) la causa dell'origine delle code di gas delle comete; furono proprio i fenomeni osservati in queste code a dare indicazioni e fornire prove sull'esistenza di una radiazione solare di tipo corpuscolare.

In questa ottica si riescono a spiegare le repentine disconnessioni e successivi ricongiungimenti (più volte osservati) della coda di plasma dal nucleo; il vento solare, infatti, essendo costituito da nubi disomogenee di cariche elettriche in moto, genera campi magnetici rapidamente variabili nel tempo, ed in essi si muovono lungo traiettorie non sempre lineari le particelle costituenti le code.

In seguito alla missione spaziale destinata allo studio della cometa Giacobini-Zinner (I.C.E.) durante il suo passaggio del 1985, si sono raccolti dati che hanno reso possibile ipotizzare la struttura della coda.

Essa era formata da due lobi distinti, ognuno di essi composto da linee di campo magnetico che si estendevano dalla chioma; i due lobi erano dotati di opposta polarità e tra di essi vi era un "divisorio" di corrente elettrica (**Figura 2.10**).

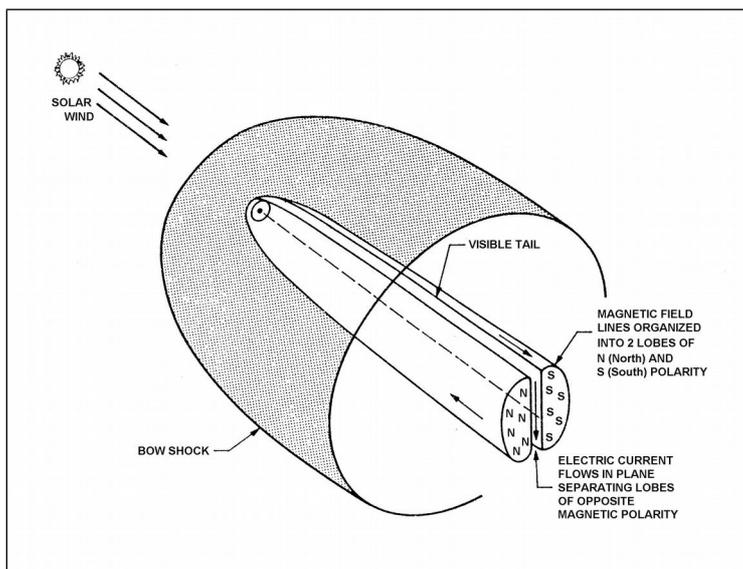


Figura 2.10

Interpretazione grafica delle caratteristiche di base associate all'interazione della cometa Giacobini-Zinner con il vento solare.

Contrariamente a quanto rappresentato, non è stata individuata alcuna onda d'urto di prua (*bow-shock*) nelle vicinanze del nucleo.

(Da: AA.VV. The comet Giacobini-Zinner handbook, p.I-8, fig.I-4)

Questa struttura traeva origine dall'interazione della ionosfera cometaria con le linee del campo magnetico interplanetario.

L'azione del vento solare generava poi una struttura complessa, un avvolgimento delle linee di campo intorno al nucleo "*come di spaghetti su una forchetta*". (Von Roseninge et al., 1986).

PARTE TERZA

KUIPER-BELT OBJECTS

1. NOTA STORICA

L'incertezza sulla definitiva completezza del Sistema Solare non venne totalmente cancellata dalla scoperta di Plutone, per molti anni, anzi, continuò la ricerca di un nuovo pianeta, molto enfaticamente chiamato Pianeta X (dove X significava sì "decimo", ma aggiungeva una giusta dose di "mistero"...).

Il principale argomento che spronava i ricercatori era la certezza che le irregolarità nei moti di Urano e Nettuno non potevano venire ascritte al minuscolo Plutone, di massa troppo piccola per assicurare anche una minima rilevabile perturbazione gravitazionale.

Vennero pertanto attivate ricerche notevoli ed impegnative di oggetti celesti giacenti nei pressi del piano dell'eclittica, ma i ripetuti insuccessi hanno finito con lo scoraggiare anche i più accaniti sostenitori dell'esistenza del decimo pianeta.

Tombaugh stesso ha esaminato praticamente tutto il cielo visibile dall'Osservatorio Lowell ed è giunto alla conclusione che possa anche esistere un pianeta come Plutone, ma solamente ad una distanza superiore a 60 U.A.

I calcoli effettuati (quasi sempre basati sulle anomalie di Urano e Nettuno) hanno portato alcuni astronomi a determinare le caratteristiche fisiche ed orbitali di questo ipotetico pianeta, ma i risultati ottenuti sono spesso in contrasto tra loro.

Anche Kowal ha effettuato calcoli analoghi, ed è giunto ad una singolare conclusione:

"Ho ottenuto predizioni perfettamente ragionevoli dell'orbita del pianeta sconosciuto usando sia i residui di Urano sia, successivamente, quelli di Nettuno: l'unico problema è che le due predizioni non vanno molto d'accordo tra loro..." (Littmann, 1989).

Alcune delle "predizioni" relative al Pianeta X sono riportate nella seguente tabella:

	Harrington	Powell	Gomes	Andersonn
Massa (M_T)	4	0.35	0.49	5
Distanza (A.U.)	101.2	34.6	44	79-100
T (anni)	1019	204	292	700-1000
Eccentricità	0.411	0.335	0.05	notevole
Inclinazione	32.4	5.43	bassa	bassa
Magnitudine	14	14	14-15	?

(Da: Littmann, *Sky & Telescope*, 6, 596; 1989)

Il disegno delle orbite di tre di questi "candidati" è riportato nella **Figura 3.1**: notiamo che per due di essi è già pronto persino il nome che dovrà avere allorchè venisse scoperto...

Anche dall'analisi delle comete furono tratte argomentazioni per ipotizzare un pianeta trans-plutoniano.

Considerando le comete a corto periodo, in base a caratteristiche orbitali simili si erano identificate delle famiglie che potevano essere associate ad un pianeta ed in tal modo nel 1950 Schütte assegnò a Giove 52 comete, a Saturno 6, a Urano 3, a Nettuno 8 e a Plutone 5; mise inoltre in evidenza una famiglia di altre 8 comete e le associò ad un ipotetico nuovo pianeta.

Considerando poi la media delle distanze afeliche delle comete di ciascuna famiglia, Schütte notò come vi era uno scarto di circa il 10% rispetto alla distanza afelica del pianeta associato; applicando lo stesso

criterio statistico alla famiglia senza pianeta, ipotizzò per quest'ultimo una distanza dal Sole di 77 U.A. (Maffei, 1977).

Inutile dire che anche in questo caso la ricerca del pianeta non diede alcun frutto.

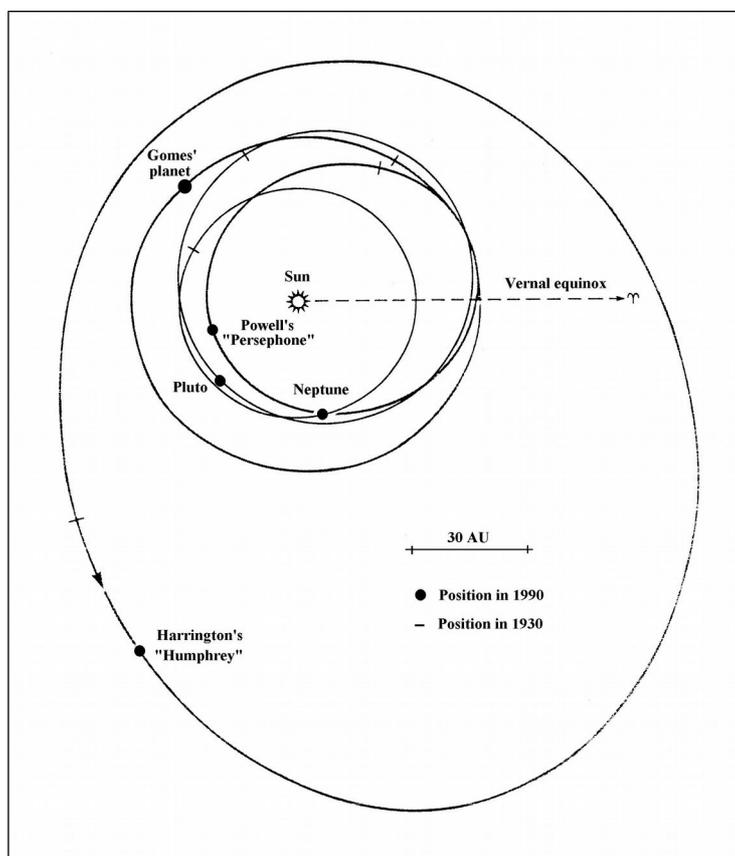


Figura 3.1

Orbite di tre ipotetici oggetti candidati ad essere il Pianeta X.

(Da: Littmann, *Sky & Telescope*, Dec. 1989, p.598)

Questa situazione di stallo venne in qualche modo superata nel 1977, anno in cui C. Kowal dell'Osservatorio di Monte Palomar scoprì Chirone.

Dal dicembre 1976 al febbraio 1985 si era svolta, infatti, una ricerca sistematica di oggetti insoliti del Sistema Solare.

Si trattava di una ricerca basata sul confronto per mezzo di un blink comparator di lastre fotografiche, prese in notti successive, nelle quali

la magnitudine limite strumentale era circa 20.

Ed è stata proprio questa campagna osservativa (160 campi stellari) che ha portato alla scoperta di Chirone (ottobre 1977) e di altri oggetti di natura asteroidale e cometaria.

La tabella seguente sintetizza i risultati della ricerca:

OBJECTS FOUND DURING THE SOLAR SYSTEM SURVEY		IAUC
<i>Asteroids</i>		
1976 YB	Pallas type; $i=31$, $e=0.25$	
(2101) Adonis	Recovered Feb. 1977	3041
1977 HB	Apollo type; $q=0.7$	3066
(2060) Chiron	Found near aphelion; 17.8 U.A.	2139
1978 TB	Trojan asteroid	
1980 RB1	Mars crosser	
1980 RG1	Amor type	3522
1980 RM1	Mars crosser	
1980 WF	Amor type; $q=1.08$	3549
1981 QB	Amor type; $q=1.08$	3631
<i>Comets</i>		
P/Taylor B	Recovered Dec. 1976	3033
1977 f	Found April 1977; $q=4.65$	3066
P/Jackson-Neujmin	Recovered Nov. 1978	3311
1979 h	Found July 1979; $q=2.28$	3395
1983 t	Kowal/Vavrova; Found May 1983	3868
1984 n	Kowal/Mrkos; Found April 1984	3988

(Da: Kowal, *Icarus*, 77, 122; 1989)

Certamente Chirone non poteva essere nè per dimensioni nè per posizione il misterioso pianeta ricercato per anni, ma cominciò con il tempo a profilarsi l'idea che potesse trattarsi del prototipo di una nuova classe di oggetti celesti che, assieme a milioni di oggetti molto piccoli, formasse quell'anello di detriti primordiali ipotizzato da Kuiper ed Edgeworth intorno al 1950.

Il termine utilizzato per identificare tali planetesimi ghiacciati è quello generico di **KUIPER-BELT OBJECTS**, anche se Stern (1992) ha pittorescamente coniato il termine di **ICE DWARFS**, sintetizzando in tal modo le caratteristiche principali di questi piccoli e ghiacciati corpi celesti.

Grande importanza nell'individuazione di tali oggetti assume l'impiego dell'H.S.T. in forza delle limitazioni imposte dall'atmosfera, che rendono l'osservazione e la scoperta da Terra veramente problematiche.

E' recente, proprio grazie all'H.S.T., l'identificazione di moltissimi oggetti in movimento sul piano dell'eclittica ad una distanza superiore a quella di Plutone (IAUC 6163, 1995 April 17).

2. IL SISTEMA PLUTONE-CARONTE

E' sintomaticamente proprio da Plutone e dal suo satellite Caronte che possiamo iniziare l'analisi di questa nuova popolazione di oggetti del Sistema Solare: sono molti, infatti, i problemi irrisolti che il sistema del nono pianeta ci sottopone, e altrettante le nuove prospettive.

A proposito della classificazione di Plutone come pianeta, non credo si possa dissentire da Taylor (1992) quando afferma che vi sono due ragioni fondamentali per le quali non si possa accordare a Plutone lo status di pianeta, vale a dire la massa estremamente ridotta del sistema Plutone-Caronte (1.36×10^{25} g equivalenti a sole 0.0023 masse terrestri) e l'orbita fortemente inclinata ($i = 17.2$ gradi) ed eccentrica ($e = 0.250$).

Ma non sono solamente queste le caratteristiche che fanno di Plutone un oggetto decisamente anomalo.

Infatti:

1. la sua orbita è in risonanza 2:3 con quella di Nettuno, e questo garantisce che, pur intersecandosi le orbite di questi due corpi celesti, non si determini una collisione.

2. i calcoli del suo moto orbitale su un periodo di 845 milioni di anni, effettuati da G.J. Sussman e J.L. Wisdom del MIT, indicano che l'orbita di Plutone è caotica: questo rende possibile che si sia formato altrove ed abbia assunto l'orbita attuale nel corso della sua evoluzione (Binzel, 1990).

3. il suo piano equatoriale è inclinato di 122 gradi rispetto al piano orbitale, situazione simile a quella riscontrabile per Urano.

4. la sua densità è molto elevata rispetto alla densità tipica dei corpi gravitanti a così elevata distanza dal Sole: fanno eccezione, oltre a Plutone, il suo satellite Caronte e Titano, satellite di Nettuno.

A questo proposito bisogna, però, osservare che i risultati ottenuti dallo studio delle occultazioni reciproche di Plutone e Caronte, verificatesi nel periodo 1985-1990, sono talvolta discordanti con quelli ricavati dalle occultazioni stellari che forniscono valori di densità inferiori, dunque un più elevato rapporto ghiaccio/roccia.

Il dato oggi accettato è di $2.029 \pm 0.032 \text{ g/cm}^3$ (Tholen e Buie, 1990), e rende Plutone molto simile a Tritone, ma gli elementi di somiglianza tra questi due corpi sono anche altri, come si può notare dalla seguente tabella:

	TRITONE	PLUTONE
Diametro	2705 km	2330 km
Rotazione	retrograda	retrograda
Periodo di rotazione	5.9 giorni	6.4 giorni
Densità	2.07 g/cm^3	2.02 g/cm^3
Composizione superficie	ghiaccio di metano e azoto	ghiaccio di metano

(Da: Lang e Whitney, Vagabondi nello spazio, pag. 288)

La considerazione di queste somiglianze ha portato ad ipotizzare una origine comune, identificata nel sistema satellitare di Nettuno: il sistema sarebbe stato drasticamente perturbato da un incontro con un corpo esterno di grande massa, che avrebbe anche causato la perdita di Plutone (Harrington e Van Frandern, 1979).

La distruzione di un sistema regolare di satelliti come quello iniziale di Nettuno è possibile, però, solo ipotizzando una massa del proiettile dell'ordine di 2-5 masse terrestri.

Altri aspetti problematici dell'ipotesi-urto sono:

1. bisogna postulare l'esistenza di un oggetto planetario del quale non vi è traccia osservativa;
2. l'orbita di Nettuno non mostra traccia di un incontro ($e < 0.01$)
3. la probabilità di una fuga di un satellite tipo Plutone è estremamente ridotta.

La valutazione di questi fatti porta ad identificare il responsabile della distruzione del sistema planetario di Nettuno proprio nella cattura di Tritone (Farinella, Milani et al., 1980).

La cattura, avvenuta probabilmente non molto tempo dopo la sua formazione, ha collocato Tritone su un'orbita retrograda intorno a Nettuno e ciò ha costituito per il satellite l'inizio di forti sollecitazioni gravitazionali.

Le forze mareali devono averne riscaldato l'interno, e forse si possono attribuire a questo fenomeno le strane e complesse strutture visibili sulla superficie del satellite (Binzel, 1990).

Ricordiamo, a questo proposito, che le immagini della superficie alle quali Binzel si riferisce sono quelle inviate dalla sonda Voyager 2 che il 25 agosto 1989 ha sorvolato Tritone ad una distanza di meno di 40.000 km.

Altrettanto carico di aspetti problematici è il sistema planetario Plutone-Charonte.

Le dimensioni del satellite (caso unico nel Sistema Solare, paragonabile forse, con la dovuta cautela, al sistema Terra-Luna) sono la metà di quelle del pianeta, e la sua massa ne è circa il 20%: non si conoscono meccanismi di accrezione che possano originare una coppia di corpi celesti mutuamente gravitanti di dimensioni così simili tra loro.

L'origine del sistema può pertanto essere identificata solo con un meccanismo di tipo collisionale, ipotizzando, cioè, che Plutone e Charonte abbiano avuto un'origine indipendente e che siano giunti a formare l'attuale sistema in seguito ad un urto reciproco (Stern, 1992).

Ipotesi certamente esaustiva, ma che offre il fianco ad una analisi di tipo statistico: quante sono le probabilità di una collisione tra due oggetti delle dimensioni di Plutone e Charonte?

Stern (1992) le considera praticamente nulle su tutta l'età del Sistema Solare, ma propone una possibile via d'uscita ipotizzando l'esistenza di una numerosa popolazione di oggetti tipo-Plutone.

Per poter considerare l'evento della collisione sufficientemente probabile (probabilità del 50% che si verifichi almeno una volta in 4.5 miliardi di anni) sarebbero necessari un migliaio di questi oggetti nella regione compresa tra 20 e 30 U.A.

Analogo discorso vale per la cattura di Tritone cui si accennava in precedenza: solo la presenza di molte centinaia di "Tritoni" renderebbe l'evento sufficientemente probabile (Stern, 1992).

Attualmente queste ipotesi statistiche vengono rese più percorribili dalle scoperte che, a ritmo incalzante, hanno concretizzato l'ipotesi dell'esistenza della Kuiper Belt (Cochran et al., 1995; Stern, 1996).

Comincia, dunque, a farsi strada l'idea che Plutone rappresenti il corpo di dimensioni maggiori (tra quelli fino ad ora conosciuti) degli oggetti che costituiscono la Fascia ipotizzata da Kuiper ed Edgeworth (Luu e Jewitt, 1996).

3. 2060 CHIRONE ED I CENTAURI

Chirone è forse uno dei corpi più anomali sia fisicamente che dinamicamente tra quelli conosciuti del Sistema Solare: percorre in 51 anni un'orbita fortemente eccentrica ($e = 0.3786$), con afelio posto a 18.9 U.A. e perielio a 8.5 U.A.

Al momento della sua scoperta (Kowal, 1977), Chirone fu classificato come asteroide e venne collocato nella classe tassonomica C, ma destò subito qualche perplessità sia la collocazione spaziale (prevalentemente tra Urano e Saturno), sia il tipo di orbita, più di tipo cometario che asteroidale.

La sua peculiarità era stata in qualche modo riconosciuta fin dalla sua scoperta, allorchè Marsden (IAUC 3129) lo soprannominò "*Slow Moving Object Kowal*".

Inizialmente il suo diametro era stimato tra 150 e 400 km (Stern; 1992), ma recenti osservazioni (Altenhoff e Stumpff, 1995) effettuate nelle onde millimetriche (250 GHz) fanno ipotizzare per Chirone un diametro di circa 170 km.

Le perplessità su Chirone, però, non provengono solamente dalla discordanza registrata tra dimensioni tipicamente asteroidali ed un'orbita di tipo cometario: osservazioni compiute tra il 1986 ed il 1988 indicavano senza ombra di dubbio variazioni di luminosità sicuramente attribuibili alla perdita di materiali volatili (Meech e Belton, IAUC 4770, 1989).

Chirone, in altre parole, aveva iniziato a sviluppare una chioma mostrando in tal modo una spiccata natura cometaria.

Erano state ipotizzate anche altre cause responsabili della variazione di luminosità osservata, quali la possibile forma irregolare o una variazione di albedo superficiale, ma la spiegazione in termini di produzione di una chioma cometaria era quella più convincente (Hartmann et al., 1990).

E non deve meravigliare il fatto che lo sviluppo della chioma avvenga ad una distanza così elevata dal Sole (circa 12.6 U.A.) dal momento che Meech e Jewitt nel 1987 avevano rilevato una chioma attorno alla cometa Bowell quando si trovava ancora a 13.6 U.A., e questa è, finora, la maggiore distanza in assoluto per l'osservazione di una chioma.

Tale osservazione è consistente con la sublimazione da CO₂ ghiacciato.

Tuttavia il "record" della distanza per emissione cometaria potrebbe di nuovo toccare a Chirone, con 17.5 U.A., se venissero interpretate in tal senso le osservazioni del 1978 compiute da Bowell e Hewitt (Hartmann et al., 1990).

Sottolineiamo che, se si trattasse di una cometa, sarebbe senza dubbio caratterizzata da un nucleo di dimensioni di gran lunga maggiori di quello delle altre comete conosciute (circa 15 volte più grande del nucleo della cometa Halley).

Qualche perplessità ha suscitato la mancanza di chioma in occasione del suo ultimo passaggio al perielio (osservazioni compiute il giorno 8.02.96) e tale comportamento potrebbe essere ricondotto al meccanismo di espulsione dei gas e delle polveri tipico delle comete, fenomeno che non riguarda, come si è visto, l'intera superficie, ma solo piccole regioni attive.

Per Chirone si presume che la superficie interessata all'attività di produzione della chioma sia < 1% dell'intera superficie, ed il fatto che la sua attività sia stata più intensa all'afelio porta necessariamente a concludere che essa non dipenda solamente dalla distanza eliocentrica (Stern, 1996).

E' stata, in ogni caso, l'evidenza di questi fenomeni tipicamente cometari che ha suggerito per Chirone una interessantissima spiegazione: si potrebbe trattare dell'anello di congiunzione tra le comete ed i planetesimi ghiacciati che popolerebbero il Sistema Solare oltre Nettuno.

A rafforzare questa ipotesi è intervenuta, negli ultimi anni, la scoperta di oggetti celesti caratterizzati da orbita ed evoluzione dinamica simili a quelle di Chirone, indicati con il termine di **CENTAURI**.

Essi sarebbero caratterizzati da dimensioni intermedie tra quelle tipicamente cometarie (1-20 km) e quelle dei piccoli pianeti ghiacciati quali Plutone (~2300 km) e Tritone (~2700 km).

La tabella seguente riassume alcune caratteristiche orbitali e fisiche dei Centauri conosciuti:

OGGETTO	a (UA)	e	i	Perielio (UA)	Diametro (km)	T rot. (h)
2060 CHIRONE	13.70	0.38	25	8.46	182±10	5.92
5145 PHOLUS	20.30	0.57	7	8.68	185±22	9.98
1993 HA ₂	24.73	0.52	16	11.84	62 (*)	
1994 TA	16.82	0.31	5	10.69	28 (*)	
1995 DW2	25.03	0.25	4	18.84	68 (*)	
1995 GO	18.14	0.62	18	6.79	60 (*)	

(*) valutato assumendo una albedo geometrica del 5% (valore medio per le superfici cometarie)

(Da: Stern e Campins, *Nature*, **382**, 507; 1996)

Il fatto che solo a due degli oggetti riportati nella tabella sia stato attribuito un nome è legato alla consuetudine che, prima di assegnare un nome ad un nuovo oggetto celeste, venga con precisione determinata la sua orbita.

La scoperta relativamente recente, e dunque la necessità di effettuare ulteriori misure astrometriche, è perciò il motivo per il quale quattro di essi vengano identificati con le sigle assegnate nel momento della loro prima individuazione.

Gli studi sull'evoluzione dinamica delle orbite di oggetti provenienti dalla Fascia di Kuiper predicono l'esistenza, nella regione compresa tra 5 e 30 U.A. dal Sole, di una popolazione in equilibrio dinamico stimabile in $5 \times 10^5 - 10^6$ comete e ~30-300 oggetti tipo-Centauri con diametro di 100 km o maggiore, in orbita tra i pianeti giganti.

Essa deriverebbe da una popolazione 10^4 volte più numerosa, un grande bacino costituito appunto dalla Fascia di Kuiper (Stern, 1996).

In un recentissimo lavoro Luu e Jewitt (1996) studiano le diversità di colore tra i Centauri e gli oggetti della Kuiper Belt e concludono affermando di non aver rilevato significative differenze.

Questo non significa aver dimostrato che la Fascia di Kuiper sia il luogo di origine dei Centauri, ma è certamente una ulteriore prova in questa direzione.

L'importanza dei Centauri, in quanto oggetti provenienti dalla Fascia di Kuiper, è enorme, e ci sono due buone ragioni per affermarlo:

1. data la loro prossimità al Sole, essi risultano molto più luminosi (e dunque offrono possibilità maggiore di studio) di tutti gli altri oggetti provenienti dalla Fascia di Kuiper;

2. nel corso della loro orbita, a differenza degli altri Kuiper-belt objects, la cui situazione dinamica li mantiene in zone caratterizzate da temperature anche inferiori a 60-70 °K, giungono a sperimentare temperature di 120-150 °K e questo spiega la possibilità di rilevare attività riconducibili a fenomeni di sublimazione, fatto evidenziato fino ad ora solamente per Chirone.

Le analisi fino ad ora compiute sui Centauri mostrano talvolta alcune discrepanze tra i parametri fisici: se la superficie di Chirone, infatti, può essere considerata grigia (vale a dire neutra), non è così per Pholus e per 1993 HA₂ risultati estremamente rossi.

Nello studio appena citato, Luu e Jewitt sviluppano l'idea che le diversità di colore riscontrate siano da attribuire ad un meccanismo di rinnovamento superficiale dovuto ad episodi di collisione (*collisional resurfacing*) che contrasta con l'arrossamento causato dall'azione dei raggi cosmici sui composti organici delle superfici.

L'impatto, infatti, porterebbe in superficie del materiale non ancora bombardato dai raggi cosmici, dunque di colore più chiaro della restante superficie visibile.

Non si esclude, però, l'ipotesi che i differenti colori possano indicare diversa composizione chimica, dovuta a diversificati luoghi di origine.

Poichè la densità superficiale della Fascia di Kuiper è stimata (Stern, 1996) dell'ordine di quella della Fascia Principale degli asteroidi (vale a dire $\sim 3 \times 10^{23}$ g/UA²), zona nella quale si è visto come il processo di collisione giochi un ruolo evolutivo molto importante, è logico potersi aspettare che un oggetto proveniente da questa zona porti ancora sulla sua superficie i segni di recenti impatti.

Questa considerazione depone a favore dell'idea che Chirone (provenendo dalla Kuiper Belt) occupi la sua attuale orbita da tempi più recenti rispetto ad altri Centauri, da ciò discende che l'azione dei raggi cosmici non avrebbe ancora avuto modo di cancellare (arrossando il colore) le zone superficiali messe allo scoperto dagli impatti.

Questa sua origine più recente troverebbe conferma nella presenza di quella attività cometaria assente, invece, negli altri oggetti ad esso simili.

Un ulteriore elemento che confermerebbe l'ipotesi dell'immissione recente di Chirone nella sua orbita attuale proviene proprio dall'analisi dinamica dell'orbita stessa, che risulta instabile e caotica su scale di tempi di poche migliaia di anni.

Il fatto, poi, che Chirone abbia incontri ravvicinati con Saturno su scale temporali del migliaio di anni, rende questo corpo celeste molto simile a Phoebe, satellite di Saturno con dimensioni di 160 km, che occupa la sua attuale posizione probabilmente in seguito ad un episodio di incontro ravvicinato che si è concluso con la sua cattura da parte del pianeta, evento testimoniato anche dalla sua orbita retrograda.

Tale somiglianza, poi, si manifesta anche nelle dimensioni e nel colore superficiale.

Emerge, quindi, l'evidenza che le nostre conoscenze relative alle zone più esterne del Sistema Solare siano sul punto di essere radicalmente modificate.

Non si tratta solamente di aggiungere un altro corpo celeste al gruppo dei pianeti (prospettiva che stava alla base della ricerca del Pianeta X), ma di rivedere l'intero modello aggiungendo una nuova numerosissima popolazione.

4. UNA POPOLAZIONE TUTTA DA SCOPRIRE

Nella descrizione dei fenomeni aggregativi che hanno portato alla formazione di Urano e Nettuno, Hoyle (1979) ipotizza, quale punto di partenza, uno strato di ghiacci con massa totale di circa 2×10^{26} kg (la massa complessiva attuale di Urano e Nettuno) condensatisi in blocchi, dotati di orbite quasi circolari nello stesso piano, in un tempo di poche rivoluzioni orbitali intorno al Sole.

Una distribuzione ordinata di orbite pressochè concentriche non è però destinata a durare per molto tempo perchè gli effetti delle reciproche perturbazioni gravitazionali finirebbero con il modificare drasticamente la situazione (*Figura 3.2*).

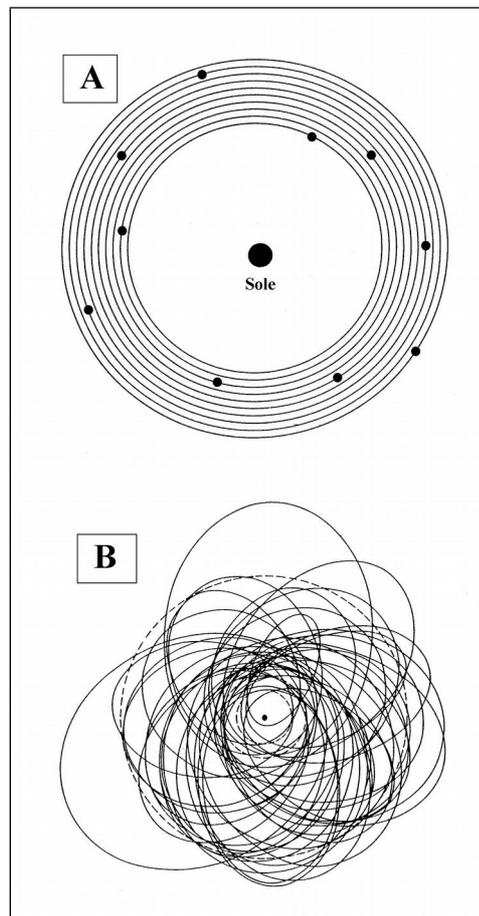


Figura 3.2

Effetti di una perturbazione gravitazionale di tipo casuale (B) a partire da una situazione (A) di orbite ordinate circolari.

(Da: Hoyle, Cosmogonia del Sistema Solare, p.56-57, figg.8-9)

La scala temporale dell'aggregazione di Urano e Nettuno può essere riassunta nella seguente tabella:

Stadio	Massa corpi (kg)	N. corpi	Scala temp. (anni)
1	5×10^{18}	4×10^7	10^3
2	4×10^{24}	50	10^6-10^8
3	10^{26}	2	3×10^8

(Da: Hoyle, *Cosmogonia del Sistema Solare*, pag.59)

Non appare dunque troppo azzardata la possibilità che alcuni di questi planetesimi ghiacciati non abbiano subito processi aggregativi essendosi trovati su orbite sufficientemente protette.

E non si può neppure scartare l'ipotesi che molti altri siano stati lanciati su orbite più esterne (o interne) al Sistema Solare o ne siano stati espulsi.

La possibilità di trovare ancora di questi corpi nelle regioni più esterne del Sistema Solare (dove l'influenza gravitazionale dei pianeti più grandi è meno intensa) può perciò essere considerata una ipotesi percorribile.

Per inciso, in questo scenario ipotizzato da Hoyle il numero delle collisioni con corpi di questo tipo che possono aver interessato la Terra in 200 milioni di anni è circa 30.

Ipotizzando per ogni corpo una massa di 10^{20} kg ed il fatto che la Terra fosse stata in grado di trattenere tutto il materiale apportato dall'impatto, allora la massa totale del materiale verrebbe a quantificarsi in 3×10^{21} kg, in gran parte formato di ghiacci (soprattutto H_2O e CO_2) sufficiente a rendere ragione sia della quantità d'acqua degli oceani, sia dei carbonati presenti nelle rocce calcaree della Terra.

E sul fatto che l'acqua sia stata portata sulla Terra in un secondo tempo (dopo, cioè, che era avvenuta l'aggregazione dai planetesimi iniziali) concordano anche Taylor (1992) e Gehrels (1996).

Il nuovo grande impulso alla ricerca di oggetti posti ai confini della zona planetaria del Sistema Solare è venuto, comunque, dalla scoperta (citata in precedenza) di 1992 QB1.

Si tratta di un oggetto transplutoniano (provvisoriamente chiamato Smiley) di magnitudine 23 scoperto il 30 agosto 1992 da D. Jewitt e J. Luu: la determinazione dei parametri orbitali ha richiesto molti mesi di osservazione a causa della velocità orbitale estremamente bassa (circa 75 arcsec/giorno).

Il diametro, dedotto dalla luminosità e dalla distanza, è stimato in circa 200 km.

Questa prima scoperta è stata seguita (28 marzo 1993) dall'individuazione di 1993 FW (provvisoriamente chiamato Karla), un oggetto simile al precedente, caratterizzato da una distanza eliocentrica compresa tra 39 e 48 U.A. e da un diametro di poche centinaia di km (IAUC 5730).

La portata storica di queste due scoperte viene paragonata da Stern (1992) alla scoperta di Cerere, il primo asteroide, nel 1801.

E non si può non condividere questo collegamento, soprattutto alla luce delle successive scoperte che, a ritmo incalzante, hanno portato ad identificare nel biennio 1993-94 ben 17 oggetti transnettuniani.

Nove di questi hanno distanze comprese tra 31 e 36 U.A. e 8 tra 40 e 45 U.A., il che farebbe supporre la presenza di una lacuna, probabilmente dovuta all'influenza gravitazionale di Nettuno (Nota alla Press Photo 02/94, ESO Information and Photographic Service; 1994).

I dati più recenti (novembre 1996) parlano di 39 oggetti transnettuniani scoperti (Di Martino, comunicazione personale).

Le difficoltà osservative nell'individuazione di questi oggetti sono evidenti: anche se l'impiego dell' H.S.T. ha rappresentato un notevole passo in avanti, in definitiva si tratta di "*scoprire oggetti delle dimensioni di una montagna, posti ad una distanza di quattro miliardi di km, su uno sfondo di velluto nero*" (Stern, Comunicato stampa 186° Congresso della A.A.S., Pittsburgh, PA, 14 giugno 1995).

Le scoperte, però, non si limitano solamente a oggetti di dimensioni di alcune centinaia di km; interessano, anzi, come si è visto, una intera popolazione di oggetti minori che popolerebbero le estreme regioni del Sistema Solare, rendendo in tal modo verificabili le teorie di Kuiper e di Edgeworth riguardo l'esistenza di una struttura a disco nella zona periferica del Sistema Solare, costituita da comete ed altri "detriti".

Già si è avuto modo di segnalare come i corpi che costituiscono la popolazione della Kuiper Belt si possano dividere in due grandi gruppi.

Da un lato vi è la popolazione dei corpi più piccoli, destinati a subire le perturbazioni gravitazionali dei pianeti giganti: il caos dinamico risultante da esse è in ultima analisi la causa dell'immissione delle comete a corto periodo nella zona planetaria, dove normalmente vengono rilevate.

Vi è, poi, la popolazione degli oggetti più grandi (tipo QB₁), i primi ad essere scoperti proprio per le loro dimensioni.

A questo secondo gruppo sono riconducibili Chirone e gli altri Centauri, oggetti orbitanti tra Giove e Nettuno, dotati di orbite instabili la cui vita media è valutabile in milioni di anni.

E sempre al gruppo degli oggetti più grandi della Fascia di Kuiper è riconducibile, come già detto, Plutone, il maggiore tra quelli fino ad ora scoperti.

Da esso, però, non possiamo ricavare grandi informazioni sulla composizione superficiale del resto della popolazione della Kuiper Belt a causa delle interazioni tra la superficie e l'atmosfera.

In generale si ipotizza per questi oggetti una struttura interna ricca di abbondanti ghiacci molecolari (H₂O, CO₂, CO) in sintonia con la loro accumulazione nelle regioni esterne della nebulosa Solare, a temperature di soli 40-50 K.

Le superfici, secondo quanto suggerito da Luu e Jewitt (1996), sarebbero ricche di sostanze la cui struttura più complessa e polimerizzata è riconducibile all'azione dei raggi cosmici, situazione confermata anche da esperienze di laboratorio, che hanno mostrato come il bombardamento con particelle ad alta energia di miscugli di ghiacci di

tipo astrofisico (H_2O , NH_3 , CH_4) provocano una perdita selettiva di idrogeno, con la conseguente formazione di residui carboniosi.

Ed è proprio questa crosta, il cosiddetto *irradiation mantle*, in grado anche di inibire ogni successivo fenomeno di sublimazione, che ci si aspetta di trovare come copertura superficiale di questi oggetti.

La Fascia di Kuiper, però, riveste grandissima importanza non solo per essere ormai considerata il principale serbatoio delle comete a corto periodo, ma anche perchè offre la possibilità, usando le parole di H. Levison (Southwest Research Institute, TX), di "*avere a disposizione il migliore laboratorio del Sistema Solare per studiare la formazione dei pianeti: una regione nella quale il meccanismo di accumulazione ha fatto fiasco*" (Comunicato stampa 186° Congresso della A.A.S., Pittsburgh, PA, 14 giugno 1995).

Il problema maggiore da risolvere non è, però, l'identificazione delle cause che hanno inibito l'ulteriore aggregazione dei planetesimi già formati, bensì la formazione stessa dei corpi maggiori ($100 < R < 400$ km) costituenti la popolazione della Kuiper Belt.

L'analisi dinamica effettuata (Stern, 1996) porta ad escludere una accrezione di tipo binario in quanto i tempi necessari sono di un ordine di grandezza maggiori dell'età del Sistema Solare.

Una possibile ipotesi è che tali oggetti si siano formati direttamente dalla nebulosa originaria.

E' possibile anche suggerire meccanismi alternativi ipotizzando una evoluzione del disco che, in passato, avrebbe potuto avere spessore maggiore di quello attuale: la maggiore densità potrebbe aver permesso una rapida accrezione di corpi tipo QB_1 .

Come si è potuto notare, le scoperte e le relative analisi sono solamente agli inizi, ma prende sempre più corpo l'idea che siamo in presenza di un momento probabilmente fondamentale della planetologia.

La caccia al Pianeta X, dunque, non ha portato proprio ciò che si sperava di trovare, ma ritengo che il risultato sia stato (e prometta di essere) decisamente molto più significativo.

BIBLIOGRAFIA

AA. VV.

NUMERO MONOGRAFICO DI *SCIENCE* (N.232, April 1986)
SULLA COMETA GIACOBINI-ZINNER

ALTENHOFF W., STUMPF P.

SIZE ESTIMATE OF "ASTEROID" 2060 CHIRON
FROM 250 GHz MEASUREMENT
ASTRON. ASTROPHYS. **293**, L41-L42; 1995

AHRENS T.J., HARRIS A.W.

DEFLECTION AND FRAGMENTATION OF NEAR-EARTH ASTEROIDS
NATURE, **360**, 429; 1992

ALVAREZ L.W. et al.

EXTRATERRESTRIAL CAUSE FOR THE
CRETACEOUS-TERTIARY EXTINCTION
SCIENCE, **208**, 1095; 1980

ARNOLD J.R.

ASTEROID FAMILIES AND "JET STREAMS"
ASTRONOMICAL JOURNAL, **74**, 1235; 1969

BELL J.F. et al.

ASTEROID II
R.P. BINZEL ED., UNIV. OF ARIZONA, TUCSON; 1989

BINZEL R.P.

PLUTONE
LE SCIENZE, **264**, 14; 1990

BLANCO C.

PLUTONE OGGI
NUOVO ORIONE, **35**, 44; 1995

BOTTKE W.F., MELOSH H.J.
FORMATION OF ASTEROID SATELLITES AND DOUBLET CRATERS
BY PLANETARY TIDAL FORCES
NATURE, **381**, 51; 1996

BOTTKE JR. W.F., NOLAN M.C., MELOSH H.J.,
VICKERY A.M., GREENBERG R.
ORIGIN OF THE SPACEWATCH SMALL EARTH-APPROACHING
ASTEROIDS
ICARUS, **122**, 406; 1996

BROUWER D.
SECULAR VARIATION OF THE ORBITAL ELEMENTS
OF MINOR PLANETS
ASTRONOMICAL JOURNAL, **56**, 9; 1951

BURBINE T.H., BINZEL R.P.
ASTEROID SPECTROSCOPY AND MINERALOGY
A.MILANI et al. (Eds.), *ASTEROIDS, COMETS, METEORS* 1993; 255

BURNS J.A., SAFRONOV V.S.
ASTEROID NUTATION ANGLES
MONTHLY NOTICES OF THE ROYAL ASTR. SOC., **165**, 403; 1973

CALANCA R., FUSARI M., MANENTI F.
CAVEZZO, L'APICE DELL'AUTOMAZIONE
L'ASTRONOMIA, **166**, 41; 1996

CAMERON A.G.W.
L'ORIGINE E L'EVOLUZIONE DEL SISTEMA SOLARE
IL SISTEMA SOLARE NELLE ESPLORAZIONI SPAZIALI
LETTURE DA LE SCIENZE (Marzo 1976), 22; 1976

CAMPO BAGATIN A.
EVOLUZIONE COLLISIONALE DEGLI ASTEROIDI;
QUALCHE NUOVA IDEA
GIORNALE DI ASTRONOMIA, VOL.20, N.2, 13; 1994

CAPRARA G.
FINESTRA SULL'UNIVERSO
NUOVO ORIONE, 49, 61; 1996

CARUSI A.
OGGETTI VICINI ALLA TERRA: SCOPERTA E DIFESA
LE SCIENZE, 317, 42; 1995

CARUSI A., DOTTO E.
CLOSE ENCOUNTERS OF MINOR BODIES WITH THE EARTH
PLANETARY SCIENCE: FIRST ITALIAN MEETING
A. MANARA, F. MIGLIORINI, P. PAOLICCHI (Eds.), 81; 1996

CARUSI A., VALSECCHI G.B.
PROBLEMI DI DINAMICA DEI CORPI MINORI DEL SISTEMA SOLARE
GIORNALE DI ASTRONOMIA VOL.6, N.3, 229; 1980

CARUSI A., VALSECCHI G.B.
ON ASTEROID CLASSIFICATION IN FAMILIES
ASTRON. ASTROPHYS., 115, 327; 1982

CARUSI A., VALSECCHI G.B.
LA DINAMICA DI HALLEY E DELLE ALTRE COMETE PERIODICHE
GIORNALE DI ASTRONOMIA VOL.11, N.2, 137; 1985

CARUSI A., VALSECCHI G.B.
LA NUBE DI OORT
L'ASTRONOMIA, 72, 15; 1987

CEPLECHA Z.

INFLUX OF INTERPLANETARY BODIES ONTO EARTH

ASTRON. ASTROPHYS., **263**, 361; 1992

CERRONI P.

SIMULATION OF CATASTROPHIC FRAGMENTATION EVENTS

MEM. S.A.It., VOL.57, N.1, 13; 1986

CEVOLANI G.

THE EXPLOSION OF THE BOLIDE OVER LUGO DI ROMAGNA

ON 19.01.1993

PLANET. SPACE SCI., VOL.42, N.2, 767; 1994

CEVOLANI G., FOSCHINI L.

IL FLUSSO DEI METEOROIDI E LA LORO INTERAZIONE

CON L'ATMOSFERA

GIORNALE DI ASTRONOMIA, **1**, 14; 1996

CEVOLANI G., FOSCHINI L.

POLVERE DI PIANETINI

L'ASTRONOMIA, **160**, 26; 1995

CEVOLANI G., FOSCHINI L., TRIVELLONE G.

IL FLUSSO DELLA MATERIA INTERPLANETARIA SULLA TERRA

IL NUOVO SAGGIATORE, N.5/6, 102; 1995

CEVOLANI G., TRIVELLONE G.

LE LEONIDI PICCOLE BOMBE SPAZIALI

L'ASTRONOMIA, **164**, 38; 1996

CHAPMAN C.

LA NATURA DEGLI ASTEROIDI

IL SISTEMA SOLARE NELLE ESPLORAZIONI SPAZIALI

LETTURE DA LE SCIENZE (Maggio 1975), 270; 1976

CHAPMAN C.

IMPLICATION OF THE INFERRED COMPOSITION OF ASTEROIDS
FOR THEIR COLLISIONAL EVOLUTION

MEM.S.A.It. VOL.57, N.1, 103; 1986

CHAPMAN C.

CHILDREN OF THE ASTEROIDS

NEW SCIENTIST, February, 22; 1996

CHAPMAN C.

THE GALILEO ENCOUNTERS WITH GASPRRA AND IDA

A. MILANI et al. (Eds.), *ASTEROIDS, COMETS, METEORS* 1993, 357

CHAPMAN C., MORRISON D.

IMPACT ON THE EARTH BY ASTEROIDS AND COMETS:

ASSESSING THE HAZARD

NATURE, **367**, 33; 1994

COCHRAN A.L., LEVISON H.F., STERN A., DUNCAN M.J.

THE DISCOVERY OF HALLEY-SIZED KUIPER BELT OBJECT

USING THE HUBBLE SPACE TELESCOPE

ASTROPHYSICAL JOURNAL, **455**, 342; 1995

COMBES M.A., MEEUS J.

NOUVELLES DES ASTEROÏDES EXTERIEURS

L'ASTRONOMIE, **110**, 228; 1996

CORADINI A., FEDERICO C., MAGNI G.

ORIGINE DEI PIANETI

GIORNALE DI ASTRONOMIA VOL.6, N.3, 175; 1980

CORADINI M.

FORMAZIONE ED EVOLUZIONE DELLE SUPERFICI PLANETARIE

GIORNALE DI ASTRONOMIA VOL.6, N.3, 187; 1980

CREMONESE G.

HYAKUTAKE, COSA ABBIAMO IMPARATO

L'ASTRONOMIA, **168**, 14; 1996

DAVIS D.R.

CATASTROPHIC DISRUPTION IN THE SOLAR SYSTEM

MEM.S.A.It. VOL.57, N.1, 87; 1986

DI MARTINO M.

OBIETTIVO EROS

L'ASTRONOMIA, **162**, 16; 1996

DI MARTINO M.

UN'ALTRA COMETA IN FRANTUMI

L'ASTRONOMIA, **165**, 17; 1996

DI MARTINO M.

DIFENDERSI DAGLI ASTEROIDI

L'ASTRONOMIA, **167**, 6; 1996

DI MARTINO M.

CHIRONE HA PERSO LA CHIOMA

L'ASTRONOMIA, **168**, 5; 1996

DYSON F.

DA EROS A GAIA

RIZZOLI EDITORE - MILANO 1995

DOHNANY J.S.

COLLISIONAL MODEL OF ASTEROIDS AND THEIR DEBRIS

JOUR. GEOPHYS. RES., VOL.74, N. **10**, 2531; 1969

DOTTO E.

PHYSICAL PROPERTIES OF ASTEROIDS FROM PHOTOMETRIC
OBSERVATION

PLANETARY SCIENCE: FIRST ITALIAN MEETING

A. MANARA, F. MIGLIORINI, P. PAOLICCHI (Eds.), 145; 1996

EDGEWORTH K.E.

THE ORIGIN AND EVOLUTION OF THE SOLAR SYSTEM

MON. NOT. R. ASTRON. SOC., **109**, 600; 1949

EICHER D.J.

A NEW MEMBER OF THE FAMILY

ASTRONOMY, December, 38; 1992

FARINELLA P.

I PARADOSSI DELLA GRAVITAZIONE

L'ASTRONOMIA, **65**, 26; 1987

FARINELLA P.

PROPRIETA' FISICHE DEGLI ASTEROIDI

GIORNALE DI ASTRONOMIA, **4**, 11; 1988

FARINELLA P.

RISONANZE E LACUNE

L'ASTRONOMIA, **137**, 35; 1993

FARINELLA P.

ASTEROIDI "UBRIACHI"

L'ASTRONOMIA, **143**, 7; 1994

FARINELLA P.

PIANETINI VISTI DA VICINO

L'ASTRONOMIA, **150**, 14; 1995

FARINELLA P.

DELIVERING ASTEROID FRAGMENTS TO EARTH
PLANETARY SCIENCE: FIRST ITALIAN MEETING

A. MANARA, F. MIGLIORINI, P. PAOLICCHI (Eds.), 81; 1996

FARINELLA P.

ORIGIN OF THE TUNGUSKA-LIKE IMPACTORS (ABSTRACT)

INTERNATIONAL WORKSHOP TUNGUSKA96

BOLOGNA 15-17 LUGLIO 1996

FARINELLA P., DAVIS D.R.

SHORT-PERIOD COMETS: PRIMORDIAL BODIES OR COLLISIONAL
FRAGMENTS?

SCIENCE, **273**, 938; 1996

FARINELLA P., MILANI A., NOBILI A.M., VALSECCHI G.B.

SOME REMARKS ON THE CAPTURE OF TRITON
AND THE ORIGIN OF PLUTO

ICARUS, **44**, 810; 1980

FARINELLA P., PAOLICCHI P., FERRINI F., MILANI A.,
NOBILI A.M.

RISONANZE E ANELLI NEL SISTEMA SOLARE

GIORNALE DI ASTRONOMIA ,VOL.6, N.3, 253; 1980

FARINELLA P., PAOLICCHI P., ZAPPALA' V.

GLI ASTEROIDI

IL CASTELLO - MILANO, 1983

FERNANDEZ J., IP W.

ON THE TIME EVOLUTION OF THE COMETARY INFLUX
IN THE REGION OF THE TERRESTRIAL PLANETS

ICARUS, **54**, 377; 1983

FUJIWARA A.

RESULTS OBTAINED BY LABORATORY SIMULATION
OF CATASTROPHIC IMPACT

MEM.S.A.It., VOL.57, N.1, 47; 1986

FULCHIGNONI M.

NETTUNO SVELATO, GRAZIE VOYAGER!

L'ASTRONOMIA, **93**, 6; 1989

GEHRELS T.

LA MINACCIA DI COLLISIONI CON COMETE E ASTEROIDI

LE SCIENZE, **333**, 72; 1996

GRATTON L.

INTRODUZIONE ALL'ASTROFISICA

ZANICHELLI - BOLOGNA, 1978

GRIGORIAN S.S.

THE COMETARY NATURE OF THE TUNGUSKA METEORITE
(ABSTRACT)

INTERNATIONAL WORKSHOP TUNGUSKA96

BOLOGNA 15-17 LUGLIO 1996

GUAITA C.

MOLECOLE ORGANICHE NELLA COMETA HALLEY

L'ASTRONOMIA, **98**, 30; 1990

GUAITA C.

SPACE TELESCOPE, UN BILANCIO ENTUSIASMANTE

L'ASTRONOMIA, **166**, 14; 1996

HARRINGTON R.S., VAN FRANDERN T.C.

THE SATELLITES OF NEPTUNE AND THE ORIGIN OF PLUTO

ICARUS, **39**, 131; 1979

HARRIS A.W.

TUMBLING ASTEROIDS

ICARUS, **107**, 209; 1994

HARRIS A.W., BURNS J.A.

ASTEROID ROTATIONS (...)

ICARUS, **40**, 115; 1979

HARTMANN W.

I CORPI MINORI DEL SISTEMA SOLARE

IL SISTEMA SOLARE NELLE ESPLORAZIONI SPAZIALI

LETTURE DA LE SCIENZE (Marzo 1976), 258; 1976

HARTMANN W., THOLEN D.J., MEECH K.J., CRUIKSHANK D.P.

2060 CHIRON: COLORIMETRY AND COMETARY BEHAVIOR

ICARUS, **83**, 1; 1990

HIRAYAMA K.

GROUPS OF ASTEROIDS PROBABLY OF COMMON ORIGIN

ASTRONOMICAL JOURNAL, **31**, 185; 1918

HOLSAPPLE K.A., HOUSEN K.R.

SCALING LAWS FOR THE CATASTROPHIC COLLISION

OF ASTEROIDS

MEM.S.A.It., VOL.57, N.1, 65; 1986

HOYLE F.

COSMOGONIA DEL SISTEMA SOLARE

BIBLIOTECA EST - MONDADORI - MILANO, 1979

HUDSON R.S., OSTRO S.J.

SHAPE AND NON-PRINCIPAL AXIS SPIN STATE

OF ASTEROID 4179 TOUTATIS

SCIENCE, **270**, 84; 1995

INTERNET

INDIRIZZI CONSULTATI:

- * <http://ccf.arc.nasa.gov/sst/close.html>
- * http://www.ex.ac.uk/public_html/nineplanets/ida.html
- * <http://bang.lanl.gov/solarsys/asteroid.htm>
- * ... /ida.htm
- * ... /gaspra.htm
- * ... /toutatis.htm
- * ... /comet.htm
- * ... /comet/appendb.htm
- * ... /comet/appendc.htm
- * ... /kuiper.htm

KAPLAN S.A.

FISICA DELLE STELLE

SANSONI - FIRENZE, 1982

KELLER H.U., THOMAS N.

PANORAMI COMETARI RIPRESI DALLA GIOTTO

L'ASTRONOMIA, **92**, 7; 1989

KOWAL C.T.

A SOLAR SYSTEM SURVEY

ICARUS, **77**, 118; 1989

LAMBERTI C.

LA FACCIA DI PLUTONE

L'ASTRONOMIA, **126**, 69; 1992

LAMBERTI C.

BRAVA GALILEO!

L'ASTRONOMIA, **138**, 4; 1993

LAMBERTI C.

LA PIU' GIOVANE DELLE PROTOSTELLE

L'ASTRONOMIA, **144**, 8; 1994

LAMBERTI C.

LE CADUTE ALLA MOVIOLA

L'ASTRONOMIA, **153**, 16; 1995

LAMBERTI C.

CHIRONE IN CRISI D'IDENTITA'

L'ASTRONOMIA, **157**, 8; 1995

LAMBERTI C.

UNO "SCUDO ASTEROIDALE" A DIFESA DEL PIANETA

L'ASTRONOMIA, **158**, 9; 1995

LAMZIN S.A.

LE STELLE T-TAURI

L'ASTRONOMIA, **159**, 14; 1995

LANG K.R., WHITNEY C.A.

VAGABONDI NELLO SPAZIO

ZANICHELLI - BOLOGNA, 1994

LITTMANN M.

WHERE IS PLANET X

SKY AND TELESCOPE, **6**, 596; 1989

LUPISHKO D.

IL RISCHIO DI UN IMPATTO COSMICO: REALTA' O FANTASCIENZA?

NUOVO ORIONE, **50**, 36; 1996

LUU J., JEWITT D.
COLOR DIVERSITY AMONG THE CENTAURS
AND KUIPER-BELT OBJECTS
ASTRONOMICAL JOURNAL, VOL.112, N.5, 2310; 1996

MAFFEI P.
AL DI LA' DELLA LUNA
BIBLIOTECA EST - MONDADORI - MILANO, 1977
MAFFEI P.
I MOSTRI DEL CIELO
BIBLIOTECA EST - MONDADORI - MILANO, 1977

MAFFEI P.
L'UNIVERSO NEL TEMPO
BIBLIOTECA EST - MONDADORI - MILANO, 1982

MANNINGS V., EMERSON J.P.
DUST IN DISCS AROUND T-TAURI STARS: GRAIN GROWTH?
MONTHLY NOTICES OF THE ROYAL ASTR. SOC., **267**, 361; 1994

MARZARI F., FARINELLA P., VANZANI V.
ARE TROJAN COLLISIONAL FAMILIES A SOURCE FOR SHORT-
PERIOD COMETS ?
ASTRON. ASTROPHYS., **299**, 267; 1995

MENICHELLA M.
VARIABILITA' NEL FLUSSO DI METEORITI
DI ORIGINE ASTEROIDALE
GIORNALE DI ASTRONOMIA, VOL.22, N.4; 1995

MICHEL P., FARINELLA P., FROESCHLE' C.
THE ORBITAL EVOLUTION OF THE ASTEROID EROS
AND IMPLICATION FOR COLLISION WITH THE EARTH
NATURE, **380**, 689; 1996

MIGLIORINI F.

REFINING THE MEMBERSHIP OF ASTEROID FAMILIES

PLANETARY SCIENCE: FIRST ITALIAN MEETING

A. MANARA, F. MIGLIORINI, P. PAOLICCHI (Eds.), 40; 1996

MILANI A.

IL MOTO DEI PIANETI: ORDINE O CAOS?

L'ASTRONOMIA, **65**, 35; 1987

MONTANARI A.

INVESTIGATING A SERIAL KILLER: GEOLOGIC TESTIMONY OF E.T.

IMPACT AND THEIR VICTIMS (ABSTRACT)

INTERNATIONAL WORKSHOP TUNGUSKA96

BOLOGNA 15-17 LUGLIO 1996

MORBIDELLI A., ZAPPALA' V., MOONS M., CELLINO A.,

GONCZI R.

ASTEROID FAMILIES CLOSE TO MEAN MOTION RESONANCES

ICARUS, **118**, 132; 1995

MOROZ L.V., FISENKO A.V., SEMJONOVA L.F.,

PIETERS C.M., KOROTAEVA N.N.

OPTICAL EFFECTS OF REGOLITH PROCESSES ON S-ASTEROIDES (...)

ICARUS, **122**, 366; 1996

MUINONEN K.

DISCOVERY OF TUNGUSKA-SIZED BODIES IN THE SPACEGUARD

SURVEY (ABSTRACT)

INTERNATIONAL WORKSHOP TUNGUSKA96

BOLOGNA 15-17 LUGLIO 1996

MUMMA M.J., DISANTI M.A. et al.

DETECTION OF ABUNDANT ETHANE AND METANE (...) IN COMET

C/1996 B2 HYAKUTAKE: EVIDENCE FOR INTERSTELLAR ORIGIN

SCIENCE, **272**, 1310; 1996

OORT J.H.

THE STRUCTURE OF THE CLOUD OF COMETS SURROUNDING THE
SOLAR SYSTEM, AND A HYPOTHESIS CONCERNING ITS ORIGIN
BULL. ASTR. INST. OF THE NETH. VOL.11, N.408, 91; 1950

PANCALDI M.G.

VAGABONDI DEL CIELO
PONTENUOVO - BOLOGNA, 1994

PEROZZI E.

PENSARE IN PICCOLO
L'ASTRONOMIA, 163, 22; 1996

PRESTINENZA L.

TOUTATIS A SORPRESA: E' DOPPIO!
L'ASTRONOMIA, 130, 16; 1993

RABINOWITZ D.L.

THE SIZE DISTRIBUTION OF THE EARTH - APPROACHING
ASTEROIDS
ASTROPHYSICAL JOURNAL, 407, 412; 1993

SEKANINA Z.

EVIDENCE FOR AN ASTEROIDAL ORIGIN
OF THE TUNGUSKA OBJECT (ABSTRACT)
INTERNATIONAL WORKSHOP TUNGUSKA96
BOLOGNA 15-17 LUGLIO 1996

SHOEMAKER E.M., NISHIIZUMI K., KOHL C.P.

THE FREQUENCY OF IMPACT EVENTS SIMILAR IN ENERGY TO THE
TUNGUSKA EVENT (ABSTRACT)
INTERNATIONAL WORKSHOP TUNGUSKA96
BOLOGNA 15-17 LUGLIO 1996

STERN A.

WHERE HAS THE PLUTO'S FAMILY GONE?

ASTRONOMY, September, 41; 1992

STERN A.

COLLISIONAL TIME SCALE IN THE KUIPER DISK
AND THEIR IMPLICATION

ASTRONOMICAL JOURNAL, VOL.110, N.2, 856; 1995

STERN A., CAMPINS H.

CHIRON AND THE CENTAURS: ESCAPEES FROM THE KUIPER BELT

NATURE, **382**, 507; 1996

TAYLOR S.R.

SOLAR SYSTEM EVOLUTION

CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, 1992

TEMPESTI P.

FISICA DELLE COMETE

GIORNALE DI ASTRONOMIA VOL.11, N.2, 145; 1985

THOLEN D.J.

ASTEROID TAXONOMY FROM CLUSTER ANALYSIS OF PHOTOMETRY
PH. D. THESIS, UNIVERSITY OF ARIZONA; 1984

THOLEN D.J., BUIE M.W., HORNE K.

ALBEDO MAP OF PLUTO AND CHARON FROM MUTUAL
EVENT OBSERVATION

BULL. AMER. SOC., **22**, 1129; 1990

TOMADINI L., GALLETTA G.

L'OSCURA SORELLA DEL SOLE

L'ASTRONOMIA, **150**, 25; 1995

TORBETT M., GREENBERG R., SMOLUCHOWSKI R.
ORBITAL RESONANCES AND PLANETARY FORMATION SITES
ICARUS, **49**, 313; 1982

TORBETT M., SMOLUCHOWSKI R.
SWEEPING OF THE JOVIAN RESONANCES AND THE EVOLUTION
OF THE ASTEROIDS
ICARUS, **44**, 722; 1980

VALSECCHI G.B., MORBIDELLI A., GONCZI R.,
FARINELLA P., FROESCHLE' CH., FROESCHLE' C.
THE DYNAMICS OF OBJECTS IN ORBIT RESEMBLING
THAT OF P/ENCKE
ICARUS, **118**, 169; 1995

VANIN G.
STELLE CADENTI
BIROMA - GALLIERA (PD), 1996

VEVERKA J., THOMAS P., SIMONELLI D. et al.
DISCOVERY OF GROOVES ON GASGRA
ICARUS, **107**, 72; 1994

VON ROSENVINGE T. et al.
THE INTERNATIONAL COMETARY EXPLORER MISSION
TO COMET GIACOBINI-ZINNER
SCIENCE, **232**, 355; 1986

WALKER G.
FIREBALL FROM THE DEEP FREEZE
NEW SCIENTIST, VOL.152, N.2054, 30; 1996

WARD W.R.
ON THE RAPID FORMATION OF GIANT PLANET CORES
ASTROPHYSICAL JOURNAL, **345**, L99; 1989

WASSON J.T.

METEORITES

Ed. W.H. FREEMAN and Co. - NEW YORK, 1985

WEISMANN P.R.

THE GALAXY AND THE SOLAR SYSTEM

R.SMOLUCHOWSKI et al. eds, UNIV. OF ARIZONA, TUCSON; 1986

WETHERILL G.W., SHOEMAKER E.M.

COLLISION OF ASTRONOMICALLY OBSERVABLE BODIES
WITH THE EARTH

GEOLOGICAL SOC. OF AMERICA, SPECIAL PAPER, **190**, 1; 1982

WHIPPLE F.

A COMET MODEL

ASTROPHYSICAL JOURNAL, **111**, 375; 1950

WHIPPLE F.

LA NATURA DELLE COMETE

IL SISTEMA SOLARE NELLE ESPLORAZIONI SPAZIALI

LETTURE DA LE SCIENZE (Maggio 1974), 280; 1976

XU S., BINZEL R.P., BURBINE T.H., BUS S.J.

SMALL MAIN-BELT ASTEROID SPECTROSCOPIC SURVEY

ICARUS, **115**, 1; 1995

YAMAMOTO T.

ARE EDGEWORTH-KUIPER BELT OBJECTS PRISTINE?

SCIENCE, **273**, 921; 1996

YEOMANS D.K.

THE COMET GIACOBINI-ZINNER HANDBOOK

INTERNATIONAL HALLEY WATCH

J.P.L. - CALIFORNIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY ; 1985

ZAPPALA' V.

ASTEROIDI

GIORNALE DI ASTRONOMIA, VOL.6, N.3, 241; 1980

ZAPPALA' V., CELLINO A., FARINELLA P., KNEZEVIC Z.

ASTEROID FAMILIES (...)

ASTRONOMICAL JOURN., VOL.100, N.6, 2030; 1990

ZAPPALA' V., CELLINO A.

ASTEROID FAMILIES

A. MILANI et al. (Eds.), *ASTEROIDS, COMETS, METEORS* 1993, 395

ZAPPALA' V., BENDJOYA P., CELLINO A.

P. FARINELLA, C. FROESCHLE'

ASTEROID FAMILIES: SEARCH OF A 12,487-ASTEROID SAMPLE
USING TWO DIFFERENT CLUSTERING TECHNIQUES

ICARUS, **116**, 291; 1995

ZAPPALA' V., CELLINO A., FARINELLA P.

HIERARCHICAL CLUSTERING: HOW TO IDENTIFY ASTEROID
FAMILIES AND ASSESS THEIR RELIABILITY

C.I. LAGERKVIST et al. (Eds), *ASTEROIDS, COMETS, METEORS III*, 211; 1990

ZAPPALA' V., CELLINO A., DI MARTINO M.

MIGLIORINI F., PAOLICCHI P.

MARIA'S FAMILY AS THE POSSIBLE ORIGIN
OF "GIANT" NEAR-EARTH ASTEROIDS

Sottomesso a *ICARUS*

ZELLNER B., THOLEN D.J., TEDESCO E.F.

THE EIGHT-COLOR ASTEROID SURVEY:
RESULTS FOR 589 MINOR PLANETS

ICARUS, **61**, 355; 1985