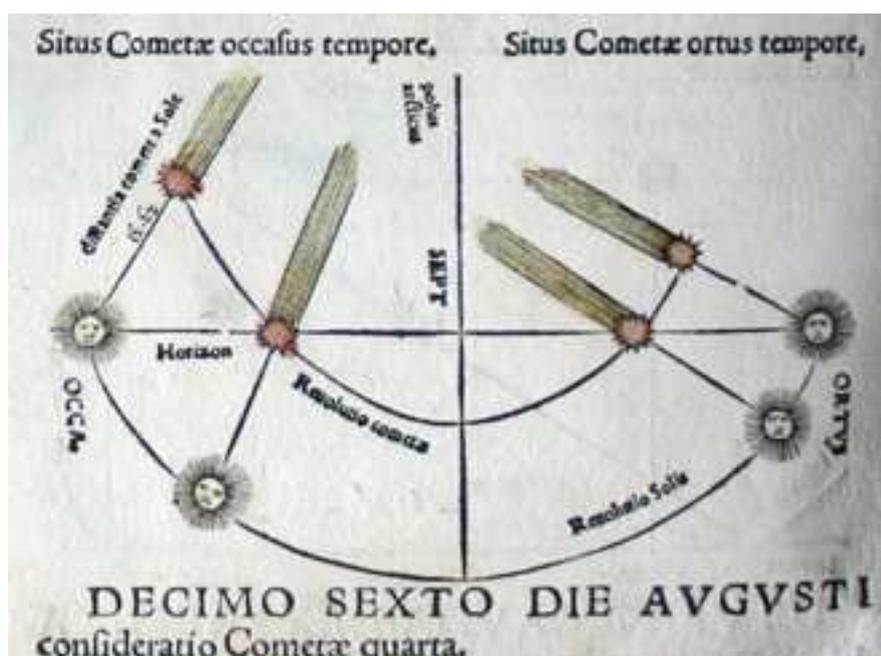




ACCADEMIA MONTALTINA DEGLI INCULTI

ASTEROIDI, COMETE E METEORITI



Da *ASTRONOMICUM CAESAREUM* di P. APIANUS

**APPUNTI
DELLA QUINTA EDIZIONE
DELLA SCUOLA ESTIVA DI ASTRONOMIA**

A cura di
Angelo Angeletti e Manlio Bellesi

PREFAZIONE

Il libro che proponiamo all'attenzione dei lettori è una guida completa e aggiornata sui corpi minori del Sistema Solare, tema affrontato nel 2006 durante il quinto anno della scuola estiva di Astronomia e di Meteorologia; in una prossima pubblicazione daremo conto della discussione sulle lune del Sistema Solare, tematica principe dell'attuale edizione.

La stesura del presente lavoro è stata resa possibile grazie al contributo dei docenti Angelo Angeletti e Manlio Bellesi, divenuti ormai veterani di questo annuale appuntamento che si tiene nel paese natale dell'astronomo Foscarini, cui il corso è dedicato.

Al loro sforzo si deve la compiuta analisi descrittiva di questa pubblicazione, che si rivolge agli operatori culturali ma anche agli appassionati impegnati nella divulgazione e nella didattica astronomica.

Strutturato in sette capitoli, il libro affronta nelle loro linee generali comete, asteroidi, meteoriti e stelle cadenti, presentando anche, all'interno della guida, qualche spunto tratto dai classici del pensiero scientifico relativi all'argomento.

Fulcro centrale del capitolo sulle comete sono le riflessioni sulla natura di questi corpi e sulla questione della loro orbita e provenienza.

La pubblicazione si sofferma poi sulle caratteristiche fisiche e sull'evoluzione di asteroidi e meteoriti, nel quadro generale dell'evoluzione del Sistema Solare, con particolare riferimento agli impatti, i cui segni tangibili appaiono sulla superficie di Marte, della Terra e della Luna, di Venere e di Mercurio.

All'interno è presente anche una appendice bibliografica che serve ad ampliare la panoramica complessiva.

L'opera, per problemi tecnici, viene momentaneamente relegata all'interno di un CD, e solo successivamente verrà editata a stampa.

La guida è arricchita da disegni e immagini che hanno lo scopo di impreziosire il lavoro di compilazione svolto dagli autori.

Il testo contiene citazioni dalle riviste più autorevoli e dai numerosi siti internet dedicati all'argomento.

Chiudiamo queste righe con un grazie al contributo offerto dai due curatori del corso e da tutti gli enti che hanno reso possibile questo appuntamento.

Montalto Uffugo, settembre 2007

Luciano Romeo

LOCANDINE DELLE VARIE EDIZIONI DELLA SCUOLA

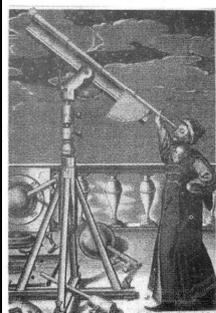


Accademia Montaltina degli Inculti
Associazione Helios

SCUOLA ESTIVA DI ASTRONOMIA E METEOROLOGIA

P. ANTONIO FOSCARINI
MONTALTO UFFUGO (Cs)

Ministero dell'Istruzione, dell'Università della Ricerca
Ministero per i beni e le attività culturali
Amministrazione Comunale di Montalto Uffugo (Cs)
Agenzia Spaziale Italiana
Amministrazione Provinciale di Cosenza
Regione Calabria
Società Astronomica Italiana - Sezione Calabrese
Distretto Scolastico n. 22 Montalto Uffugo



PIANO INTEGRATO
DI SVILUPPO DELLE SCIENZE
ASTRONOMICHE, FISICHE
E METEOROLOGICHE

Anno Accademico 2002-2003



Accademia Montaltina degli Inculti
Sezione Calabrese
Associazione Astronomica HELIOS

SCUOLA ESTIVA DI ASTRONOMIA
E METEOROLOGIA

P. ANTONIO FOSCARINI
1° CICLO DEL CORSO
ANNO ACCADEMICO 2003 - 2004

**MARTE
IL PIANETA ROSSO**



25 - 29 AGOSTO 2003
Montalto Uffugo Centro (Cs)
Istituto Magistrale S. Rita da Cascia

Orario del Seminario
Parte Teorica
9.30 - 12.30 • 15.30 - 18.30
Parte Osservativa 21.00 - 23.00



Accademia Montaltina degli Inculti
CESF
Associazione Astronomica HELIOS

SCUOLA ESTIVA DI ASTRONOMIA
E METEOROLOGIA

P. ANTONIO FOSCARINI
III Edizione

1° CICLO DEL CORSO
ANNO ACCADEMICO 2004-2005

I pianeti interni
del sistema solare

**VENERE
e MERCURIO**



30 AGOSTO - 3 SETTEMBRE 2004
Montalto Uffugo Centro (Cs)
Istituto Magistrale S. Rita da Cascia

ORARIO DEL SEMINARIO
Parte Teorica 9.30 - 12.30 • 15.30 - 18.30
Parte Osservativa 21.00 - 23.00



Accademia Montaltina degli Inculti
Comune di Montalto Uffugo
Assessorati alla Cultura e Pubbl. Istr. Turismo e Spettacolo
Associazione Astronomica HELIOS

SCUOLA ESTIVA DI ASTRONOMIA
E METEOROLOGIA

P. ANTONIO FOSCARINI
IV Edizione

1° CICLO DEL CORSO
ANNO ACCADEMICO 2005-2006

**GAIÀ
IL PIANETA DELLA VITA**



29 AGOSTO - 2 SETTEMBRE 2005
Montalto Uffugo Centro (Cs)
Istituto Magistrale S. Rita da Cascia

ORARIO DEL SEMINARIO
Parte Teorica 9.30 - 12.30 • 15.30 - 18.30
Parte Osservativa 21.00 - 23.00



Accademia Montaltina degli Inculti
Comune di Montalto Uffugo
Assessorati alla Cultura e Pubbl. Istr. Turismo e Spettacolo
Associazione Astronomica HELIOS

SCUOLA ESTIVA DI ASTRONOMIA
E METEOROLOGIA

P. ANTONIO FOSCARINI
V Edizione

1° CICLO DEL CORSO
ANNO ACCADEMICO 2006-2007

**ASTEROIDI,
COMETE
E METEORITI**



28 AGOSTO - 1 SETTEMBRE 2006
Montalto Uffugo Centro (Cs)
Istituto S. Rita da Cascia

ORARIO DEL SEMINARIO
Parte Teorica 9.30 - 12.30 • 15.30 - 18.30
Parte Osservativa 21.00 - 23.00



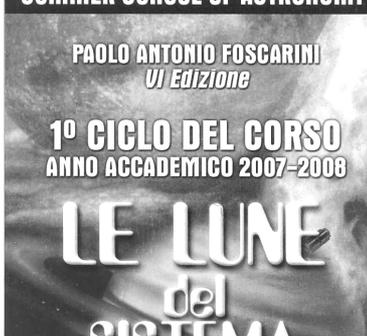
Accademia Montaltina degli Inculti
Comune di Montalto Uffugo
Assessorati alla Cultura e Pubbl. Istr. Turismo e Spettacolo
Associazione Astronomica HELIOS

SUMMER SCHOOL OF ASTRONOMY

PAOLO ANTONIO FOSCARINI
VI Edizione

1° CICLO DEL CORSO
ANNO ACCADEMICO 2007-2008

**LE LUNE
del
SISTEMA
SOLARE**



27-31 AGOSTO 2007
Montalto Uffugo Centro (Cs)
Istituto S. Rita da Cascia

ORARIO DEL SEMINARIO
Parte Teorica 9.30 - 12.30 • 15.30 - 18.30
Parte Osservativa 21.00 - 23.00

PRESENTAZIONE

Prosegue la pubblicazione dei materiali presentati Scuola Estiva di Astronomia e Meteorologia di Montalto Uffugo. Sempre a cura di A. Angeletti e di M. Bellesi lo scorso anno era stato pubblicato un volume con il materiale relativo ai primi quattro anni della scuola.

Il tema affrontato nel 2006 è stato: Asteroidi, Comete e Meteoriti. Hanno svolto lezioni: Angelo Angeletti e Manlio Bellesi (docenti di fisica presso il Liceo Scientifico di Macerata e membri dell'Associazione Astrofili "Crab Nebula" di Tolentino), il Prof. Paolo Paolicchi (docente di Astrofisica presso l'Università di Pisa) e la sua signora Alessandra La Spina (ricercatrice presso il Dipartimento di Matematica della stessa Università), Roberto Marcialis e Antonio Lo Campo della SPACE – European Foundation for Space.

La stesura del presente materiale, curata da Angeletti e Bellesi, trae lo spunto dalle lezioni svolte, ma è stata rielaborata e integrata.

I testi non sono ovviamente del tutto originali; molto materiale deriva da articoli, pagine di libri, siti internet letti e studiati in questi anni e più o meno rielaborati. Se qualcuno dovesse riconoscere in queste pagine immagini e testi non debitamente citati, non ce ne voglia e ce lo comunichi: provvederemo a correggere l'omissione in eventuali altre edizioni. Si sappia comunque che il presente materiale viene diffuso gratuitamente ed esclusivamente ai partecipanti alla Scuola di Astronomia e Meteorologia di Montalto Uffugo. **Non sono consentite altre forme di diffusione al di fuori dell'ambito scolastico.** Teniamo inoltre a precisare che per questa pubblicazione non abbiamo percepito alcun compenso.

Nel capitolo 1 vengono definiti alcuni termini essenziali per la comprensione del resto del libro. Nel capitolo 2 si tratta delle comete, in particolare di come abbiano condizionato la vita dell'uomo. Il capitolo 3 descrive i meteoroidi, le meteore e le meteoriti. Nel capitolo 4 invece si riprende il tema comete trattandolo da un punto di vista fisico. Nel capitolo 5 vengono studiati gli asteroidi, sempre da un punto di vista fisico; analogamente viene fatto nel capitolo 6 per gli oggetti trans-nettuniani. Infine nel capitolo 7 si analizzano i rischi di impatto di asteroidi con la Terra. In fondo al libro è presente una ricca bibliografia.

Si è cercato di essere il più possibile semplici, sia nel linguaggio, sia nei concetti; si è evitata, per quanto possibile, qualunque trattazione matematica, salvo che in casi strettamente necessari.

Come si usa fare in queste occasioni, vogliamo ringraziare quanti hanno reso possibile questo lavoro, in modo speciale il dott. Luciano Romeo e Giuliana Bartucci, rispettivamente presidente e segretaria dell'Accademia Montaltina degli Inculti, che hanno voluto tutto questo.

Ci scusiamo per quei refusi che saranno presenti, nonostante il nostro impegno nell'eliminarli.

Macerata, luglio 2007

Angelo Angeletti
Manlio Bellesi

INTRODUZIONE

1.1 – ASTEROIDI

Il 24 agosto 2006, a Praga, l'IAU (*International Astronomical Union*) ha dato nuove definizioni per quanto riguarda i corpi del Sistema Solare, in particolare per i pianeti. Ha stabilito che un pianeta è un corpo celeste che: è in orbita intorno al Sole, ha sufficiente massa per essere in condizione di equilibrio idrostatico (per cui assume una forma tendenzialmente sferica) ed è l'unico corpo celeste presente nelle immediate vicinanze della sua orbita. Pertanto il Sistema Solare ha otto pianeti: Mercurio, Venere, Terra, Marte, Giove, Saturno, Urano e Nettuno.

Viste le ormai sempre più numerose scoperte di oggetti oltre l'orbita di Nettuno (detti *trans-nettuniani* o TNO = *Trans-Neptunian Object*) è stata data anche la definizione di pianeta nano, ovvero un corpo celeste che: è in orbita intorno al Sole, ha massa sufficiente per essere in equilibrio idrostatico (per cui anche questa classe di oggetti assume forma tendenzialmente sferica), ma non è l'unico corpo celeste presente nelle immediate vicinanze della sua orbita e non è un satellite di un altro pianeta. Per il momento sono stati classificati tra i pianeti nani: Cerere, Plutone e Eris^[1], ma ci sono almeno una decina di altri oggetti su cui si sta indagando per comprendere se possono essere inseriti in questa categoria e altri se ne scopriranno sicuramente in futuro.

Nome	Semiasse maggiore (UA)	Diametro medio (km)	Anno della scoperta
Vesta	2,361	578×560×458	1807
Pallade	2,773	570×525×500	1802
Igea	3,137	500×385×350	1849
Orco	39,466	840 – 1880	2005
Issione	39,539	< 822	2001
2002 UX25	42,524	910	2002
2002 TX300	43,088	< 900	2002
Veruna	43,129	1040 ± 200	2000
2003 EL61	43,335	1500	2004
Quasar	43,405	1260 ± 190	2002
2005 FY9	45,791	1600 – 2000	2005
2002 AW197	47,487	793	2002
2002 TC302	55,037	< 1200	2002
Sedna	525,606	1180 – 1800	2003

Tabella 1.1 – Candidati ad essere inseriti nella lista dei pianeti nani

Oltre ai pianeti “classici” e a quelli “nani”, tutti gli altri oggetti presenti nel Sistema Solare sono satelliti (detti anche lune) che orbitano intorno ai pianeti (normali o nani) o *Small Solar System Bodies* (corpi minori del sistema solare), detti anche asteroidi o pianetini o planetoidi. Gli asteroidi in rotta di collisione con la Terra vengono detti anche *meteoroidi*. Quando entrano nell'atmosfera

^[1] 136199 Eris (nome provvisorio 2003 UB313) è stato scoperto l'8 gennaio 2005 dagli astronomi M. Brown, C. Trujillo e D. Rabinowitz, studiando delle fotografie scattate il 21 ottobre 2003. La scoperta è stata comunicata il 29 luglio 2005 e, dato che è apparso subito più grande di Plutone (il diametro misurato dal telescopio spaziale Hubble è stimato intorno a 2400±100 km), lo si è acclamato come decimo pianeta del Sistema Solare. È proprio in relazione alle sue dimensioni che è stata approvata l'idea di declassare Plutone a pianeta nano.

terrestre lasciano delle scie luminose che sono dette *meteore* o *stelle cadenti*; quelli più grandi vengono chiamati *bolidi*. Quando non si disintegrano nell'atmosfera terrestre il corpo che giunge al suolo è chiamato *meteorite*.

Gli asteroidi composti per la maggior parte di ghiaccio sono conosciuti invece come comete. Alcuni asteroidi sono il residuo di vecchie comete che hanno perso gran parte del ghiaccio nel corso di ripetuti avvicinamenti al Sole, e sono adesso composti per lo più di roccia.

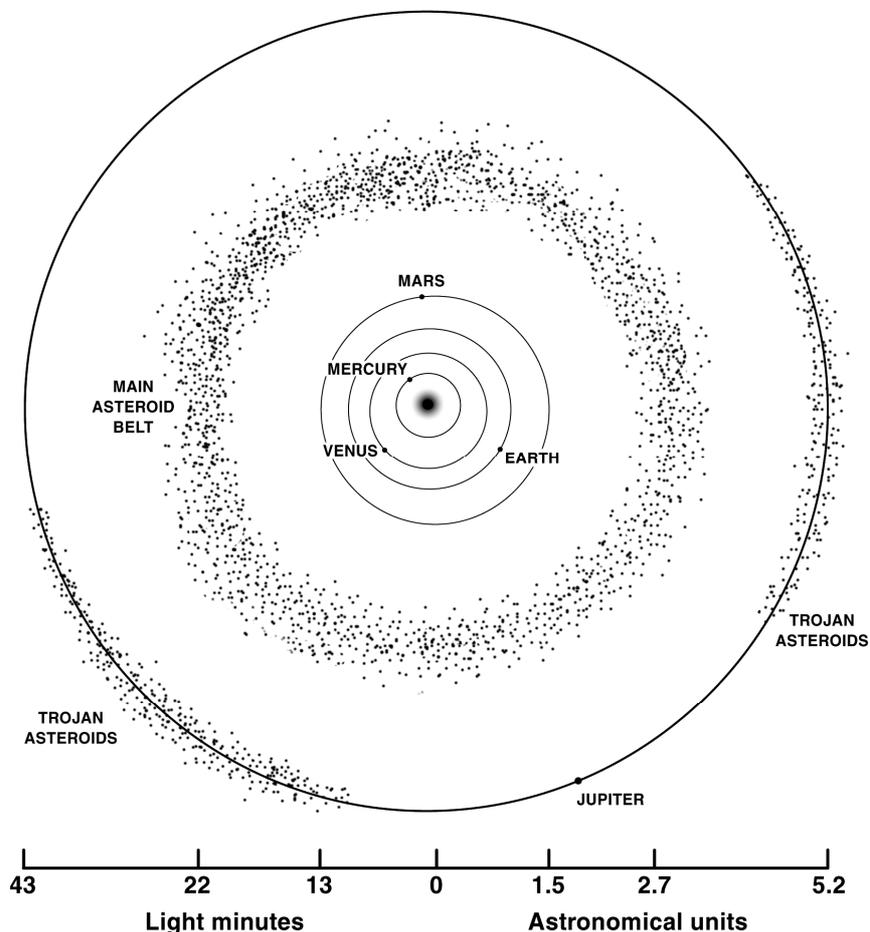


Fig. 1.1 – La fascia principale degli asteroidi. (fonte Wikipedia)

Gli asteroidi sono oggetti simili per composizione ad un pianeta terrestre, ma più piccoli e generalmente privi di forma sferica; in genere hanno un diametro inferiore al chilometro, anche se non mancano corpi di grandi dimensioni. Oggi si conoscono 159 366 asteroidi numerati su un totale di 376 537, dei quali 13 805 hanno un nome ufficiale (fonte Wikipedia 1° giugno 2007). Più avanti si parlerà della denominazione degli asteroidi e delle comete. La maggior parte degli asteroidi noti orbita nella cosiddetta *fascia principale*, una zona tra Marte e Giove, ad una distanza compresa tra 2 e 4 UA^[2]. Gli asteroidi della fascia principale, spesso chiamati pianetini, sono stati i primi ad essere stati scoperti; Cerere, il pianeta nano più vicino, è stato scoperto per primo, nel 1801 da Piazzi; ha un diametro di circa 1000 km e raccoglie in sé circa un terzo della massa totale di tutti i pianetini della fascia principale, che è di circa $2,3 \cdot 10^{21}$ kg. Attualmente sono stati catalogati circa centomila asteroidi della fascia principale, ma le stime dicono che il loro numero totale supera il milione.

^[2] L'UA è l'unità astronomica, unità di misura utilizzata per le distanze nel Sistema Solare. $1 \text{ UA} = 1,495979 \cdot 10^{11} \text{ m}$, che è circa la distanza media Terra-Sole.

Un altro gruppo importante sono i cosiddetti NEA (*Near Earth Asteroids*) o NEO (*Near Earth Objects*) che hanno orbite prossime a quella della Terra. Si dividono in tre famiglie: *Aten*, che hanno raggio orbitale medio minore di 1 UA e la cui orbita interseca quella terrestre; *Apollo*, che hanno raggio orbitale medio leggermente maggiore di 1 UA e ugualmente intersecano l'orbita terrestre; *Amor*, che hanno orbita compresa tra quella di Marte e quella della Terra. Gli Aten e gli Apollo sono potenzialmente pericolosi in quanto potrebbero impattare con la Terra.

Sono numerosi gli asteroidi che passano a distanze confrontabili con quella della Luna. Per esempio il 3 luglio 2006 l'asteroide 2006 XP14 è passato ad una distanza di 410 000 km; l'oggetto aveva un diametro di circa 600 m.

Il sito <http://neo.jpl.nasa.gov/risk/> contiene molte informazioni sugli asteroidi che hanno orbite prossime a quelle della Terra.

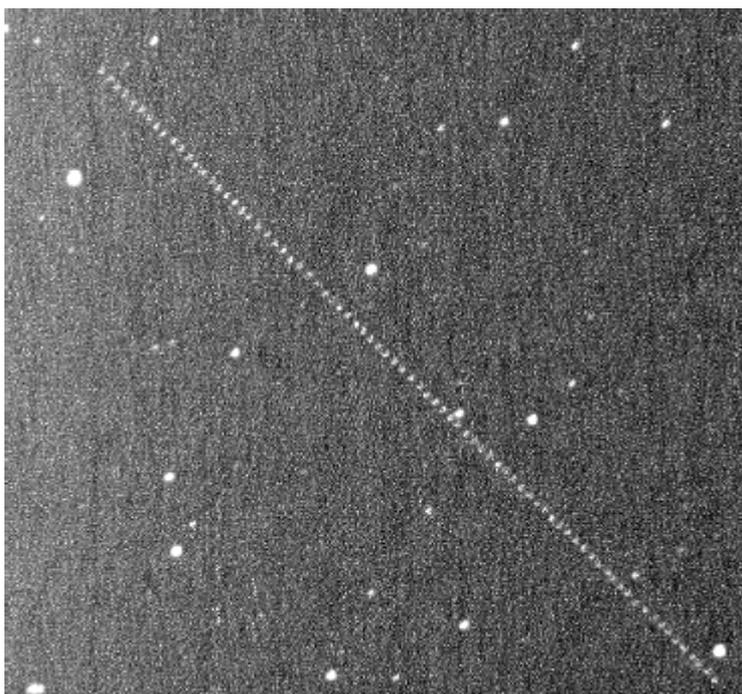


Fig. 1.2 – L'asteroide 2004 XP14 ripreso dall'Osservatorio Astronomico "Padre Francesco De Vico" di Serrapetrona (MC) il 3 luglio 2006 alle ore 23,16. Somma di 79 immagini di un secondo di esposizione, intervallate di 5 secondi. Autori: Angelo Angeletti, Fabiano Barabucci, Francesco Barabucci, Gianclaudio Ciampechini.

Sulla stessa orbita di Giove si trovano gli asteroidi Troiani, che sono divisi in due gruppi: uno precede Giove di 60° e l'altro lo segue dello stesso angolo. Si trovano nei cosiddetti *punti lagrangiani* L4 e L5, punti in cui l'attrazione di Giove e quella del Sole producono orbite stabili.

I Centauri sono un gruppo di asteroidi che orbitano intorno al Sole in mezzo ai pianeti giganti, quindi oltre l'orbita di Giove.

La maggior parte degli asteroidi, comunque, si trova oltre l'orbita di Nettuno e per questo appartiene alla classe dei TNO. Oggi vengono comunemente riconosciute tre grandi distribuzioni: la *fascia di Edgeworth-Kuiper*, il *disco diffuso* e la *nube di Oort*.

La fascia di Edgeworth-Kuiper si estende da circa 30 UA fino a circa 50 UA dal Sole e se ne conoscono circa 800 membri, chiamati anche KBO (*Kuiper Belt Objects*). Il più grande è Plutone, che ha una massa maggiore di quella di tutti gli asteroidi della fascia principale ed è stato il primo ad essere scoperto. Le orbite sono quasi complanari con l'eclittica. Le comete a corto periodo provengono da questa regione.

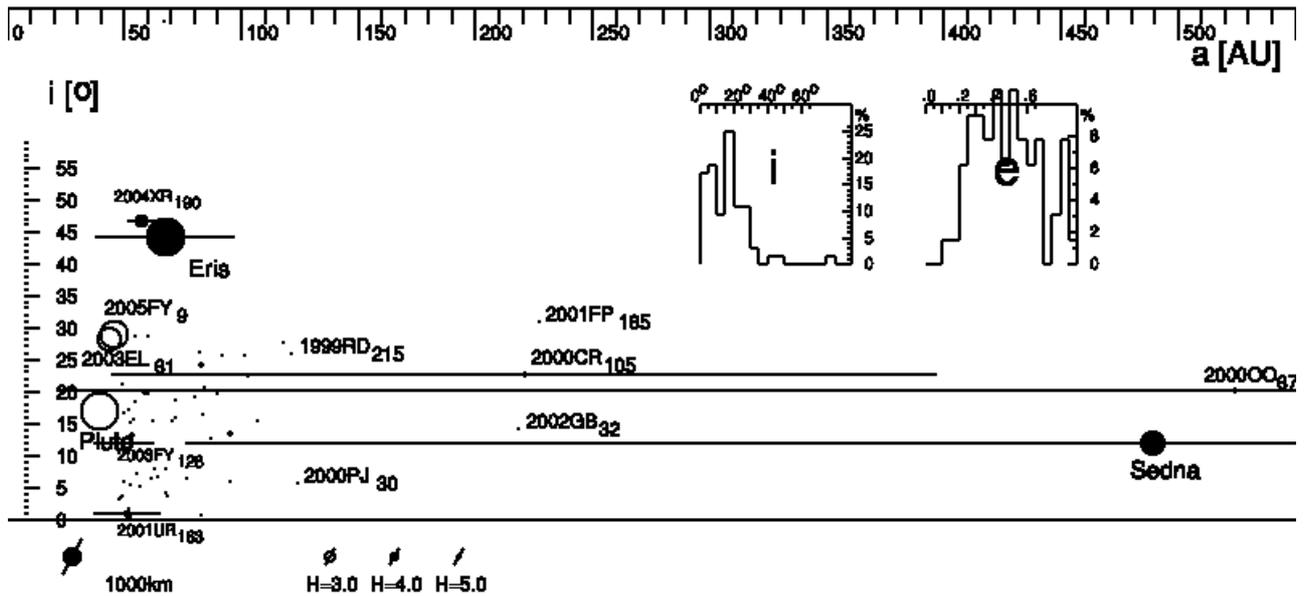


Fig. 1.3 – Gli asteroidi del disco diffuso (fonte Wikipedia)

Il disco diffuso è una regione periferica del sistema solare, ricca di corpi ghiacciati, che internamente sfuma nella fascia Edgeworth-Kuiper. Eris viene classificato come uno dei più interni di questa zona, mentre l'estensione esterna non è nota; Sedna viene considerato al limite esterno del disco. Le orbite di questi corpi sono anche molto inclinate rispetto all'eclittica.

La nube di Oort è una ipotetica nube di corpi ghiacciati (nuclei cometari) posta tra 20 000 e 100 000 UA (0,3 – 1,5 anni luce^[3]). Non sono stati ancora osservati corpi che ne fanno parte, anche se ci sono astronomi che ritengono che Sedna possa essere un oggetto della nube di Oort. Inoltre le comete a lungo periodo come la Hyakutake e la Hale-Bopp (per citare le due più appariscenti degli ultimi anni) probabilmente provengono da questa regione.

1.2 – DENOMINAZIONE DEGLI ASTEROIDI E DELLE COMETE

La scoperta di un asteroide procede attraverso quattro fasi. Nella prima fase una regione di cielo, in genere quella antisolare, viene ripresa con un telescopio a grande campo a distanza di tempo (in genere è sufficiente un'ora). Nella seconda fase le due immagini vengono confrontate per individuare se qualche oggetto si è mosso^[4]. Nella terza fase, una volta individuato il corpo in movimento, se ne misura la posizione rispetto alle stelle riprese nell'immagine, in modo molto preciso. Il passo finale è quello di mandare questi risultati al *Minor Planets Center* dove, a partire dalle osservazioni svolte, viene calcolata un'orbita preliminare e predette le posizioni dell'asteroide per le notti successive. Una volta che l'oggetto viene ritrovato grazie alle predizioni, l'astronomo o il dilettante che aveva fatto le osservazioni è dichiarato scopritore ed ha il diritto di dare il nome all'asteroide (con l'approvazione dell'Unione Astronomica Internazionale). Quest'ultima fase richiede a volte diversi mesi o anni.

Quando l'orbita di un asteroide viene confermata, esso viene numerato, e più tardi può anche ricevere un nome dallo scopritore (per esempio, 1 Cerere o 2060 Chirone). I primi vennero chiamati con nomi derivati dalla mitologia greco-romana, ma quando questi nomi iniziarono a scarseggiare,

^[3] L'anno luce (a.l.) è lo spazio che la luce percorre in un anno, cioè $9,46073 \cdot 10^{15}$ m, ovvero circa 9 500 miliardi di chilometri.

^[4] Poiché gli asteroidi sono molto più vicini delle stelle hanno un moto rispetto ad esse percettibile (ovviamente più sono vicini, più è evidente il loro spostamento)

ne vennero usati altri: persone famose, i nomi delle mogli degli scopritori, persino attori di televisione.

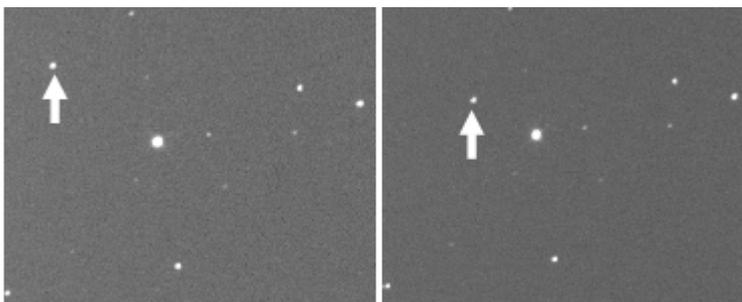


Fig. 1.4 – Due immagini dell'asteroide 2004 XP14 (indicato dalla freccia) riprese a 56 s di distanza. Data la vicinanza alla Terra lo spostamento è molto evidente.

A partire dalla fine del secolo scorso sono entrati in funzione un gran numero di telescopi automatizzati che svolgono le fasi sopra descritte senza l'assistenza dell'uomo. Tali sistemi scoprono ormai la maggior parte degli asteroidi. Tra i più attivi in questa ricerca c'è il sistema LINEAR (*Lincoln Near Earth Asteroid Research*) che al 21 ottobre 2004 aveva ottenuto 211 849 nuove designazioni di asteroidi, tra i quali sono state poi individuate 142 nuove comete e 1622 NEO.



Fig. 1.5 – Un telescopio LINEAR per la ricerca automatica degli asteroidi.

Dal 1925 agli asteroidi appena scoperti viene assegnato un nome provvisorio: una sigla in cui i primi 4 caratteri sono l'anno della scoperta, seguiti da una lettera che indica la metà del mese in cui l'asteroide è stato individuato (si omettono la I e la Z). Un'ulteriore lettera maiuscola (si omette sempre la I ma stavolta si considera la Z), indica l'ordine di scoperta entro il periodo di 15 giorni. La corrispondenza fra lettere e ordine di scoperta è data da: $A = 1^\circ$, $B = 2^\circ$, \dots , $Z = 25^\circ$. Con questo sistema, nella metà del mese considerato, si possono designare fino a 25 nuovi asteroidi; se il numero di corpi individuati è maggiore di 25 si ricomincia daccapo riciclando la seconda lettera, cui viene aggiunto un indice numerico. Viene messo 1 se si tratta del primo riciclaggio, 2 per il secondo e così via. Ad esempio, il 25° asteroide scoperto nella prima metà di gennaio del 2007 vie-

ne designato con 2007 AZ, il successivo, cioè il 26°, con 2007 AA1, quindi il 27° con 2007 AB1, e così via; al termine della metà mese caratterizzata dalla lettera A la sequenza riparte e l'asteroide successivo riceve la designazione 2007 BA.

Quando l'orbita è conosciuta con precisione l'asteroide riceve un numero progressivo e lo scopritore può attribuirgli un nome, che diventa ufficiale dopo la pubblicazione nelle *Minor Planet Circulars*.

A	1 – 15 gen	B	16 – 31 gen
C	1 – 15 feb	D	16 – 29 feb
E	1 – 15 mar	F	16 – 31 mar
G	1 – 15 apr	H	16 – 30 apr
J	1 – 15 mag	K	16 – 31 mag
L	1 – 15 giu	M	16 – 30 giu
N	1 – 15 lug	O	16 – 31 lug
P	1 – 15 ago	Q	16 – 31 ago
R	1 – 15 set	S	16 – 30 set
T	1 – 15 ott	U	16 – 31 ott
V	1 – 15 nov	W	16 – 30 nov
X	1 – 15 dic	Y	16 – 31 dic

Tabella 1.2 – Designazione provvisoria degli asteroidi

Per i nomi delle comete, prima del 1995, si faceva seguire, all'anno della scoperta, un numero romano progressivo; le comete erano comunemente note attraverso i nomi dei loro scopritori.

A partire dal 1995 è in uso un sistema analogo a quello previsto per gli asteroidi; tuttavia all'anno della scoperta segue una sola lettera (anziché le due previste per gli asteroidi), che indica il periodo della scoperta. Segue un numero ad indicare l'ordine progressivo di scoperta: per esempio, l'ottava cometa scoperta nella seconda metà di marzo 2006 avrebbe la denominazione provvisoria 2006 F8. Nel caso di frammentazione della cometa i singoli detriti assumono la medesima designazione del corpo genitore, seguito da una lettera (da A a Z, e, se necessario da a a z). Fino ad oggi non si è reso necessario un sistema di nomenclatura che preveda una suddivisione in più di 52 frammenti.

Se un asteroide, successivamente alla sua scoperta e quindi dopo la sua classificazione temporanea, mostra un comportamento cometario, mantiene la sua designazione originaria.

LE COMETE NELLA STORIA^[5]

2.1 – DALL’ALBA DELL’UMANITÀ AD ARISTOTELE

Le comete, con la loro grande varietà di forme e di comportamenti, sono state certamente gli astri che più di tutti hanno impressionato i primi uomini.

I primi resoconti storici su apparizioni di comete e sulla loro natura di oggetti astronomici sono dovuti ai Caldei^[6]; se ne parla in un testo risalente al II, forse al III millennio a.C.. Esse erano considerate segno di buoni o di cattivi auspici. L'apparizione di una cometa portava la pioggia; se la cometa fosse scomparsa verso sud la raccolta del sesamo sarebbe stata buona, se invece fosse salita verso le zone boreali del cielo il grano non avrebbe germogliato. Alcune idee sulla natura delle comete presso i Caldei si possono ricavare dalle *Naturales Quaestiones*^[7] (64 d.C.) di Seneca^[8]. Nel VII libro, interamente dedicato alle comete, riporta quanto segue: *“Una cosa certa è che due scienziati che dicono di aver studiato presso i Caldei, Epigene e Apollonio di Mindo, molto esperto nel trarre gli oroscopi, sono in disaccordo fra loro. Quest’ultimo, infatti, afferma che i Caldei annoverano le comete fra i pianeti e che hanno determinato le loro orbite. Epigene, invece, sostiene che i Caldei non dispongono di osservazioni certe sulle comete, ma sembra che esse siano accese da un qualche turbine d’aria vorticoso e velocissimo.”*

Gli Egiziani non hanno tramandato nulla sugli astri chiamati, anche se sembra che siano stati i primi a chiamarli in tal modo. Diodoro Siculo^[9], alla fine del I secolo a. C., scriveva che potevano prevedere la loro apparizione, ma le sue parole e il contesto in cui sono inserite hanno un carattere più astrologico che astronomico. Lo stesso Seneca lamentava una carenza di studi sulle comete: *“Sarebbe poi indispensabile avere un catalogo di tutte le apparizioni di comete del passato. Finora, infatti, non è stato possibile individuare i loro percorsi, a causa della loro rarità, né sapere se esse ritornino periodicamente e se un ordine fisso le faccia ricomparire in dati giorni. L’osservazione di questi fenomeni celesti è recente ed è stata introdotta da poco in Grecia. Anche Democrito, il più penetrante degli studiosi antichi, dichiarò di sospettare che ci sia un numero superiore di astri che corrono, ma non ne stabilì il numero né i nomi, dato che a quel tempo non si conoscevano ancora le orbite dei cinque pianeti. Eudosso per primo portò in Grecia dall’Egitto la conoscenza dei movimenti dei pianeti; egli, però, non dice nulla sulle comete. Da questo risulta chiaro che neppure gli Egizi, che si occuparono più approfonditamente dello studio del cielo, approfondirono questa parte*

^[5] Molti riferimenti biografici e storici insieme a diverse citazioni sono tratti dal libro di Palo Maffei [3]. Un’altra fonte molto utilizzata è stata *Wikipedia, l’enciclopedia libera*.

^[6] I Caldei furono un popolo (o un clan di tribù) di lingua aramaica, forse originario dell’Arabia orientale, che nell’XIV secolo a.C. si stabilì nella Mesopotamia fra Babilonia ed il Golfo Persico. Spesso scambiati per Babilonesi, ne furono invece acerrimi nemici. Estesero la loro influenza in Siria e nella Palestina e si estinsero con l’arrivo di Ciro il Grande re dei Persiani che espugnò Babilonia nel 538 a.C.. Erano i sapienti, i maghi di Babilonia, astrologi e indovini; erano adoratori delle stelle. Qualcuno avanza l’idea che i Caldei non fossero un popolo, bensì una casta di saggi iniziati.

^[7] Una traduzione di questa opera si trova in: www.filosofico.net/senquestnat.htm

^[8] Lucio Annéo Seneca nacque a Cordoba (allora colonia romana) probabilmente nel 4 a.C.. A Roma ricevette un’istruzione retorica e letteraria, come voleva il padre, ma egli preferiva la filosofia. Nel 31 iniziò l’attività forense (dimostrando grandi capacità oratorie) e la carriera politica (fino a diventare senatore); ciò gli procurò parecchi guai e nel 41 fu relegato in Corsica. Ritornò a Roma nel 49 perché Agrippina lo scelse come tutore del figlio Nerone, che egli guidò fino al trono (58) e nel primo quinquennio di regno. Progressivamente il rapporto si deteriorò e Seneca si ritirò a vita privata. L’imperatore però ormai voleva la sua morte e, accusatolo di aver partecipato alla congiura di Pisone (65), di cui era forse solo al corrente, lo costrinse al suicidio.

^[9] Fu uno storico greco nato a Agyrion, l’odierna Agira in provincia di Enna, intorno all’80 a.C. Intraprese vari viaggi per comporre la sua opera storica *Biblioteca Storica*, redatta tra il 60 ed il 30 a.C. Da cenni che egli fa su Augusto, si presume che sia morto intorno al 20 a.C.

dell'astronomia. Successivamente Conone, anch'egli ricercatore attento, ha catalogato le eclissi di sole osservate dagli Egizi, ma non ha menzionato per nulla le comete, soggetto che non avrebbe trascurato se fosse venuto a conoscenza di qualche osservazione compiuta da loro in proposito.”

I Greci dettero numerose interpretazioni delle comete e molte sono giunte fino a noi. Secondo Anassagora e Democrito^[10] le comete si formavano dall'accostamento di due pianeti; i Pitagorici sostenevano che fossero veri e propri pianeti, che generalmente non vediamo perché si alzano poco al di sopra dell'orizzonte, come fa Mercurio.

Nel IV sec. a.C., Aristotele^[11], nella Meteorologia, confutò tutte le idee precedenti dando una sua interpretazione che sarebbe stata accettata per quasi duemila anni. Aristotele adottava l'idea dei filosofi presocratici degli “*elementi fondamentali*”: terra, acqua, aria e fuoco. La Terra forma una sfera immobile al centro dell'universo; intorno al luogo della terra c'è quello dell'acqua, intorno al quale c'è quello dell'aria e intorno a quest'ultimo, più in alto di tutti, c'è il luogo del fuoco. Al di là del luogo del fuoco si trovano le sfere che portano i corpi celesti, perfettamente pure e così trasparenti da essere invisibili.

Tutto ciò che si trova al di sotto della sfera della Luna costituisce il mondo sublunare, caduco e corruttibile. In esso i quattro elementi si mescolano variamente formando ogni cosa che vediamo intorno a noi. Il moto naturale delle cose è quello rettilineo e va verso l'alto o verso il basso a seconda dell'essenza del corpo e del luogo naturale in cui dovrebbe risiedere.

A partire dalla sfera della Luna c'è il mondo translunare, in cui ci sono i cieli e i corpi celesti, formati da una sostanza immutabile e incorruttibile chiamata etere. L'etere è la “*quinta essenza*” dell'universo. Nel mondo translunare il moto è circolare e uniforme.

Ecco le parole che usa Aristotele per le comete: “*Noi abbiamo invero supposto che nel mondo intorno alla terra, quella parte situata per prima sotto il moto circolare sia ripiena di un'esalazione secca e calda. Questa esalazione, e gran parte dell'aria che al di sotto le è contigua, viene trascinata in giro intorno alla terra a cagione del movimento circolare superiore. Trascinata e mossa in tale maniera, quando per avventura essa si trova nelle condizioni opportune, questa esalazione si infiamma. Già abbiamo detto che in tale modo si formano le stelle cadenti. Quando dunque in tale condensazione viene a generarsi un principio di fuoco, e questo non è tanto forte da produrre celermente un grande incendio e nemmeno tanto debole da spengersi rapidamente, ma è invece sufficientemente potente e abbondante, e quando nello stesso tempo si vien sollevando una esalazione che si trovi nelle condizioni opportune, allora si genera questa stella cometa, qualunque sia l'eventuale forma che l'esalazione assume.*

Noi stimiamo ancora che la natura ignea della condensazione che forma la cometa possa provarsi mostrando come, quando esse appariscono si generano per lo più venti e siccità. È chiaro che esse si formano quando ha luogo una grande secrezione di tal genere, in modo che è necessario che allora l'aria sia più secca, e che per la grande quantità dell'esalazione calda l'umido evaporatosi si

^[10] Anassagora fu un filosofo greco nato a Clazomene (oggi Kilizman in Turchia) tra il 500 e il 496 a.C. e morto a Lampsaco (sulla riva sud dello stretto dei Dardanelli, vicino all'attuale città turca di Lapseki) nel 428 a.C.. Democrito nacque ad Abdera nella regione della Tracia (è la regione che occupa l'estrema punta sudorientale della Penisola balcanica e comprende il nordest della Grecia, il sud della Bulgaria e la Turchia europea) intorno al 460 a.C. e morì assai vecchio intorno al 360 a.C.. Allievo di Leucippo, insieme al suo maestro fu il fondatore dell'atomismo.

^[11] Aristotele nacque a Stagira (in Macedonia) nel 384 a.C. ed era figlio del medico reale. Rimasto orfano in tenera età si trasferì in Asia Minore; verso il 367 a.C. fu inviato ad Atene per studiare nell'Accademia fondata da Platone. In quel periodo Platone era in Sicilia e la scuola era retta da Eudosso di Cnido, uno scienziato che influenzò il giovane Aristotele. Nel 347 a.C., alla morte di Platone, non essendo stato chiamato alla direzione della scuola, Aristotele lascia Atene e inizia a girare per la Grecia e le sue colonie insegnando in varie scuole. Nel 342 a.C. fu chiamato in Macedonia per fare da precettore al giovane Alessandro Magno e nel 340 a.C., quando Alessandro divenne reggente del regno di Macedonia, egli ritornò a Stagira. Intorno al 335 a.C. si trasferì ad Atene dove fondò la scuola peripatetica. Nel 323 a.C., alla morte di Alessandro Magno, malvisto dagli ateniesi e accusato di empietà, lasciò Atene rifugiandosi a Calcide (capoluogo dell'isola greca Eubea), e città di origine della madre. Vi morì il 7 marzo del 322 a.C.. È tra i maggiori filosofi di tutta la storia.

suddivida e si dissolva in maniera da non potere poi facilmente condensarsi in acqua... Così, dunque, come abbiamo detto, quando le comete appaiono più copiose e frequenti, l'annata si manifesta chiaramente secca e ventosa. Quando sono più rare e più piccole la cosa non avviene nella stessa misura; ciò non ostante si ha sempre un aumento di vento, sia in durata che in violenza."

Vista l'influenza delle idee di Aristotele nel mondo occidentale, anche la sua concezione delle comete dominò per quasi duemila anni e ogni sforzo per comprendere questo fenomeno astronomico fu di fatto bloccato.

Nella concezione greca le condizioni meteorologiche avevano una grande influenza sulla salute; i venti, per esempio, erano considerati addirittura in stretta relazione con i terremoti. Nel 373 a.C. un terremoto catastrofico distrusse le città di Beris ed Elice, nel golfo di Corinto, e le loro rovine furono ingoiate dal mare; in quel periodo una grande cometa splendeva nel cielo. Secondo la teoria di Aristotele accadde questo: la terra si spaccò provocando il terremoto e i gas che uscirono dalle fenditure raggiunsero la sfera del fuoco accendendosi nella cometa. Quindi la cometa era una conseguenza del terremoto. Allo stesso modo l'atmosfera secca e arida che poteva provocare siccità, carestie e quindi pestilenze, conteneva più del solito il principio che poteva accendersi in una cometa. Di conseguenza le comete vennero associate a calamità di questo genere e anche se si sapeva che erano provocate da una situazione puramente meteorologica e non le si riteneva causa di alcun male, le loro apparizioni cominciarono a essere considerate come annunciatrici di sciagure.

L'idea di Aristotele sulle comete venne ben presto travisata dalla cultura popolare e ***le comete divennero la causa dei mali dell'umanità***. La loro apparizione sparse il terrore sull'intera Europa durante il Medioevo e il Rinascimento e fu solo la cometa di Halley che spezzò questa soggezione ... ma non del tutto!

2.2 – PAURA DELLE COMETE

È facile credere che l'apparizione di una cometa producesse nei primi ominidi paure profondamente radicate nell'ignoranza e nel timore di qualunque fenomeno celeste direttamente collegato al volere di qualche divinità. Carl Sagan^[12] sosteneva che forse i nostri progenitori, decine di migliaia di anni fa, assistettero impotenti ed atterriti alla caduta di un asteroide o di una cometa; il carico di paure e di angoscia, seguito a questo drammatico avvenimento, avrebbe lasciato un marchio indelebile nel DNA dell'umanità.

La distorsione della concezione di Aristotele rafforzò nell'animo umano l'idea di sventura collegata all'apparizione di comete. Personaggi illustri tentarono di riportare il fenomeno comete in un ambito naturale; Seneca, per esempio, affermava che una cometa non è un fuoco acceso all'improvviso, ma opera della natura e riteneva che: *"un giorno nascerà un uomo che dimostrerà in quali regioni dei cieli le comete hanno origine e perché esse viaggiano così lontane dagli altri pianeti; qual è la loro grandezza e quale la loro origine."* Egli rimase però una voce isolata ed inascoltata fino al tardo Rinascimento.

Contemporaneo di Seneca, Plinio^[13], vissuto a Roma in un'epoca in cui tutti (compresi lo stesso imperatore e molti senatori) consultavano sistematicamente gli oroscopi prima di intraprendere qualunque attività, vede le comete come astri che influiscono direttamente sull'uomo e nella

^[12] Nato a New York il 9 novembre 1934 e morto a Seattle il 20 dicembre 1996, è stato uno dei maggiori astrofisici del XX secolo, oltre che grandissimo divulgatore e scrittore di fantascienza. È stato il fondatore del Progetto SETI per la ricerca delle intelligenze extraterrestri attraverso l'uso dei radiotelescopi.

^[13] Gaio Plinio Secondo, conosciuto come Plinio il Vecchio, nacque a Como nel 23 d.C. e morì nei pressi dell'odierna Castellammare di Stabia il 24 agosto 79 d.C.. Fu scrittore, scienziato, naturalista, erudito, acuto osservatore e storico romano: amava descrivere le cose dal vivo, e per questo motivo perse la vita, soffocato dalle esalazioni sulfuree dell'eruzione del Vesuvio che distrusse Ercolano e Pompei, mentre provava ad osservare il fenomeno più da vicino.

sua *Naturalis Historia*^[14] scrive: “Si ritengono importanti le direzioni verso cui la cometa sfreccia, la stella che esercita influsso su di lei, la forma cui assomiglia, e i punti in cui sbuca fuori. Se ha l'aria di un flauto, si dice che il presagio tocchi l'arte musicale; ma riguarda comportamenti osceni se appare nelle zone vergognose delle costellazioni, spiritualità e cultura se forma un triangolo o un rettangolo, ad angoli uguali, rispetto alla posizione di qualche stella perenne; e sparge veleni se si trova nella testa del Serpente boreale o australe.”

L'opera di Plinio ebbe una grande diffusione e fu molto importante per la formazione di molte generazioni, ma più esplicito e molto più autorevole fu Claudio Tolomeo^[15]: nel *Tetrabiblos*^[16], che diventò per gli astrologi quello che l'Almagesto era per gli astronomi, descrive gli effetti che gli astri hanno sull'uomo: “Per giungere alla predizione degli avvenimenti futuri dovremo osservare poi anche le comete, sia quelle che giungono durante le eclissi, che quelle che arrivano invece durante qualsiasi altro periodo, quali sono quelle dette 'otri', 'botti', 'trombe' o anche altre di tal genere, poiché esse generano degli effetti simili a quelli di Marte o Mercurio, e cioè le guerre, i grandi caldi, i moti impetuosi, insomma tutte quelle cose da cui le comete sono generalmente seguite. Inoltre, tanto le parti dello Zodiaco dalle quali esse provengono, che l'inclinazione della loro chioma, mostrano quali luoghi siano minacciati e in quali svilupperanno i loro effetti. Dal colore e dalla forma della cometa si conosceranno poi la specie e il genere della cosa sulla quale devono capitare gli effetti.”

Attribuendo alle comete anche influenze di tipo astrologico ci si allontanò ancor più dalla possibilità di scoprirne e comprenderne la vera natura. Dall'astrologia si cadde nella superstizione popolare e si fecero i collegamenti più disparati, tramandandoli o inventandoli nei secoli. Riportiamo alcune descrizioni tratte dall'*Almanacco Perpetuo* del Benincasa^[17].

[14] L'opera fu pubblicata nel 77 d.C. e si presenta come una ricerca a carattere enciclopedico sui fenomeni naturali. Il primo libro fu completato dal nipote Plinio il Giovane dopo la morte dello zio; contiene la dedica all'imperatore Tito, il sommario dei libri successivi ed un elenco delle fonti per ciascun libro. L'autore vuole far conoscere all'uomo i vari aspetti della natura, perché possa elevarsi dalla sua condizione animale. L'opera tratta svariati temi: la descrizione dell'universo (II libro), la geografia ed etnografia del bacino del Mar Mediterraneo (III-VI libro), l'antropologia (VII libro), la zoologia (VIII-XI libro), la botanica e l'agricoltura (XII-XIX libro), la medicina e le piante medicinali (XX-XXVII libro), la medicina ed i medicinali ricavati dagli animali (XXVII-XXXII libro), la mineralogia (XXXIII-XXXVII libro). L'ultima parte, trattando della lavorazione dei metalli e delle pietre, contiene anche una sorta di storia dell'arte dell'antichità.

[15] Claudio Tolomeo è vissuto più o meno nel periodo tra l'85 e il 165 d.C.. Noto semplicemente come Tolomeo, è stato un astronomo greco di epoca imperiale che probabilmente visse e lavorò ad Alessandria d'Egitto. Considerato uno dei padri della geografia, fu autore di due importanti opere scientifiche, la principale delle quali è il trattato astronomico *Μαθηματικὴ Σύνταξις*, noto come Almagesto. In questo lavoro, una delle opere più influenti dell'antichità, Tolomeo raccolse la conoscenza astronomica del mondo greco e babilonese, basandosi soprattutto sul lavoro svolto tre secoli prima da Ipparco. Tolomeo formulò un modello geocentrico (che da lui prenderà appunto il nome di tolemaico) dell'Universo, che rimase un riferimento per tutto il mondo occidentale (ma anche arabo ed indiano) fino a che non fu sostituito dal sistema di Copernico.

[16] Il *Tetrabiblos* fu pubblicato nel 155 ed è appunto costituito da quattro libri. Fu tradotto per la prima volta dal greco in latino nel 1484 ed ha avuto una vita più lunga dell'Almagesto. Il *Tetrabiblos* è ancora pubblicato in tutto il mondo (in Italia c'è un'edizione delle Edizioni Arktos del 2006), mentre le ultime edizioni italiane dell'Almagesto risalgono al XVI secolo.

[17] Rutilio Benincasa nacque nel 1555 a Borgo Partenope, allora Torzano, oggi frazione del comune di Cosenza. Oltre alla data di nascita, sono poche le notizie storiche sulla vita di questo personaggio, la cui morte è avvenuta verso il 1626. Egli fu filosofo, matematico ed astronomo; il suo nome è legato alla sua opera più conosciuta, l'*Almanacco Perpetuo*, scritta nel 1587 e stampata per la prima volta a Napoli nel 1593. Si tratta di una sintesi delle credenze popolari e delle cognizioni scientifiche del '500 e nella dedica si legge: “opera molto necessaria e dilettevole anco di gran gioventamento, ad astrologi, fisonomici, medici, fisici, chirurghi, barbieri, distillatori, alchimisti, agricoltori, pittori, nocchieri, viandanti, mastri di campo”. Ci sono insegnamenti per tutti, supportati da illustrazioni e da una completa antica simbologia, tanto da far diventare l'almanacco un libro di riferimento in questo campo. Il suo successo è dimostrato dalle moltissime edizioni ristampate nel corso dei secoli. Dopo la morte dell'autore l'*Almanacco* fu ritoccato da molti altri con lo scopo di aggiornarlo.

728 – In Costantinopoli fu gran pestilenzia, che tolse la vita a più di trecentomila persone, e si videro due gran Comete che l'una andava la mattina avanti il Sole, e l'altra lo seguiva la sera, e in Brescia nacque un fanciullo con due denti.

984 – In Italia fu una gran cometa, e la fame, e peste l'oppressò; e vi levò molta gente; in Fiandra si vide un gran serpente volar per l'aria, e in Genova un cavallo parlò, in Pisa veduti huomini con effigie di cane. [Non vi furono comete; solo l'apparizione di una stella in pieno giorno, quasi certamente Venere]

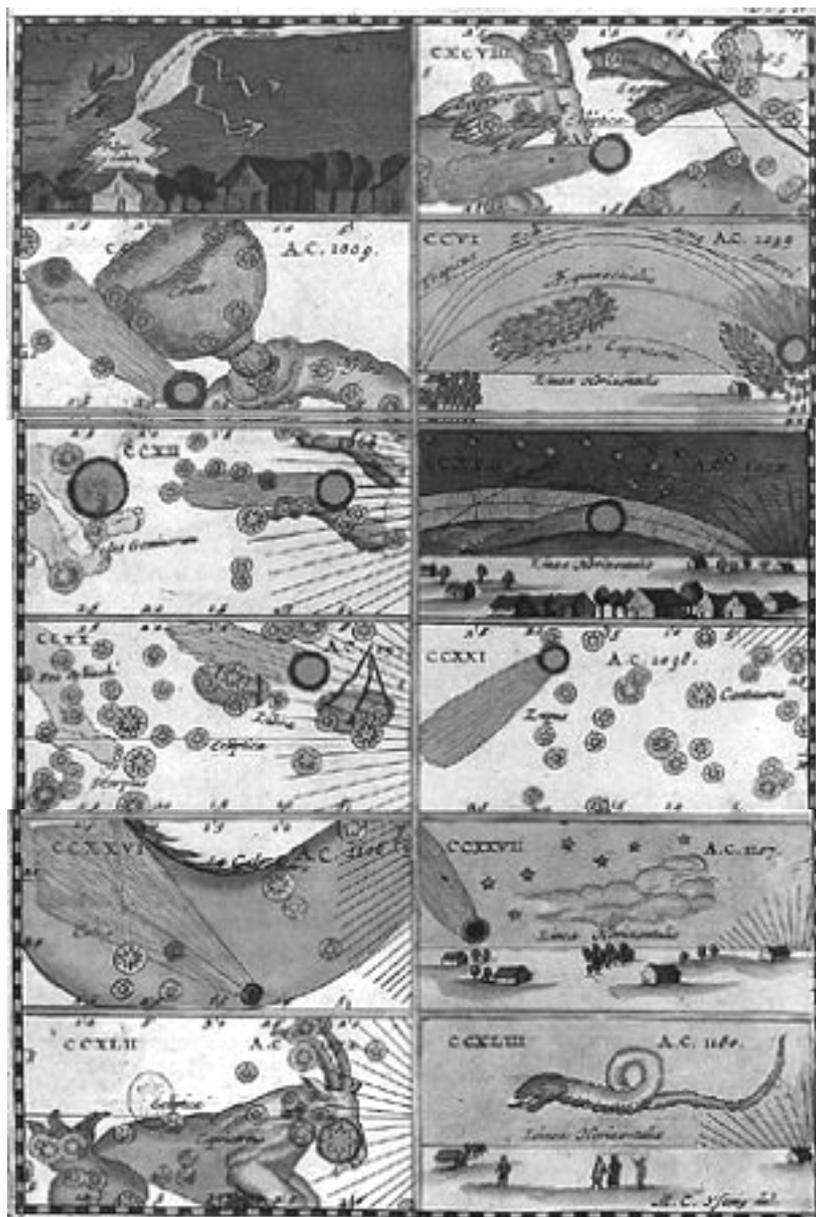


Fig. 2.1 – Rappresentazioni di comete osservate fra l'anno 1000 e il 1180. Alcune furono reali, mentre altre sono solo una prova di quanto potere avessero in quei tempi, nel mondo occidentale, la fantasia e la paura (da Lubienietz, *Theatrum Cometicum*).

1019 – Imperando Ottone III l'anno 1019 nel mese di giugno a hore 9 si vide una cometa, e travi ardenti in Cielo, e poi apparve una figura grandissima di Serpente con terremoto, Ottone ordinò che all'Imperio non succedesse il figliuolo, ma si facesse per elettione.

1316 – In Milano si viddero molte statue per l'aria volare, e si sentirno voci spaventevoli, e nell'aria si vidde gran fuoco a somiglianza d'una gran galera, in Costantinopoli furono vedute tre lune, e tre Comete, tre mesi, e la fame, e la peste fecero gran danno in molti paesi. [Secondo le cronache dell'epoca le comete furono due o, forse, una sola].

1526 – Si vide una cometa in forma di spada, qual durò dalli 13 d'Agosto fino li 6 di Settembre, e essendo rotto il Re d'Ungharia da Turchi, e volendo fuggire s'affogò in un fiume paludoso, e i Turchi seguendo ebbero la vittoria, e presero Buda città d'Ungharia. Carlo V si maritò con Isabella d'Austria sorella del Re di Portogallo.

Secondo una leggenda diffusasi dopo il XVI secolo, nell'anno Mille ci si aspettava la fine del mondo e ovviamente c'era di mezzo una cometa.

A.G. Pingré^[18], raccogliendo e riassumendo antiche cronache, così scriveva nella sua *Cométographie*: “L'anno 1000 di Gesù Cristo si compì nel quarto anno del regno di Roberto; era stato fecondo di prodigi, secondo un grandissimo numero di storici; erano stati provati grandi terremoti, una Cometa era apparsa per nove giorni. La maggior parte degli Autori datano la sua apparizione dal 19 delle calende di gennaio o dal 14 dicembre.”

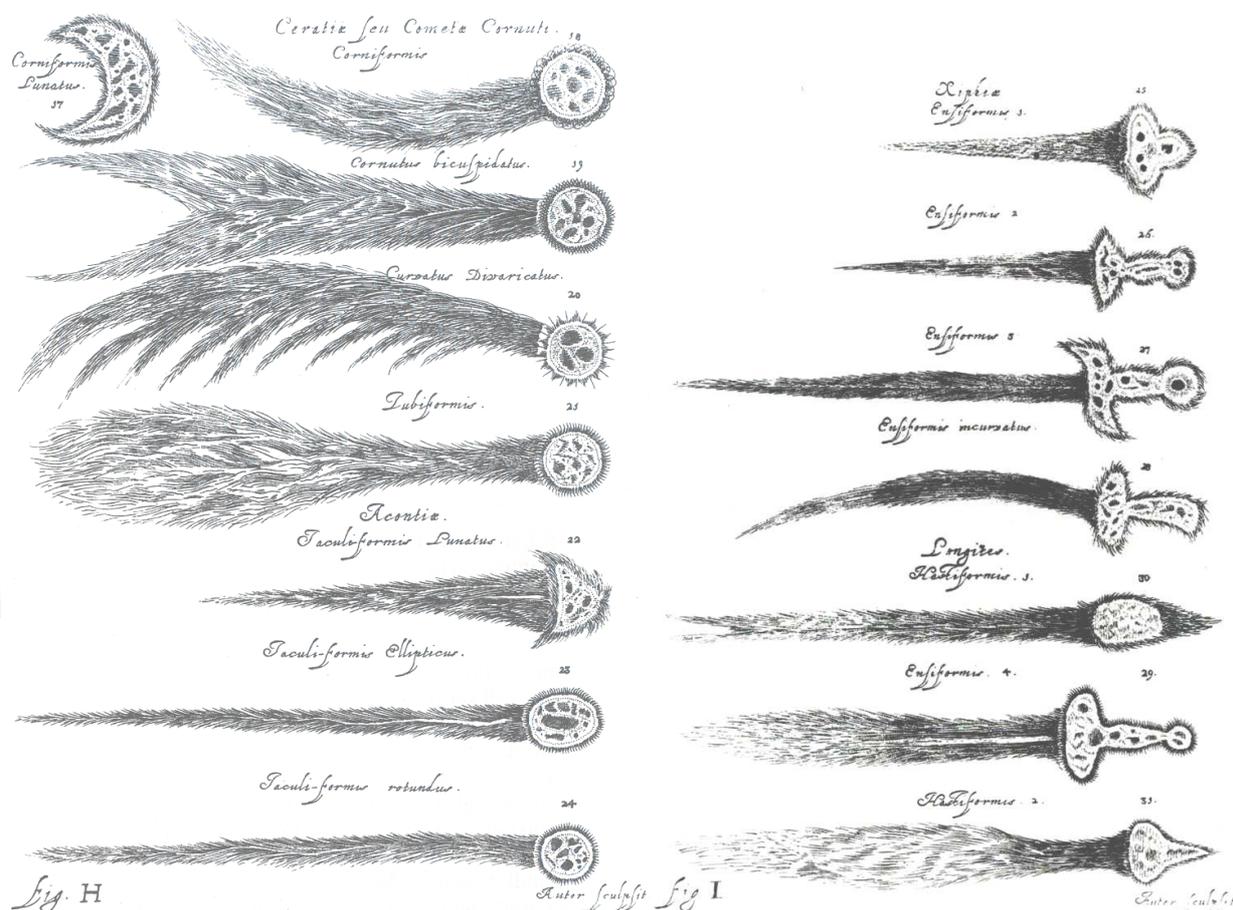


Fig. 2.2 . Comete di varie forme, disegnate da Hevelius sulla base delle tradizioni secolari. Si noti come alcune somigliano a frecce, spade, pugnali (da Hevelius, *Cometographia*)

E ancora: “Essendosi aperto il cielo, cadde sulla terra una specie di fiaccola ardente, la-

[18] Alexandre-Gui Pingré (1711 – 1793): astronomo e teologo francese, autore di *Cométographie* (trattato sulle comete) pubblicato a Parigi nel 1784. Osservò il transito di Venere sul disco del sole del 6 giugno 1761 dall'isola di Rodrigues, situata a est del Madagascar e oggi appartenente alla Repubblica di Mauritius.

sciando dietro di sé una lunga traccia di luce, simile a un lampo. Il suo splendore era tale che atterrò non solo quelli che erano nelle campagne ma anche chi era chiuso nelle case. Mentre questa apertura del cielo si chiudeva insensibilmente si vide la figura di un drago con i piedi blu e con la testa che sembrava crescere.”

Oltre che apportatrici di calamità, le comete furono considerate segni del cielo con i quali Dio comunicava agli uomini e messaggere della morte di re o potenti. Negli *Annales*, Tacito^[19] ci dice che Nerone temeva le comete e cercava di stornare dal suo capo il cattivo presagio mandando a morte altri grandi. Nel 79 d.C. l'imperatore Vespasiano, ormai vecchio, accolse scherzando l'apparizione di una cometa; disse che riguardava il re dei Parti, dalla lunga chioma, non lui che era calvo.

Nel Medioevo questi segni vennero presi in più seria considerazione e oggi si ha un elenco di comete che i cronisti hanno associato alla morte di altrettanti re. Alcune di esse non sono mai esistite, come quella registrata per l'anno 814 in occasione della morte di Carlo Magno. Per le altre la correlazione è solo casuale: con tanti re e potenti e la vita media molto più breve di oggi, era assai probabile che qualcuno morisse in concomitanza con l'apparizione di una cometa. Non si andava poi troppo per il sottile: si trovano comete apparse fino a tre anni prima che morisse il re del quale avrebbero annunciato la morte, e spesso apparivano comete ma non moriva nessun re. Quando a Enrico IV di Francia fu detto che gli astrologi avevano osservato una cometa che annunciava la sua morte, egli commentò che a un certo momento la loro previsione si sarebbe avverata e in seguito sarebbe stata ricordata meglio la sola occasione in cui la previsione si era compiuta di tutte le altre in cui era apparsa una cometa e lui aveva continuato a vivere.

2.3 – LE OSSERVAZIONI SCIENTIFICHE

Nel mondo occidentale le più antiche osservazioni di posizioni della testa di una cometa, giunte fino a noi, riguardano la cometa del 1433.



Fig. 2.3 – Ritratto di Paolo del Pozzo Toscanelli

Tra il 1433 e il 1472, Paolo del Pozzo Toscanelli^[20] osservò cinque grandi comete riportan-

^[19] Publio (o Gaio) Cornelio Tacito, oratore, avvocato e senatore romano, è considerato uno degli storici più importanti dell'antichità. Il luogo e la data esatti della sua nascita non sono conosciuti, nacque o nel nord Italia o nel sud della Francia o in Spagna intorno al 55. Le sue opere maggiori, gli *Annales* e le *Historiae*, illustrano la storia dell'impero romano del I secolo: dalla morte dell'imperatore Augusto, nel 14 d.C., fino a quella dell'imperatore Domiziano, avvenuta nel 96. L'ultimo dato inerente alla vita pubblica di Tacito attesta il suo proconsolato d'Asia nel 112-113, mentre la morte risale al 120 circa.

^[20] Paolo del Pozzo Toscanelli è nato a Firenze nel 1397 e morto nella stessa città nel 1482. Si laureò all'Università di Padova, alla facoltà di matematica e medicina. Tornato nella città natale, aiutò il Brunelleschi con i calcoli per la costruzione della cupola di Santa Maria del Fiore, dove oggi possiamo osservare lo gnomone che Toscanelli realizzò e che allora era il più alto mai costruito. Oltre che architetto, fu anche abile astronomo e cartografo. Fu proprio quest'ultimo suo interesse che lo spinse a teorizzare, tra i primi, che si potessero raggiungere le Indie attraverso l'Oceano Atlantico.

do le loro posizioni nel modo più accurato possibile. Il suo lavoro venne ripreso alla fine del 1800 da Giovanni Celoria^[21] che calcolò gli elementi orbitali^[22] delle comete osservate dal Toscanelli e, per ognuna di esse, disegnò una tavola equivalente eseguita con i criteri scientifici utilizzati alla fine del XIX secolo.

Completati questi studi (sbagliando il calcolo della distanza tra il continente europeo e quello asiatico), spedì una lettera a Cristoforo Colombo, nella quale lo invitava a tentare la traversata.

^[21] Giovanni Celoria è nato a Casale Monferrato (AL) il 29 gennaio 1842 ed è morto a Milano il 17 agosto 1920. Dopo la laurea ottenuta all'Università di Torino nel 1863 inizia a lavorare all'Osservatorio astronomico di Brera, diretto all'epoca da Schiaparelli; nel 1900 divenne direttore dello stesso Osservatorio e lo rimase fino al 1917. È stato anche professore di Geodesia presso il Politecnico di Milano e dal 1902 presidente della Commissione geodetica italiana. Celoria è stato anche socio dell'Accademia dei Lincei e presidente dell'Istituto Lombardo. Dal 1909 fino alla morte ha infine ricoperto la carica di senatore del Regno d'Italia.

^[22] Gli elementi orbitali sono un insieme di parametri necessari per determinare in maniera univoca un'orbita, dato un sistema ideale formato da due masse che seguano le leggi del moto di Newton e la legge della gravitazione universale. A seconda dell'insieme di variabili che si sceglie di misurare si possono definire diversi insiemi di parametri, ognuno dei quali permette di stabilire in maniera univoca la medesima orbita. In genere vengono utilizzati sei parametri orbitali: 1) l'inclinazione dell'orbita rispetto al piano dell'eclittica (i); 2) la longitudine del nodo ascendente o l'Ascensione retta del nodo ascendente (Ω); 3) l'argomento del pericentro (ω); 4) l'eccentricità dell'orbita (e); 5) il periodo orbitale (T) o il semiasse maggiore (a); 6) l'anomalia vera (θ) oppure la Longitudine media o anomalia media (M_0) all'epoca considerata.

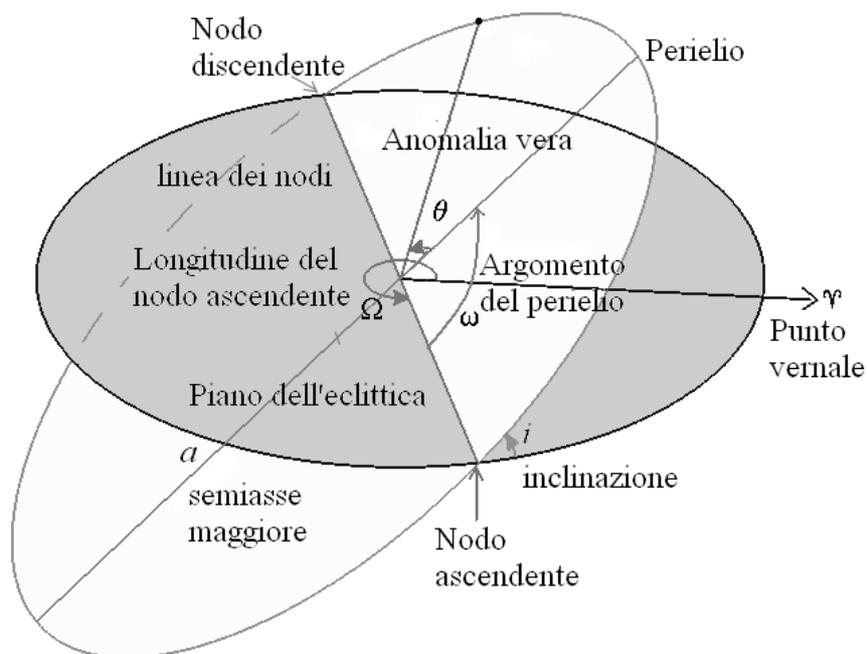


Fig. 2.4 – Gli elementi orbitali

I parametri individuano l'orbita come segue: il semiasse maggiore (o il periodo) determina le dimensioni dell'orbita; l'eccentricità la sua forma; l'inclinazione e la longitudine (o l'ascensione retta) del nodo ascendente precisano il piano orbitale; l'argomento del pericentro specifica l'orientazione dell'orbita all'interno del piano; l'anomalia vera la posizione dell'oggetto sull'orbita in funzione del tempo. Data l'imprecisione del modello newtoniano del moto orbitale, che considera i corpi celesti come oggetti puntiformi, gli elementi orbitali dei pianeti tendono a cambiare nel tempo. Per i corpi minori del Sistema Solare le perturbazioni prodotte dai pianeti risultano determinanti.

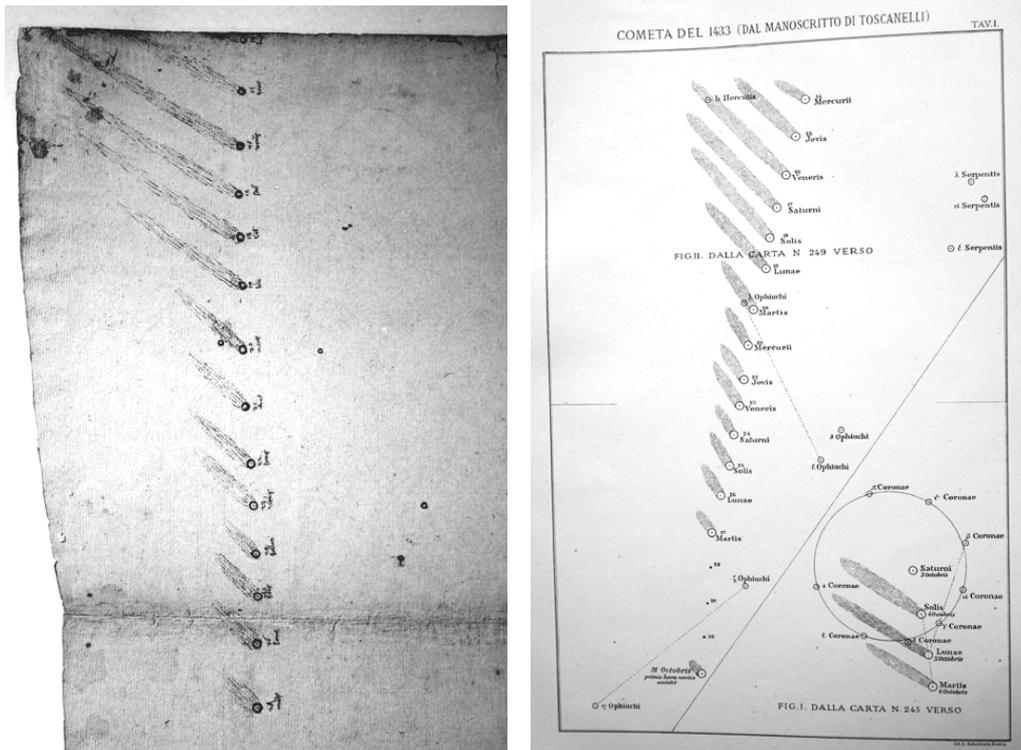


Fig. 2.5 – A sinistra una tavola di Paolo del Pozzo Toscanelli, a destra la stessa del Celoria. Immagini tratte dal sito internet <http://www.atlascoelestis.com/> di Felice Stoppa



Fig. 2.6 – Una mappa del mondo del Toscanelli

La cometa del 1472^[23] fu osservata anche dall'astronomo tedesco Johannes Müller^[24] (più noto come Regiomontano) che cercò di determinarne la distanza con il metodo della parallasse; l'intuizione era corretta, ma la misura fallì a causa dell'imprecisione degli strumenti dell'epoca.

[23] Più tardi si scoprirà che era la cometa di Halley.

[24] Johannes Müller da Königsberg è stato un importante matematico, astronomo e astrologo tedesco. Unfinden, il villaggio dove nacque il 6 giugno 1436, si trova nei pressi della cittadina di Königsberg, in Baviera (Germania). Dal 1461 visse e lavorò a Roma, e secondo l'usanza del tempo si fece chiamare con il nome corrispondente latinizzato Joannes de Regio Monte, che fu semplificato in Regiomontanus. Morì a Roma il 6 luglio 1476.



Fig. 2.7 – Ritratto del Regiomontano

Girolamo Fracastoro^[25] e Pietro Apiano^[26] furono i primi a scoprire che la coda delle comete si presenta sempre lungo la direzione del Sole, ma dalla parte opposta ad esso.



Fig. 2.8 – A sinistra il ritratto di Girolamo Fracastoro in una stampa dell'epoca. A destra Pietro Apiano

Apiano nel suo *Astronomicum Cesareum*, dedica ampio spazio alla rappresentazione delle comete da lui osservate. I disegni le raffigurano sempre con la coda rivolta dalla parte opposta al Sole e una di queste fu la cometa del 1531, che successivamente fu riconosciuta come una delle apparizioni della cometa di Halley.

Le osservazioni della Grande Cometa del 1577 fatte da Tycho Brahe^[27] furono fundamenta-

^[25] Girolamo Fracastoro nacque a Verona nel 1478: è stato un medico, filosofo, astronomo e geografo, teologo e letterato italiano. Fu collega e amico di Copernico, e lavorò anche come professore di logica all'Università di Padova. È uno dei fondatori della moderna patologia. Nel 1538 descrisse uno strumento in funzione astronomica, poi realizzato da Galileo Galilei decine di anni dopo: il cannocchiale. Morì a Innaffi (Verona) nel 1553.

^[26] Pietro Apiano è la traduzione in italiano di Petrus Apianus che a sua volta è la latinizzazione di Peter Bienewitz (= delle Api). Fu un cosmografo, astronomo e matematico tedesco. Nacque a Leisnig, in Sassonia, nel 1495 e morì a Ingolstadt nel 1552. Disegnò carte geografiche molto perfezionate rispetto a quelle in uso nel suo tempo. Propose pure un metodo per la determinazione della longitudine terrestre, basato sull'osservazione della distanza angolare della Luna da stelle o pianeti (*Cosmographicus liber*, 1524), che restò in vigore nella navigazione fino a tutto il secolo XIX. Professore di astronomia a Vienna, Innsbruck e Ingolstadt, fece importanti osservazioni sulle comete. La sua opera più famosa fu l'*Astronomicum Caesareum*, pubblicato nel 1540 e dedicato all'imperatore Carlo V.

^[27] Tycho Brahe nacque il 14 dicembre 1546 a Knudstrup in Scania, oggi in Svezia, allora in Danimarca. È stato uno dei più grandi astronomi della storia: fece costruire Uraniborg, che divenne uno dei primi "istituti di ricerca". Brahe capì che il progresso nell'astronomia poteva essere ottenuto solo con un'osservazione sistematica e rigorosa e tramite l'uso di strumenti che fossero i più accurati possibile. Migliorò gli strumenti esistenti e ne creò di nuovi. Le sue misurazioni a

li; egli dimostrò infatti che la cometa si muoveva oltre la sfera sublunare a una distanza dalla Terra di almeno sei volte quella della Luna. Ciò gli permise di affermare che non ci potevano essere sfere cristalline se corpi celesti come le comete potevano tranquillamente passare attraverso di esse. Con le osservazioni di Tycho le comete cominciarono a trovare la loro giusta dimensione celeste.

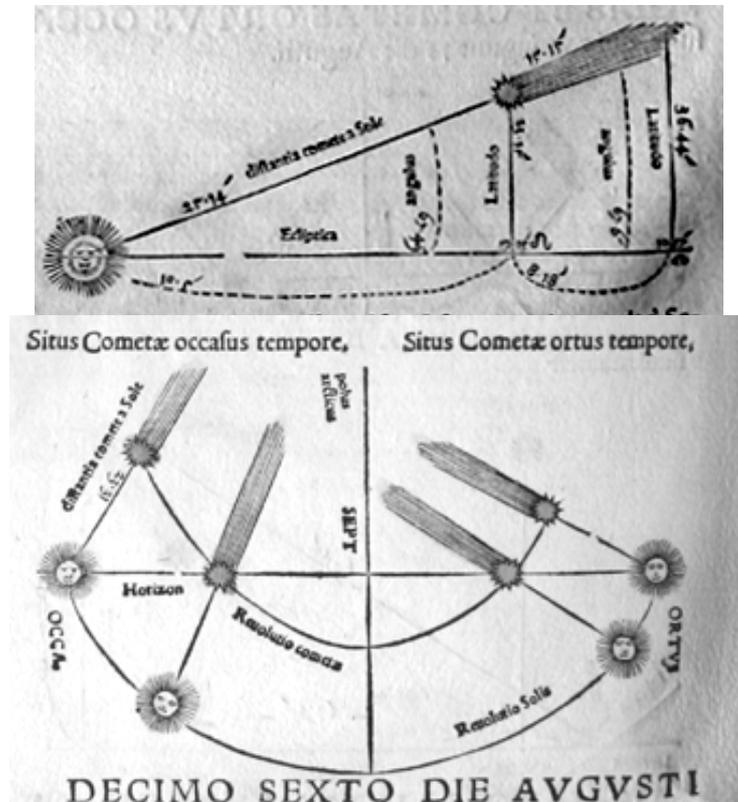


Fig.2.9 – Disegni di comete tratti dall'*Astronomicum Cesareum* di Pietro Apiano.



Fig. 2.10 – La cometa di Tycho del 1577 vista da Praga, in una stampa dell'epoca.

occhio nudo erano accurate al minuto d'arco; dopo la sua morte, avvenuta a Praga il 24 ottobre 1601, esse vennero utilizzate da Keplero.



Fig. 2.11 – In alto un ritratto di Tycho Brahe; a destra l'orbita delle comete nel modello del mondo di Tycho.

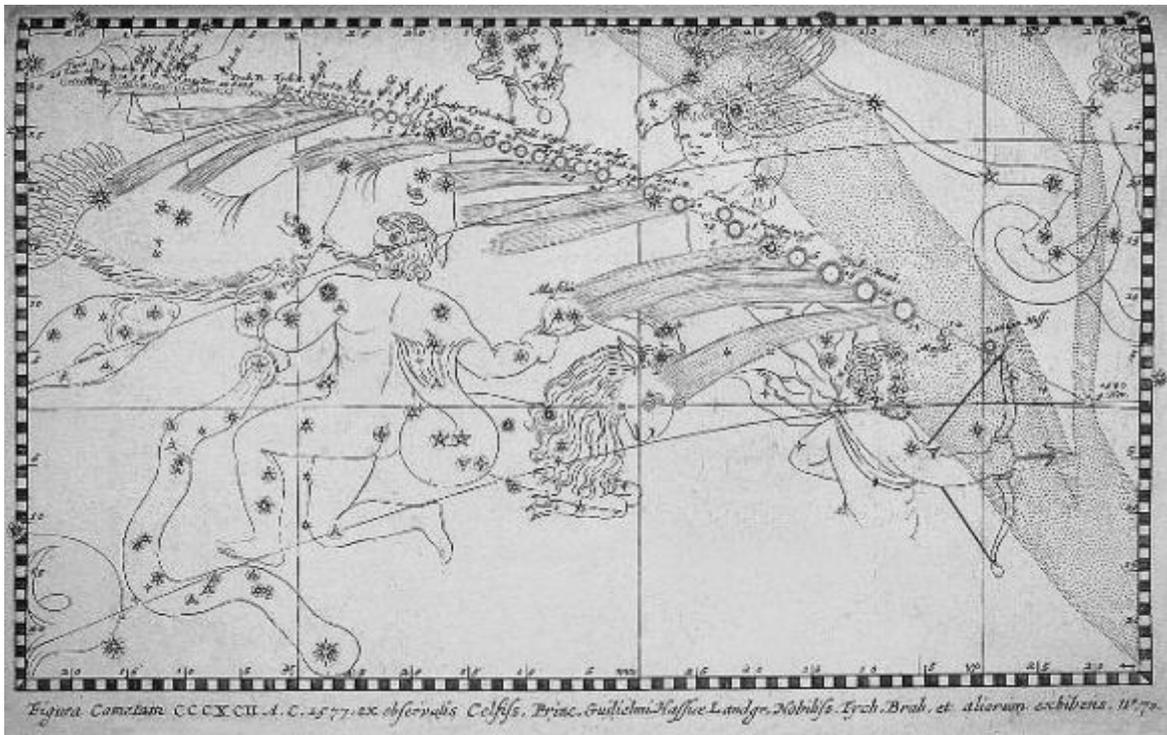
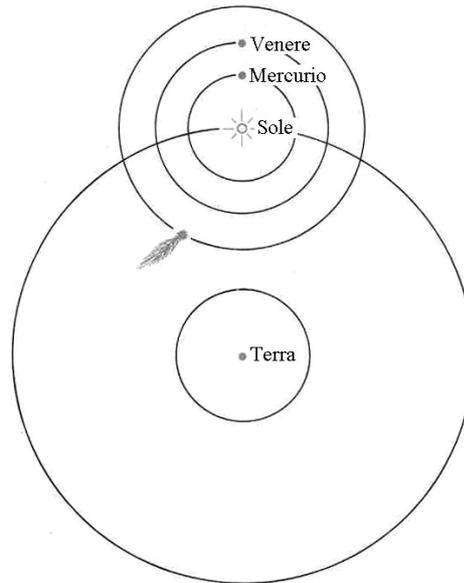


Fig. 2.12 – La cometa del 1577 dal *Theatrum Cometicum* di Lubenietzki.

Anche se nel mondo della scienza si comincia ad indagare seriamente sulle comete, le credenze e le superstizioni millenarie che le rendevano tanto temibili non vengono ancora scalfite; alla fine del XVI secolo circolavano ancora le stesse idee del Medioevo.

Martin Lutero^[28] era convinto che comete ed eclissi fossero segni della collera divina e tentò di allontanare con preghiere gli effetti nefasti della cometa del 1532.

Meno catastrofico, anche se convinto del loro significato religioso, fu Paracelso^[29], che nel

[28] Martin Lutero nacque a Eisleben (Sassonia) il 10 novembre 1483 e morì nella stessa città il 18 febbraio 1546. È stato un teologo, padre spirituale della Riforma protestante.

[29] Philippus Aureolus Theophrastus Bombastus von Hohenheim (detto Paracelsus o Paracelso) nacque il 14 novembre 1493 a Einsiedeln in Svizzera e morì il 24 settembre 1541 a Salisburgo, in Austria. È noto come alchimista, astrologo,

1531 affermava che le comete erano messaggeri celesti inviati da Dio per annunciare eventi buoni o cattivi.

Il politico ed economista francese Jean Bodin^[30], dedicatosi anche alla scienza, riteneva che le comete fossero le anime delle persone illustri portate trionfalmente in cielo e giungeva alla curiosa conclusione che, mentre le anime dei capi salivano al cielo sotto forma di comete, i popoli, abbandonati a se stessi, si lasciavano trasportare dalla guerra civile che portava con sé carestie ed epidemie.

Ancora più strabilianti sono le descrizioni di ciò che si affermava di aver visto. Il chirurgo francese A. Paré^[31], nella sua opera del 1751 *De monstres et prodiges*, descrisse e illustrò la cometa apparsa nel 1528: *"Questa cometa era così orribile e spaventosa e generava un così gran terrore nel volgo, che alcuni morirono di paura; altri caddero ammalati. Appariva essere di lunghezza eccessiva, ed era color sangue; alla sua sommità si vedeva la figura di un braccio curvo, che teneva in mano una grande spada, come se avesse voluto colpire. In cima alla punta c'erano tre stelle. Ai due lati dei raggi di questa cometa si vedeva un gran numero di mannaie, coltelli, spade macchiate di sangue tra le quali c'era un gran numero di facce umane orribili, con le barbe e i capelli irti."*



Fig. 2.13 – Giovanni Keplero

Il primo a formulare un'ipotesi scientifica sulla costituzione delle comete e sulla loro dinamica fu Keplero^[32] nel primo ventennio del '600.

medico ed è una tra le figure più rappresentative del Rinascimento. Si laureò all'Università di Ferrara, più o meno negli stessi anni in cui vi si laureò Copernico.

^[30] Jean Bodin (Angers 1530 - Laon 1596), filosofo, economista e pensatore politico francese, fu avvocato del parlamento parigino e consigliere alla corte di re Enrico III di Francia.

^[31] Ambroise Paré (Bourg-Hersent, Laval, 1509 – Parigi, 20 dicembre 1590) è stato un medico e chirurgo francese, considerato come il padre della chirurgia moderna. Era il chirurgo del re di Francia Enrico II e della regina Caterina de' Medici.

^[32] Johannes Kepler o Giovanni Keplero (Weil der Stadt, 27 dicembre 1571 – Regensburg, 15 novembre 1630) è stato un astronomo e matematico tedesco, forse uno dei più grandi in assoluto. Scoprì le leggi del movimento dei pianeti che sono chiamate appunto Leggi di Keplero. Ereditò da Tycho Brahe una gran quantità dei più precisi dati mai raccolti sulle posizioni dei pianeti e, grazie ad essi riuscì a determinare l'orbita di Marte. A differenza del suo maestro, Keplero adottò il modello copernicano, e sulla base di esso giunse a formulare le sue tre leggi sui movimenti planetari.

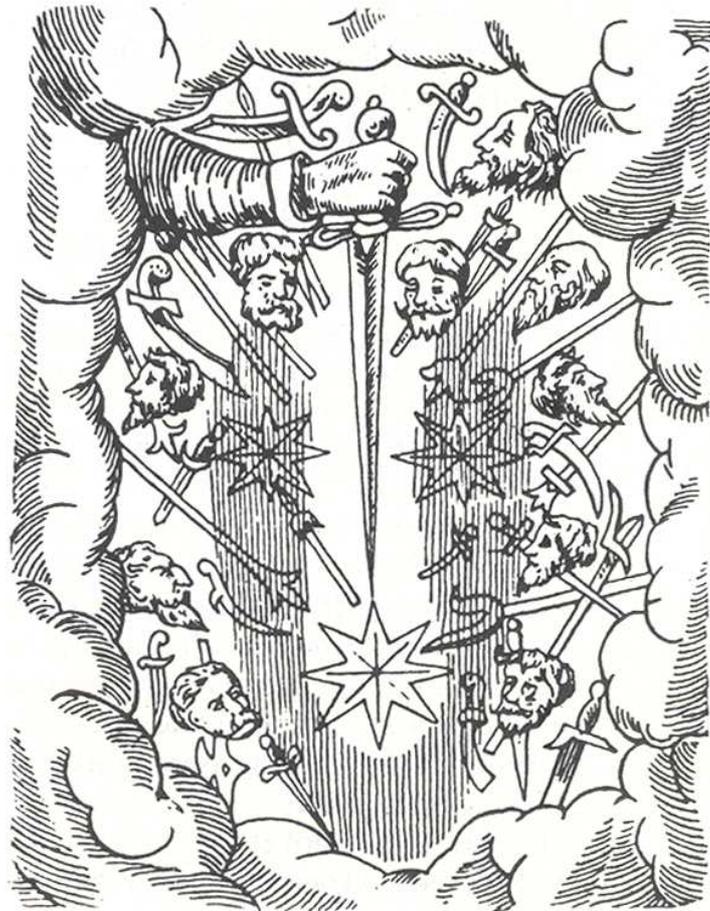


Fig. 2.14 – Illustrazione tratta dall'opera di A. Paré.

Egli riteneva che le stelle fossero situate in un guscio sferico alla distanza di 60 milioni di raggi terrestri dal Sole e che l'interno di tale sfera fosse pieno di un materiale che potesse condensare dando origine alle comete. I raggi solari obbligavano quindi le comete a muoversi in linea retta e lentamente le distruggevano. La coda era dovuta al materiale della cometa spinto dai raggi solari.

Un altro importante contributo allo studio delle comete fu dato dall'astronomo Johannes Hevelius^[33]. Nella sua *Cometographia* egli ipotizzò che il tragitto delle comete, almeno in prossimità del perielio^[34], si dovesse compiere su di un'orbita curva; le sue idee sull'origine delle comete erano però sbagliate. Egli riteneva che fossero delle eruzioni a forma di disco espulse dal Sole e che, lanciate dalla sua superficie, potessero avere un'orbita parabolica, iperbolica o ellittica.

^[33] Johann Hewelke o Johannes Hewel (in tedesco) o Jan Heweliusz (in polacco) latinizzato in Johannes Hevelius, nacque a Danzica, in Polonia, il 28 gennaio 1611, studiò giurisprudenza e viaggiò in Inghilterra e Francia. Nel 1634 tornò nella città natale per lavorare nell'impresa di famiglia (produzione di birra), e divenne anche consigliere comunale. Dal 1639 il suo interesse principale fu l'astronomia; nel 1641 costruì a casa sua un osservatorio molto ben fornito. Fece osservazioni sulle macchie solari e dedicò quattro anni alla mappatura della superficie lunare, scoprendo il fenomeno della librazione in longitudine. Pubblicò i suoi risultati in *Selenographia* nel 1647, un lavoro per il quale si guadagnò il titolo di "fondatore della topografia lunare". Negli anni seguenti scoprì quattro comete (1652, 1661, 1672 e 1677) e teorizzò la loro rivoluzione in traiettorie paraboliche attorno al Sole. Il 26 settembre 1679 il suo osservatorio fu distrutto da un incendio, ma riparò il danno giusto in tempo per poter osservare la grande cometa del dicembre 1680. Morì il 28 gennaio 1687.

^[34] Ricordiamo che in base alla prima legge di Keplero i pianeti orbitano intorno al Sole descrivendo un'ellisse di cui esso occupa uno dei due fuochi. Il perielio è il punto dell'orbita più vicino al Sole, l'afelio il più lontano.



Fig. 2.15 – Giovanni Domenico Cassini.

La disputa sulla forma delle orbite delle comete durò alcune decine di anni; altri astronomi, tra cui Giovanni Domenico Cassini^[35], si espressero a favore di un moto rettilineo (egli applicò questa ipotesi alla cometa del 1652 e a diverse altre successive, ma con risultati poco convincenti).

Nel 1680 apparve una cometa che provocò il solito terrore nelle popolazioni europee, ma ebbe il merito di produrre importanti ricerche pratiche e nuove fondamentali scoperte da parte di Isaac Newton^[36] e Edmond Halley^[37], che riuscirono con il loro lavoro a risolvere il problema della forma delle orbite.

Newton diede un contributo fondamentale allo studio delle comete ideando un metodo per determinarne l'orbita con sole tre osservazioni; per lui le comete erano corpi celesti al pari dei pianeti e dovevano percorrere orbite iperboliche, paraboliche o ellittiche (in quest'ultimo caso sarebbero ritornate dopo un certo numero di anni). Dalle osservazioni si possono determinare i valori dei parametri orbitali e quindi l'orbita. La cometa del 1680 gli servì per testare il suo metodo. È fuor di dubbio che Newton fu lo scienziato che ricoprì il ruolo profetizzato da Seneca.

^[35] Giovanni Domenico Cassini nacque a Perinaldo (Imperia) l'8 giugno 1625 e fu astronomo e ingegnere (ma anche medico e biologo). Fu professore di astronomia all'Università di Bologna e divenne, nel 1671, il direttore dell'Osservatorio di Parigi. Assieme a Hooke, Cassini è lo scopritore della Grande Macchia Rossa di Giove (circa 1665) e fu il primo ad osservare quattro delle lune di Saturno. Scoprì inoltre la divisione negli anelli di Saturno che oggi porta il suo nome. Attorno al 1690 fu il primo ad osservare la rotazione differenziale dell'atmosfera di Giove. Morì a Parigi il 14 settembre 1712.

^[36] Sir Isaac Newton nacque a Woolsthorpe-by-Colsterworth il 25 dicembre 1642: è stato filosofo, matematico, fisico e alchimista. È considerato una delle più grandi menti di tutti i tempi. Ed è universalmente noto per il suo contributo alla meccanica classica, anche se contribuì in maniera fondamentale a più branche del sapere. Pubblicò *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* nel 1687, opera nella quale descrisse la legge di gravitazione universale e, attraverso le sue leggi del moto, creò i fondamenti per la meccanica classica. Newton inoltre condivise con Gottfried Wilhelm Leibniz la paternità dello sviluppo del calcolo differenziale. Contribuì alla Rivoluzione scientifica e al progresso della teoria eliocentrica. Newton generalizzò le leggi di Keplero del movimento dei pianeti dimostrando che le orbite (come quelle delle comete) potevano essere non solo ellittiche ma anche iperboliche e paraboliche. Fu anche il primo a provare che la luce bianca è composta da tutti gli altri colori; infine avanzò l'ipotesi che la luce fosse composta da particelle. Morì a Londra il 20 marzo 1727.

^[37] Edmond Halley nacque a Haggerston, Londra, il 29 ottobre 1656: è stato astronomo, matematico, fisico, geofisico e meteorologo inglese. Dal 1673 studiò al Queen's College di Oxford, che lasciò nel 1676. Visitò l'isola di Sant'Elena con l'intenzione di studiare le stelle dell'emisfero australe. Ritornato in Inghilterra nel novembre del 1678, passò la maggior parte del suo tempo osservando la Luna. Un problema che attirò la sua attenzione fu la prova delle leggi di Keplero sul moto planetario. Nell'agosto del 1684 andò a Cambridge per discuterne con Isaac Newton e scoprì che questi aveva già risolto il problema ma non aveva ancora pubblicato nulla. Halley lo convinse a scrivere *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (1687), che pubblicò a proprie. Nel 1705 pubblicò *Synopsis Astronomiae Cometicarum* nel quale espose il suo convincimento che gli avvistamenti cometari del 1456, 1531, 1607 e 1682 erano relativi alla stessa cometa, e ne predisse il ritorno nel 1758. Quando ciò accadde, divenne nota come la Cometa di Halley. Nel 1720 successe a John Flamsteed come Astronomo Reale, impiego che mantenne fino alla morte, avvenuta il 14 gennaio 1742.

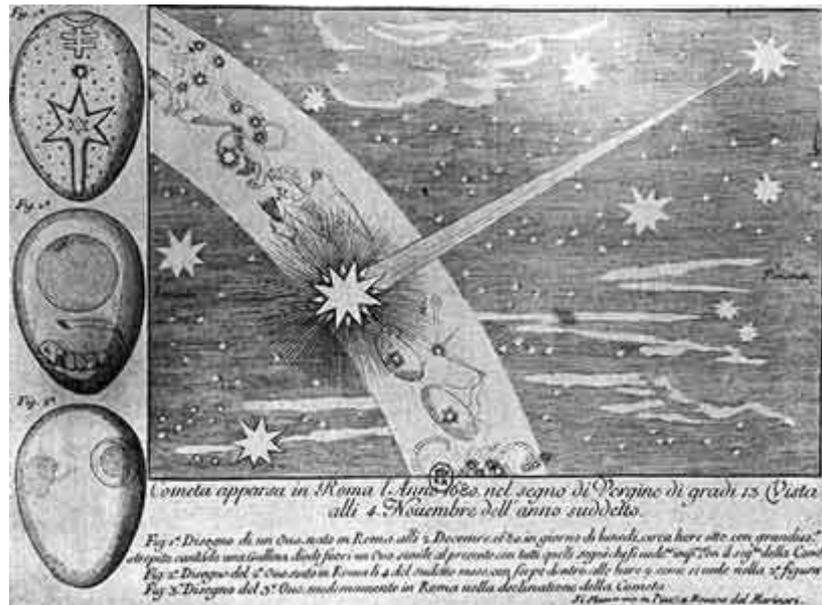


Fig. 2.16 – Nella nota la descrizione di un uovo prodigioso, prodotto da una gallina romana, che portava sul guscio i segni della cometa del 1680.



Fig. 2.17 – Edmond Halley

Se per due comete si ottengono gli stessi parametri orbitali se ne deduce che l'oggetto che si sta osservando è lo stesso. Dalla differenza tra due passaggi consecutivi al perielio si determina il periodo.

Halley calcolò i parametri orbitali della cometa del 1682 utilizzando il metodo di Newton, e fece lo stesso lavoro con altre comete note del passato. Il confronto dei risultati ottenuti gli fece sospettare che la cometa fosse già passata. Così scriveva a Newton il 28 settembre 1695: *“Mi raccomando di procurare per me ciò che osservò Mr. Flamsteed della cometa del 1682 soprattutto nel mese di settembre, perché io sono sempre più convinto che al momento attuale abbiamo visto quella cometa tre volte, fin dall'anno 1531 ...”*



Fig. 2.18 – Acquerello della cometa del 1680 vista da Rotterdam.



Fig. 2.19 – Isaac Newton

Nel 1705 Halley si persuase definitivamente. Così scriveva: *“E certamente molte cose mi persuadono a credere che la cometa dell’anno 1531, osservata da Apiano, fosse la stessa descritta da Keplero e Longomontano nell’anno 1607, e che io stesso vidi e osservai nuovamente al suo ritorno nell’anno 1682. Tutti gli elementi concordano, tranne il fatto che c’è una disuguaglianza di periodi; ma questa non è tanto grande da non poter essere attribuita a cause fisiche. [...] Quanto più esposta a tali perturbazioni sarà la cometa che si allontana fino a una distanza circa 4 volte maggiore di quella di Saturno e nella quale un piccolo aumento di velocità potrebbe cambiare la sua orbita da un’ellisse a una parabola? [...] Posso dunque predire con fiducia il suo ritorno nell’anno 1758. Se questa predizione si avvererà, non ci sarà motivo di dubitare che debbano ritornare le altre.”*



Fig. 2.20 – Arazzo di Bayeux. Prima documentazione storica del passaggio della cometa di Halley (1066). Harold, re d’Inghilterra, ascolta le pessime previsioni tratte dal passaggio della cometa. Il popolo guarda con stupore.

Successivi calcoli portarono Halley a prevedere il passaggio tra a fine del 1758 e l’inizio del 1759. In seguito altri illustri astronomi calcolarono l’orbita tenendo conto delle perturbazioni indotte da Giove e da Saturno. La cometa fu rivista da un contadino di Dresda, appassionato di astrono-

mia, la notte di Natale del 1758.

Ricerche storiche permettono oggi di rintracciare con certezza tutti i passaggi di questa cometa a partire dal 240 a.C..

Anno	giorno e mese	Anno	giorno e mese	Anno	giorno e mese
240 a.C.	25 mag	530	27 set	1301	25 ott
164 a.C.	12 nov	607	15 mar	1378	10 nov
87 a.C.	6 ago	684	2 ott	1456	9 giu
12 a.C.	10 ott	760	20 mag	1531	26 ago
66	25 gen	837	28 feb	1607	27 ott
141	22 mar	912	18 lug	1682	15 set
218	17 mag	989	5 set	1759	13 mar
295	20 apr	1066	20 mar	1835	16 nov
374	16 feb	1145	18 apr	1910	20 apr
451	28 giu	1222	28 set	1986	9 feb

Tabella 2.1 – I 30 passaggi della cometa di Halley storicamente accertati, la data è quella del passaggio al perielio.



Fig. 2.21 – Disegni cinesi di comete

Ci sono indicazioni di passaggi precedenti, ma sono troppo confuse e a volte contraddittorie, tanto da non poter essere scientificamente accettabili. Il grado maggiore di attendibilità l'hanno le indicazioni dei passaggi del 1057 a.C. e del 466 a.C.. In questo tipo di ricerca sono molto attivi alcuni astronomi cinesi. Nel 1978 è stato pubblicato in Cina un documento molto prezioso per la storia delle comete: un atlante stellare contenuto in una tomba del 168 a.C. risalente probabilmente al IV secolo a.C. e che riporta disegni di comete ancora più vecchie.

I calcoli più precisi del passaggio della cometa di Halley, previsto per il 1835, furono ese-

guiti da Padre Francesco De Vico^[38] e gli permisero di rivedere per primo la cometa il 5 agosto 1835.

Dopo il passaggio della cometa di Halley del 1758 la ricerca delle comete divenne una delle attività preferite dagli astronomi... anche perché il 17 dicembre 1831 il re di Danimarca Federico VI stabilì di conferire una medaglia d'oro del valore di 20 ducati a chi otteneva il riconoscimento della priorità della scoperta di una cometa telescopica.

Le comete erano ormai viste come corpi planetari e le loro orbite determinabili con straordinaria precisione. Le perturbazioni prodotte dai grandi pianeti facevano intuire che la massa del nucleo doveva essere molto piccola, ma sulla loro struttura fisica e sulle loro dimensioni non si sapeva quasi nulla. Bisognerà aspettare la seconda metà del 1900 per avere idee abbastanza precise.

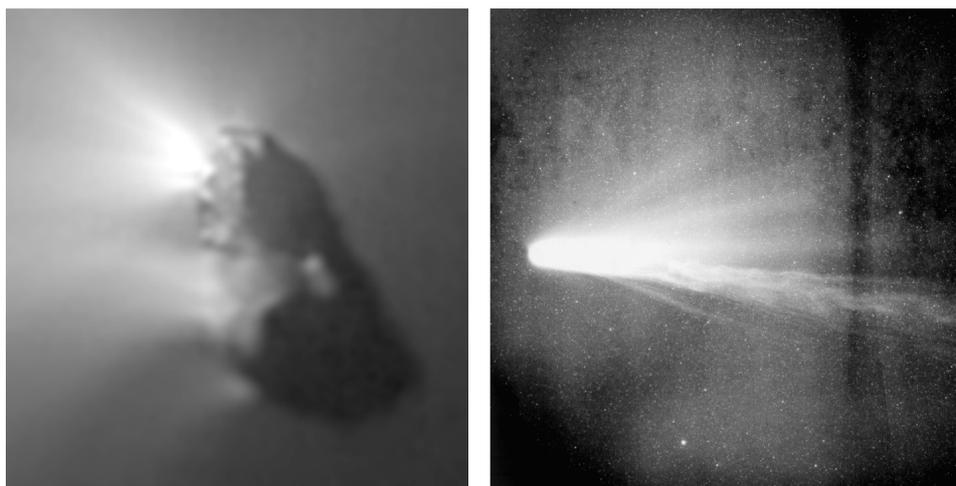


Fig. 2.22 – Il vero volto della cometa di Halley. A sinistra un'immagine del nucleo della cometa ripresa dalla sonda Giotto nel suo incontro ravvicinato avvenuto nel 1986. A destra un'immagine della cometa ripresa il 12 aprile 1986 con il telescopio Michigan Schmidt all'Osservatorio Interamericano del Cerro Tololo in Cile.

Per capire come la gente comune vedeva le comete nel XIX secolo basta ricordare ciò che accadde durante il passaggio della cometa di Halley del 1910.

La comunità scientifica e i mass-media riuscirono a trasmettere grande curiosità per il passaggio della cometa.

Se ne interessarono tutti, e anche poeti di fama come Giovanni Pascoli dedicarono dei versi alla cometa:

^[38] Francesco de Vico nacque a Macerata il 19 maggio 1805. Entrato nella Compagnia di Gesù nel 1823, prese i voti nel 1837. L'anno successivo gli fu affidata la direzione dell'Osservatorio del Collegio Romano, dove era titolare della cattedra di matematica e astronomia. Si interessò di effemeridi cometa-rie e, nel corso delle sue ricerche sulle nebulose, scoprì tra il 1844 e il 1847 sette comete, due delle quali sono periodiche e portano il suo nome: la 54P/De Vico–Swift–NEAT e la 122P/De Vico. Fece osservazioni per la determinazione del periodo di rotazione di Venere; osservò Saturno riscoprendo alcuni dei suoi satelliti e ci sono indicazioni che fanno pensare che la divisione di Encke possa essere stata osservata prima da lui. Negli stessi anni aveva intrapreso una rassegna del cielo visibile da Roma fino a stelle di 11^a magnitudine, ma gli avvenimenti politici del '48 lo costrinsero all'esilio negli Stati Uniti d'America. Morì a Londra il 15 novembre 1848.

*O tu, stella randagia,
astro disperso,
che forse cerchi,*

*nel tuo folle andare,
la porta onde fuggir dall'universo!
[...]*



Fig. 2.23 – Ritaglio di un giornale americano relativo alle feste per il passaggio della cometa di Halley del 1910.

Si legge:

Feste per la cometa sono ora la moda di Parigi

Parigi – I parigini non hanno perso il loro senso dell'umorismo o dell'occasione di festeggiare. L'ultima novità è la spedizione di biglietti che recitano: "Signori e Signore, si richiede l'onore della Vostra presenza a trascorrere la notte del 18 maggio, in occasione del passaggio della cometa di Halley nei pressi della Terra." Ai signori è richiesto l'abito da sera blu e alle signore vestiti "del colore del firmamento". Numerose feste saranno organizzate nei dintorni di Parigi come a Saint Cloud e Sevres.

Secondo i calcoli la cometa avrebbe effettuato il suo passaggio al perielio trovandosi tra la Terra e il Sole e un articolo di Camille Flammarion^[39], ripreso dalla stampa, scatenò il panico. La notizia: la notte tra il 18 e il 19 maggio la coda della cometa avrebbe potuto investire la Terra. Fu il panico! La notizia fu equivalente all'annuncio della fine del mondo.



Fig. 2.24 – Camille Flammarion.

Uno degli aneddoti più straordinari legati al passaggio della cometa di Halley nel 1910 è il fatto che vennero messe in vendita delle bottigliette d'aria pura, "per poter respirare durante il pas-

^[39] Nicolas Camille Flammarion nacque a Montigny-le-Roi il 26 febbraio 1842; fu astronomo francese e autore di più di cinquanta opere, tra le quali guide divulgative popolari di astronomia. Iniziò la sua carriera di astronomo nel 1858 come collaboratore dell'Osservatorio di Parigi. Fondò nel 1883 l'osservatorio privato di Juvisy-sur-Orge e nel 1887 la Società astronomica di Francia, della quale fu il primo presidente. Fu anche editore della rivista L'Astronomie. Nonostante il suo bagaglio scientifico fu molto affascinato da teorie sullo spiritismo e la reincarnazione. Questi interessi influenzarono alcune delle sue opere che possono essere definite come fantascientifiche. Morì a Juvisy-sur-Orge il 3 giugno 1925.

saggio della cometa”. Nonostante la stranezza della cosa, chi ebbe questa idea fece dei soldi!

Ma non successe nulla: la cometa di Halley passò, arrivò l'alba del giorno dopo e la vita sulla Terra riprese normalmente per tutti, tranne per quei creduloni che avevano sperperato tutte le loro fonti di sostentamento convinti che fosse arrivata la fine del mondo.



Fig. 2.25 – Immagini catastrofiche legate al passaggio della cometa di Halley del 1910 riprese dalla stampa dell'epoca. Nel sito internet: <http://www.geocities.com/~stuar1031/comets1.html> si possono trovare molti altri esempi

Dopo decenni di calcoli e osservazioni effettuate da Terra, con l'inizio dell'era spaziale vennero proposti programmi di esplorazione cometaria tramite sonde-robot.



Fig. 2.27 – *Adorazione dei magi*, particolare degli affreschi della Cappella degli Scrovegni a Padova realizzati da Giotto tra il 1304 e il 1306. Potrebbe essere un'immagine realistica della cometa di Halley nel passaggio del 1301. È comunque la prima volta che una cometa è associata alla natività.

A differenza di quanto era capitato con altri corpi celesti del sistema solare, la prima missione importante verso una cometa fu progettata ed effettuata dall'ESA (l'*Agenzia Spaziale Europea*) verso la cometa di Halley per il passaggio previsto nel 1986^[40]. La sonda fu battezzata *Giotto*^[41], in onore del pittore italiano che nel 1301 per primo la dipinse.

Nonostante le molte ipotesi fatte, ancora non era chiaro di che cosa fossero costituite le comete e l'ESA aveva deciso di intraprendere una missione considerata impossibile: avvicinarsi al nucleo della cometa di Halley per scoprirne la consistenza e la composizione chimica.

Contemporaneamente alla sonda *Giotto*, verso la cometa di Halley, furono lanciate due son-

^[40] A onore del vero l'esplorazione di asteroidi e comete per mezzo di sonde spaziali ebbe inizio nel 1978 con la sonda americana *ICE* (*International Cometary Explorer*), ma l'evento che portò alla ribalta questo tipo di imprese fu la missione *Giotto*. Successivamente nel 1991 la *Galileo* inviò a Terra le prime immagini ravvicinate di 951 Gaspra e la stessa sonda nel 1993 passò a breve distanza da 243 Ida. Dopo il fallimento della sonda *Valentine* che non riuscì a riprendere immagini dell'asteroide 1620 Geographos, nel 1997 la *NEAR* (*Near Earth Asteroid Rendezvous*), nel suo viaggio verso il pianetino Eros, su cui si posò il 12 febbraio 2001, sorvolò 253 Mathilde. La *Deep Space-1* (DS 1) compì un volo radente (26 km di quota) di 9969 Braille (purtroppo si hanno solo due immagini a bassa risoluzione a causa di un malfunzionamento della sonda stessa) e il 22 settembre 2001 si avvicinò alla cometa Borrelly effettuando rilevamenti del nucleo. La sonda *Stardust* nel novembre 2002 riprese diverse immagini (purtroppo anch'esse a bassa risoluzione) del pianetino 5535 Annefrank e il 15 gennaio 2006 ha riportato sulla Terra alcuni campioni della cometa Wild 2. Nel 2003 la NASA diede il via alla missione *CONTOUR* per studiare la cometa di Encke, ma purtroppo fallì. Una missione sulla quale punta molto l'ESA è *Rosetta*; è stata lanciata nel 2004 e ha l'obiettivo di studiare la cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko, che raggiungerà nel 2014. È costituita di due elementi: la sonda vera e propria e il lander *Philae* che si poserà sulla cometa. Lungo il suo percorso sorvolerà l'asteroide 21 Lutetia (10 luglio 2010). *Deep Impact* è una sonda spaziale della NASA progettata per studiare la composizione dell'interno di una cometa; il 4 luglio 2005 una parte di essa ha sì schiantato sul nucleo della cometa Tempel 1, portando alla luce i detriti provenienti dall'interno. La *New Horizons* è una sonda spaziale lanciata dalla NASA il 17 gennaio 2006 per l'esplorazione (2015) del pianeta nano Plutone e del suo satellite Caronte; la missione prevede che la sonda continui il suo viaggio all'interno della fascia di Kuiper. La missione *Dawn* è stata sviluppata dalla NASA per raggiungere ed esaminare gli asteroidi Cerere e Vesta; il lancio, inizialmente previsto per il 7 luglio 2007, è stato rinviato a settembre per motivi tecnici.

^[41] Confronta il sito internet <http://www.esa.int/science/giotto>

de russe, (Vega 1 e 2) ed una giapponese che però si mantennero distanti dal nucleo. Si sapeva infatti che una cometa libera particelle di varia massa che avrebbero colpito le sonde alla velocità di circa 70 km/s, velocità alla quale anche particelle inferiori al grammo portano una energia simile a quella di un urto contro un miro di una motocicletta che viaggia a 40 km/h.

Il 14 marzo 1986 la sonda Giotto, dopo un viaggio durato circa otto mesi (era partita nel luglio del 1985 con un razzo Ariane 1 dalla Guyana Francese), ad una distanza dalla Terra di 145 milioni di chilometri, riuscì ad avvicinarsi fino a 600 metri dal nucleo della cometa.

Il controllo della missione, a Darmstadt in Germania, diffuse in tutto il mondo il vero volto della cometa di Halley: immagini in cui spiccavano un “patatone” più nero del carbone^[42] di 16 km per 8 km in cui spiccavano getti di gas e di plasma.

La missione si è rivelata un grande successo: la sonda Giotto è sopravvissuta a quell'incontro e ad uno successivo con la cometa Grigg-Skjellerup, anche se da una distanza molto maggiore rispetto alla Halley.

Al giorno d'oggi il passaggio di una cometa non è più visto come causa di eventi drammatici per l'umanità, anche se... Nel 1995 apparve la cometa Hale-Bopp, una delle più grandi degli ultimi secoli, che passò al perielio nel marzo del 1997 e tra il settembre 1996 e il marzo 1997 la zona tra le Marche e l'Umbria fu investita da un terrificante terremoto. Più di una volta in quel periodo mi son sentito chiedere se la cometa aveva qualche connessione con il terremoto.



Fig. 2.26 – La cometa Hale-Bopp ripresa da A. Angeletti nel periodo del passaggio al perielio alla fine di marzo 1997.

2.4 – LA STELLA DEI RE MAGI

¹*Gesù nacque a Betlemme di Giudea, al tempo del re Erode. Alcuni Magi giunsero da oriente a Gerusalemme e domandavano: ²"Dov'è il re dei Giudei che è nato? Abbiamo visto sorgere la sua stel-*

^[42] La cometa di Halley si rivelò tra gli oggetti più scuri del sistema solare: riflette solo il 4 % della luce che riceve.

la, e siamo venuti per adorarlo". ³All'udire queste parole, il re Erode restò turbato e con lui tutta Gerusalemme. ⁴Riuniti tutti i sommi sacerdoti e gli scribi del popolo, s'informava da loro sul luogo in cui doveva nascere il Messia. ⁵Gli risposero: "A Betlemme di Giudea, perché così è scritto per mezzo del profeta: ⁶E tu, Betlemme, terra di Giuda, non sei davvero il più piccolo capoluogo di Giuda: da te uscirà infatti un capo che pascerà il mio popolo, Israele. ⁷Allora Erode, chiamati segretamente i Magi, si fece dire con esattezza da loro il tempo in cui era apparsa la stella ⁸e li inviò a Betlemme esortandoli: "Andate e informatevi accuratamente del bambino e, quando l'avrete trovato, fatemelo sapere, perché anch'io venga ad adorarlo". ⁹Udite le parole del re, essi partirono. Ed ecco la stella, che avevano visto nel suo sorgere, li precedeva, finché giunse e si fermò sopra il luogo dove si trovava il bambino. ¹⁰Al vedere la stella, essi provarono una grandissima gioia. ^[43]

Si è scritto molto su questa stella^[44], ma essenzialmente possiamo distinguere due posizioni: una fideistica, l'altra naturalistica.

Nel primo caso la particolarità del racconto evangelico, che presenta un evento assolutamente miracoloso quale la nascita del figlio di Dio, permette di vedere la stella come un fenomeno al di fuori delle leggi naturali. Ci sono diversi biblisti che sostengono questa tesi^[45]: "Altri, infine, sostengono che si trattò di una meteora speciale che non si muoveva secondo le leggi naturali [...]. La stella vista in Oriente si presentava con caratteristiche eccezionali; la sua apparizione non si può spiegare in nessun modo come fenomeno comune ed ordinario; resta pertanto esclusa ogni interpretazione puramente naturalistica [...]. I Magi compresero bene che si trattava di qualcosa al di sopra dell'ordine naturale". Anche *La Sacra Bibbia*^[46] nella nota al brano di Matteo citato sopra, sostiene che: "La stella, veduta dai Magi, secondo l'opinione più probabile, dedotta dalle sue caratteristiche, era una meteora straordinaria, formata da Dio espressamente per dare ai popoli il lieto annunzio della nascita del Salvatore"

Le ipotesi naturalistiche si basano su alcune considerazioni storiche e astronomiche.

L'analisi di diversi dati storici porta alla conclusione che la nascita di Cristo non sia avvenuta nell'anno 0^[47], ma nel 6 o nel 7 a.C., in quanto Erode morì nel 4 a.C. e il censimento riportato nei vangeli avvenne tra l'8 e il 6 a.C.

^[43] Vangelo secondo Matteo (capitolo II, versetti 1-10). Il brano è tratto da *La Bibbia di Gerusalemme* pubblicata in internet alla pagina:

http://www.liberliber.it/biblioteca/b/bibbia/la_sacra_bibbia/html/index.htm

^[44] Diversi siti internet approfondiscono l'argomento. Un libro importante è: *The Star of Bethlem Mystery*, David Hughes, Cambridge, Cambridge University Press, 1975.

^[45] A. Fernández, *Vita di Gesù Cristo*, Istituto Poligrafico dello Stato, Roma

^[46] "La Sacra Bibbia", a cura del Pontificio Istituto Biblico di Roma, Salani, Firenze 1962, nota 2, p. 1778.

^[47] L'anno 0 non esiste. Tradizionalmente, si suole indicare con l'anno 0 l'anno della nascita di Gesù. Più precisamente, intorno al 523 il monaco Dionigi il Piccolo definì che l'anno 1 dell'era cristiana era quello che iniziava la settimana dopo il 25 dicembre dell'anno 753 dalla fondazione di Roma. Recenti studi considerano con una certa elasticità questa datazione e affermano che la nascita sarebbe avvenuta tra il 9 e il 5 a.C., ma il calendario non è comunque stato cambiato per riflettere questa nuova data. Si tratta di una data puramente convenzionale. Infatti, se fosse esistito, l'anno 0 avrebbe dovuto appartenere a due secoli diversi, oppure a nessuno: il I secolo a.C. va dal 100 all'1 a.C. e il I secolo d.C. dall'1 al 100 d.C. Inoltre, la nozione del numero 0, e di conseguenza di anno 0, è stata introdotta assai dopo il computo di Dionigi il Piccolo, che quindi affermava che l'anno precedente l'1 d.C. fosse l'1 a.C.. A riprova di quanto affermato, la Chiesa cattolica è stata molto chiara nello stilare il calendario delle celebrazioni sacre in occasione del Giubileo 2000 per l'avvento del III millennio: tali celebrazioni sono avvenute alla fine del mese di dicembre 2000, perché il primo giorno del nuovo millennio è stato il 1 gennaio 2001.



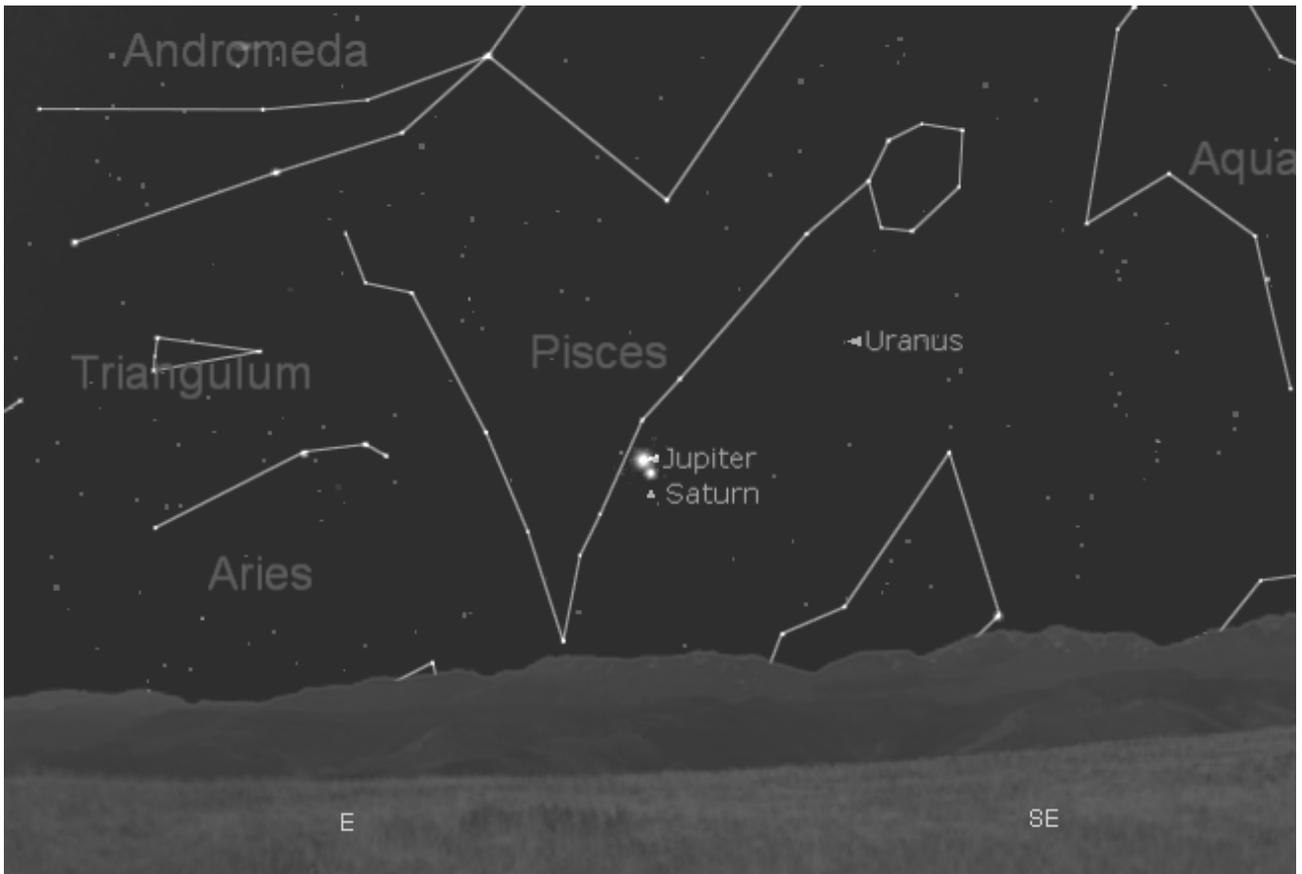
2.28 – Adorazione dei Magi, mosaico di S. Apollinare Nuova a Ravenna. In alto a destra vi è rappresentata una stella!

Dei quattro evangelisti solo Matteo parla di una stella, ma nei vangeli Apocrifi si fa spesso riferimento a questo tipo di astro. Nelle cronache del periodo non risultano comete; non si può neppure pensare ad una stella *nova*, perché nel cielo di Gerusalemme non ne comparve nessuna tra il 134 a.C. ed il 73 d.C.

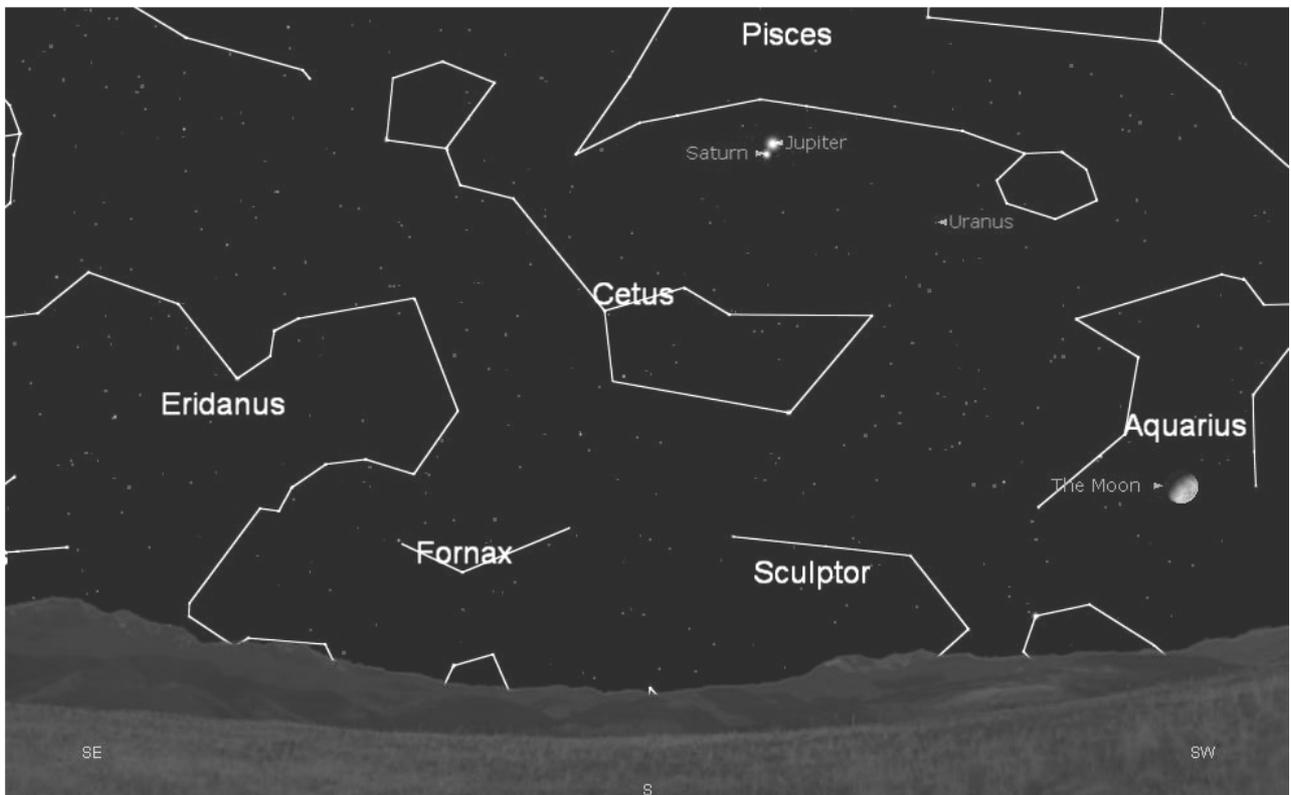
Oggi in molti propendono per una terza ipotesi, presa in considerazione da *La Grande Enciclopedia Illustrata della Bibbia* e proposta da Keplero nel 1600: sembra si sia trattato di una congiunzione tra Giove e Saturno. I calcoli di Keplero permisero di stimare che nel 7 a.C. vi fu una triplice congiunzione tra i due pianeti nella costellazione dei Pesci: il 29 maggio, il 3 ottobre e il 4 dicembre, ad una distanza angolare di circa un grado in tutti e tre i casi. L'evento non fu particolarmente appariscente, quindi deve aver avuto un elevato valore simbolico. In effetti Giove era un simbolo della regalità e Saturno (protettore del popolo ebraico) era la stella dei giusti; i Pesci, segno d'acqua, erano da sempre associati a Mosè, il liberatore salvato proprio dalle acque del Nilo. Infine l'elemento acqua compare molto spesso e con grande rilievo nella simbologia cristiana. Un evento così raro^[48] poteva essere interpretato solo dagli astrologi d'Oriente^[49] come un segno che un nuovo re, un grande profeta, forse il Messia liberatore stava per nascere in Israele.

[⁴⁸] Di per sé la congiunzione Giove–Saturno avviene ogni 20 anni circa, una triplice congiunzione ogni 120 anni e perché avvenga nella stessa costellazione ne devono passare 800.

[⁴⁹] Sono in molti a ritenere che i Magi costituissero una classe sacerdotale che esercitava la professione che oggi definiremmo di astrologo: alla corte di Babilonia essi interpretavano i segni celesti, osservando i moti delle stelle e dei pianeti, traendone poi auspici favorevoli o meno.



2.29 – Il cielo di Bagdad il 29 maggio del 7 a.C. alle 4.00 del mattino. L'apparizione della congiunzione di Giove e Saturno nel segno dei Pesci mette i Magi in moto verso occidente.



2.30 – Il cielo di Gerusalemme alle 24.00 del 2 ottobre del 7 a.C.. Giove e Saturno si trovano alti sull'orizzonte e sembrano indicare a Sud dove, a 9 km, si trova Betlemme.

Si ritiene quindi che i Magi siano partiti dalla Mesopotamia all'epoca della prima congiunzione, arrivando a Gerusalemme all'epoca della seconda; poco dopo avrebbero visitato Gesù, che dovrebbe essere quindi nato verso la fine di settembre del 7 a.C.

Questa è una delle tante interpretazioni delle Sacre Scritture e soddisfa (in parte) chi cerca un'interpretazione scientifica della "cometa di Natale". In nessun modo, oggi, è possibile stabilire la realtà dei fatti.

METEOROIDI, METEORE E METEORITI

Non ci sono molte testimonianze storiche di cadute di meteoriti in quanto non sono molto frequenti passaggi di bolidi o cospicue piogge meteoriche. Plinio il Vecchio scrive: *“la loro rarità ne oscura la comprensione, ed è per questo che le meteore non si conoscono nella misura in cui sono noti il sorgere delle stelle e delle eclisse [...] e varie altre cose.”*

I primi documenti che attestano l'osservazione di eventi meteoritici risalgono a circa 4000 anni fa e si trovano in papiri egizi e in cronache cinesi e giapponesi. Specie queste ultime sono molto utili per un studio storico sistematico delle meteore.

Più che le meteore furono i meteoriti ad attrarre l'attenzione degli uomini. Le *“pietre cadute dal cielo”* sono state temute e venerate da molte civiltà per le quali i meteoriti erano segni della volontà divina. Prove indirette fanno pensare che fin dall'età del bronzo si conoscesse l'origine celeste di questi oggetti. Risalgono infatti a quell'epoca utensili e lame cerimoniali in ferro quasi puro, molto probabilmente di origine meteoritica, ritrovate in luoghi sacri.

Nel XIV secolo a.C. gli Ittiti utilizzavano le meteoriti per forgiare le armi, rese sacre dall'impiego dello stesso materiale usato dagli dei.

Il più antico meteorite di cui si ha conoscenza cadde a Egospotami (nel Chersoneso^[50]) nel 467 a.C.; Plinio ce lo descrive come un corpo del tutto identico a una stella e grande come un carro. L'evento si verificò di giorno e ad Anassagora sembrò ragionevole che si trattasse di un pezzo staccatosi dal Sole e ne concluse che il Sole dovesse essere una massa di ferro incandescente *“più grande del Peloponneso”* e non molto distante dalla Terra.

Diogene di Apollonia tenne conto di quel meteorite nella sua teoria sulla struttura dell'Universo; egli riteneva che nei cieli, accanto alle stelle, luminose per via dell'aria calda che le attraversava, esistevano anche corpi oscuri come pietre che potevano cadere sulla Terra.

Secondo gli insegnamenti di Aristotele, per lungo tempo si pensò che le stelle cadenti fossero gas che si incendia nell'alta atmosfera. E infatti la parola *“meteora”*, coniata dallo stesso filosofo greco per identificare questo fenomeno, vuol dire *“appartenente all'atmosfera”*. Era una visione perfettamente coerente con la convinzione di Aristotele che il cielo stellato fosse perfetto e incorruttibile e che tutti i fenomeni transitori dovessero appartenere a una sfera più bassa e terrena. Per Aristotele i meteoriti erano corpi terrestri sollevati dal vento che poi ricadono a terra.

Plinio il Vecchio scrive: *“si osservano anche degli spostamenti di stelle in varie direzioni, mai però a caso, cioè senza che dei forti venti comincino a spirare da quel dato verso.”*

Seneca nelle *Naturales quaestiones* ribadisce che le meteore sono *“tutte le alterazioni che l'aria provoca o subisce”* e le considera come fenomeni transitori *“[...] sia la fiaccola che il fulmine che il bolide e qualsiasi altro fuoco sprigionatosi dall'aria sono in fuga e non appaiono se non mentre cadono.”* I bolidi si originano perché: *“l'aria è sottoposta ad un attrito piuttosto violento”*, mentre, *“quando l'urto è stato più leggero e si è solo verificato [...] uno sfregamento, ne sprizzano luci più pallide, e le stelle nel loro volo si traggono dietro una chioma luminosa.”*

Ancora Seneca dice che è da escludere che si tratti di stelle che cadono perché: *“se ciò fosse vero, sarebbero già venute a mancare; non passa notte senza che sembri che un gran numero di stelle attraversino il cielo [...] Eppure ciascuna si ritrova poi al solito posto [...] ne consegue dunque che codesti fenomeni si producono più in basso delle stelle e svaniscono rapidamente perché non hanno sostegno e sede stabile.”*

^[50] Penisola nel mar Egeo, nell'Antica Tracia; oggi è territorio turco.

Un'altra voce autorevole, Tolomeo, afferma che: *“Se le stelle filanti provengono da un angolo, esse preannunciano che poco dopo i venti seguiranno da quella stessa parte; se esse vengono pure dall'angolo opposto si avrà una confusione di venti, e se spuntano dai quattro angoli, portano dei freddi, dei fulmini e dei lampi ed altre cose di tal genere”*.

Del Medioevo ci sono giunte informazioni scarse e imprecise, riportate incidentalmente in cronache riguardanti altri argomenti. Rada e Stepheson (1992) hanno raccolto citazioni medievali in cui le meteore vengono definite: *stelle volanti* o *cadenti* o *tondeggianti*, e sono descritte piogge di *stelle che si spargono nell'atmosfera*, paragonate spesso a locuste, ogni volta *di una intensità mai vista prima*.



Fig. 3.1 – Pioggia di pietre di fulmine, incisione popolare del XIX secolo. (Biblioteca Nazionale, Parigi)

La pioggia meteoritica del 902 (Leonidi) fu considerata come un segno dell'ira divina e collegata con l'eccidio di Taormina da parte dei Saraceni e con l'invasione della Calabria. Anche l'invasione del Messico da parte degli spagnoli e lo sterminio degli Atzechi, secondo cronisti dell'epoca, fu annunciato da otto presagi, il quarto dei quali fu: *“in pieno giorno e alla luce del Sole, l'apparizione di comete nei cieli in gruppi di tre, che, venute da occidente, correvano a oriente a gran velocità e come in volo; lungo il loro percorso, sprizzavano e proiettavano lontano braci infiammate e scintille, e inalberavano code così estese che non si poteva valutare la loro lunghezza e larghezza.”*

Secondo la tradizione islamica, la Kaaba alla Mecca, considerata il centro del mondo, è costruita nel punto in cui cadde la “Pietra Nera”, che vi è custodita. La sua origine celeste la rende sacra ed è il segno della presenza di Allah sulla Terra. Cronisti arabi del medioevo riferiscono che: *“quando nacque il Profeta Maometto [...] le stelle cadevano e i demoni furono colpiti da esse.”*. *“Il Profeta Maometto ricevette la sua prima rivelazione divina [...] i demoni furono cacciati dal cielo delle meteore.”*

Nell'Apocalisse *“[...] le stelle del cielo caddero sulla terra come un fico lascia cadere i suoi frutti acerbi quando è scosso dal vento impetuoso[...].”*

Nella cultura ellenistica, morendo si diventava stelle e la caduta delle meteore era presagio di morte. Tale convinzione la ritroviamo in Shakespeare: *“Nel nostro paese i lauri sono tutti avvizziti e le meteore spaventano le stelle del firmamento [...]. Questi sono segni che precorrono la morte o la caduta di re.”*

Le Perseidi sono note anche come lacrime di San Lorenzo e si dice che siano le lacrime del santo che cadono dal cielo nella ricorrenza del suo martirio.

Un testo popolare francese avverte: “*Quando la notte vedrete cadere una stella, sappiate che uno dei vostri amici è trapassato, perché ognuno ha la sua stella in cielo, e quando muore la sua stella cade*”.

L’usanza di esprimere un desiderio vedendo una meteora va ricondotta a una variante di quella credenza secondo la quale ogni stella cadente era un’anima che sollecitava il ricordo dei vivi e per la quale bisognava pregare. Ai nostri giorni, invece, il desiderio si esprime in favore di se stessi.

Cadute di pietre dal cielo sono state spesso registrate dalle cronache: a Ensisheim, in Alsazia, nel 1492 e soprattutto ad Aigle, in Francia, il 26 aprile 1803. In quest’ultimo caso la descrizione è molto precisa e ricca di particolari: si parla di una nube di fuoco comparsa all’improvviso nel cielo, che si dissolve con forti detonazioni, provocando una pioggia di 30.000 pietre, ciascuna delle quali pesa diversi chili. Altrettanto famose furono le piogge di Stannern, nel Tirolo austriaco, e di Butsura, in India, nel XIX secolo. Talvolta sul suolo terrestre sono giunti massi di proporzioni considerevoli, come quello precipitato a Meissen, in Germania, nel 1664 e quello di circa 2 q caduto nei pressi di Brescia nel 1883.

3.2 – INIZIANO GLI STUDI SCIENTIFICI

Solo a partire dal ‘700 cominciò a farsi strada l’opinione che le meteore fossero di origine extraterrestre: nel 1714 Halley calcolò l’altezza di un bolide.



Fig. 3.2 – Ernst Florens Friedrich Chladni

Per spiegare l’origine delle meteore venne chiamata in causa anche l’elettricità, che all’epoca era molto di moda perché se ne era appena iniziato lo studio sistematico.

Nel 1794 E.F. Chladni^[51], confrontando testimonianze del passato, giunse alla conclusione che bolidi e meteoriti hanno natura cosmica. Il mondo scientifico, però, non accettò subito questa idea e continuò a considerare la caduta di pietre dal cielo solo una divertente credenza popolare, non ritenendo attendibili le testimonianze.

Nel 1794, a Siena, molti testimoni videro cadere pietre dal cielo durante un temporale e ciò diede origine a ricerche sulla possibile natura del fenomeno. Una delle prime teorie fu quella dell’origine vulcanica: pochi giorni prima c’era stata un’eruzione del Vesuvio e secondo alcuni delle pietre potevano essere cadute a Pisa, mentre secondo altri le polveri del vulcano potevano essersi agglomerate nell’atmosfera formando le pietre. Secondo altri ancora, invece, le pietre si erano formate nell’atmosfera, ma il vulcano non c’entrava nulla..

^[51] Ernst Florens Friedrich Chladni nacque a Wittemberg (Germania) il 30 novembre 1756 e morì a Breslavia (Polonia) il 3 aprile 1827. Ha dato un grande contributo alla fisica moderna soprattutto per il suo lavoro di ricerca sulle *Lastre Vibranti* e sul calcolo della velocità del suono attraverso differenti gas.

L'astronomo tedesco Olbers^[52], nel 1795, propose l'idea che i meteoriti provenissero dai vulcani lunari. Successivamente altri astronomi appoggiarono la sua ipotesi.



Fig. 3.3 – Leonini del 1833 in una xilografia su legno di Jauslin e Völlmy

La scoperta dei pianetini tra Marte e Giove^[53] suggerì che l'origine dei meteoriti fosse legata ad essi e quindi venne riproposta l'idea di Chladni di una natura extraterrestre: ci volle un po' per assimilare l'idea. Sembra che il presidente degli Stati Uniti d'America Thomas Jefferson abbia affermato: *“Mi è più facile credere che due professori yankee mentano, piuttosto che dal cielo possano cadere delle pietre.”*

^[52] Heinrich Wilhelm Olbers nacque a Arbergen l'11 ottobre 1758 e morì a Brema il 2 marzo 1840. Fu astronomo, fisico e medico. Dopo aver studiato medicina a Gottinga esercitò la professione a Brema fino al 1822. Iniziò gli studi di astronomia in modo amatoriale, ma la qualità delle sue osservazioni presto gli diedero grande fama, tanto che negli ultimi anni di vita si dedicò completamente all'astronomia attrezzando la parte superiore della sua casa ad osservatorio. Nel 1797 ideò un nuovo metodo per determinare l'orbita delle comete, usato ancora oggi; ne individuò diverse, tra cui la periodica 13P/Olbers (periodo di 72,7 anni), che scoprì il 6 marzo 1815. Nel 1799 teorizzò un metodo per calcolare la velocità delle "stelle cadenti", largamente utilizzato nel diciannovesimo secolo. Olbers ipotizzò che l'origine degli asteroidi fosse da ricercare nella frammentazione di un pianeta situato in origine fra Marte e Giove. Propose una versione di quello che oggi è conosciuto come il "paradosso di Olbers".

^[53] La notte del 1° gennaio 1800 Padre Piazzi, all'Osservatorio di Palermo, scopre il primo e il più grande dei pianetini: Cerere. Successivamente vennero scoperti Pallas (28 marzo 1802) da Olbers, Juno (1 settembre 1804) da Harding e Vesta (29 marzo 1807) ancora da Olbers.

Calcoli sulla velocità dei bolidi e la grande pioggia di meteore del 1833 contribuirono a chiarirne l'origine.

Dalle osservazioni del 1833 si capì che le meteore sembrano provenire da un unico punto del cielo, che si muoveva come una stella; da ciò si dedusse l'origine cosmica delle meteore. La collaborazione di due astronomi italiani, Padre Angelo Secchi^[54] e Giovanni Schiaparelli^[55], portò quest'ultimo a stabilire la periodicità di alcuni sciami meteoritici (le Perseidi) e a stabilirne la correlazione con le comete^[56].

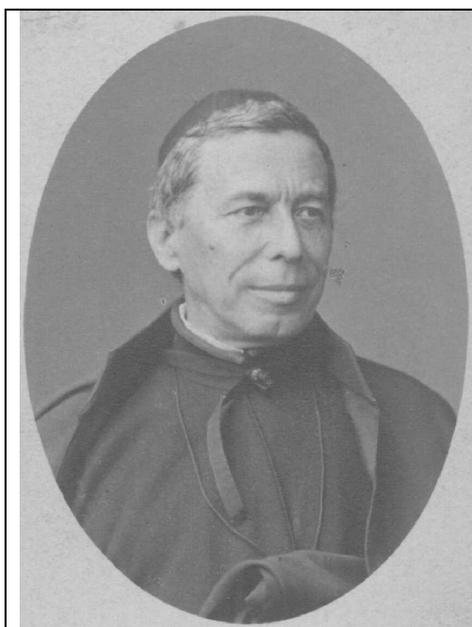


Fig. 3.4 – Padre Angelo Secchi



Fig. 3.5 – Giovanni Schiaparelli

^[54] Padre Angelo Secchi nacque a Reggio Emilia il 29 giugno 1818 e morì a Roma il 26 febbraio 1878. Fu uno dei maggiori astronomi italiani del XIX secolo ed è universalmente riconosciuto come uno dei fondatori della spettroscopia. Entrò nell'ordine dei gesuiti a 15 anni e studiò presso il Collegio Romano, dove ebbe come insegnante di astronomia Padre Francesco De Vico. Divenuto direttore dell'Osservatorio del suddetto Collegio, scoprì l'esistenza delle facole solari e per primo classificò le stelle in base allo spettro, che otteneva per mezzo di un prisma. Nel 1858 disegnò una delle prime mappe di Marte e usò, per la *Syrtis Major*, il termine "canale atlantico": da qui ebbe origine l'uso del termine "canale" associato a strutture marziane.

^[55] Giovanni Virginio Schiaparelli nacque a Savigliano (Cuneo) il 14 marzo 1835. Fu uno dei più importanti astronomi italiani del XIX secolo, senatore del Regno d'Italia e membro delle maggiori Accademie Scientifiche della sua epoca: è noto principalmente per i suoi studi su Marte. Egli fu il primo a osservare al telescopio una fitta rete di canali durante l'opposizione del 1877 e da ciò ebbe inizio una serie di ipotesi, speculazioni e folklore riguardo alla possibilità di vita intelligente su Marte. La maggior parte di tali ipotesi si deve anche ad un'errata traduzione in inglese della parola *canali*: fu usato il termine *canals* invece del più corretto *channels* (la prima parola indica una costruzione artificiale, la seconda una conformazione del terreno che può essere anche naturale). In seguito, grazie alle osservazioni di un altro astronomo italiano, Vincenzo Cerulli (Teramo, 20 aprile 1859 – Merate, 31 maggio 1927), si riuscì ad appurare che i canali erano delle illusioni ottiche. Schiaparelli è attualmente sepolto nel Cimitero monumentale di Milano, dove morì il 4 luglio 1910.

^[56] http://it.wikisource.org/wiki/Le_stelle_cadenti

3.3 – LE METEORE OGGI

Oggi sappiamo che le meteore sono prodotte da piccoli asteroidi e frammenti di polvere interplanetaria che cadono sulla Terra. Appaiono visibili come una traccia luminosa dal momento in cui l'attrito con gli strati alti dell'atmosfera terrestre inizia la loro disintegrazione.



Fig. 3.6 – La grande pioggia di meteore del 27 novembre 1872

La velocità di un meteoroido appartenente al Sistema Solare è compresa fra 11,2 km/s e 72,8 km/s.

L'attrito prodotto dall'atmosfera terrestre riscalda la superficie del meteoroido che ad una quota di 80-90 km raggiunge una temperatura di circa 2500 K e comincia a sublimare. Proseguendo il suo volo il meteoroido perde massa sotto forma di gocce di materia fusa, un processo chiamato ablazione. A causa degli urti reciproci gli atomi del meteoroido si ionizzano e ionizzano anche le molecole atmosferiche. Durante la ricombinazione ioni-elettroni è emessa della radiazione elettromagnetica, e un osservatore al suolo vedrà una scia luminosa: la meteora. Essa è composta di due parti, la testa e la scia. La testa contiene il meteoroido che si sta consumando e i gas ionizzati, mentre la scia è la regione di ricombinazione dei soli gas ionizzati. Il 90% della radiazione emessa da una meteora proviene dagli atomi del meteoroido.

La quota raggiunta prima di consumarsi dipende da fattori come le dimensioni dell'oggetto, la velocità e l'angolo di entrata, il materiale costitutivo. In generale verso i 40 - 50 km di altezza il fenomeno è concluso.

Le meteore possono essere viste tutte le notti serene e senza luna e, mentre la maggior parte appaiono bianche, alcune sono di colore blu, altre verdi, altre ancora gialle o rosse.

Se il meteoroido è di discrete dimensioni (più di 20 cm di diametro), la testa della meteora può essere molto luminosa e la meteora è detta bolide. Un tempo il termine bolide era usato per indicare le meteore di cui era udibile il rumore: la definizione di bolide non è ancora stata fissata dall'IAU.

Per meteoroidi di decine di metri di diametro il bolide può essere più luminoso del Sole visto dalla Terra. Un esempio di un evento del genere è il meteoroido esploso sopra la regione del fiume Tunguska il 30 giugno 1908. I testimoni parlarono di una "palla di fuoco" molto più brillante del Sole.

Spesso il meteoroido si frammenta in più parti ognuna delle quali diventa a sua volta un bolide. Un fatto del genere si è verificato per il bolide visto da diversi stati dell'est degli Stati Uniti,

caduto a Peekskill, nello stato di New York, la sera del 9 ottobre 1992. Il corpo principale si spezzò in circa 70 frammenti: uno di essi, del peso di 12 kg, aveva sfondato il cofano di un'automobile parcheggiata.

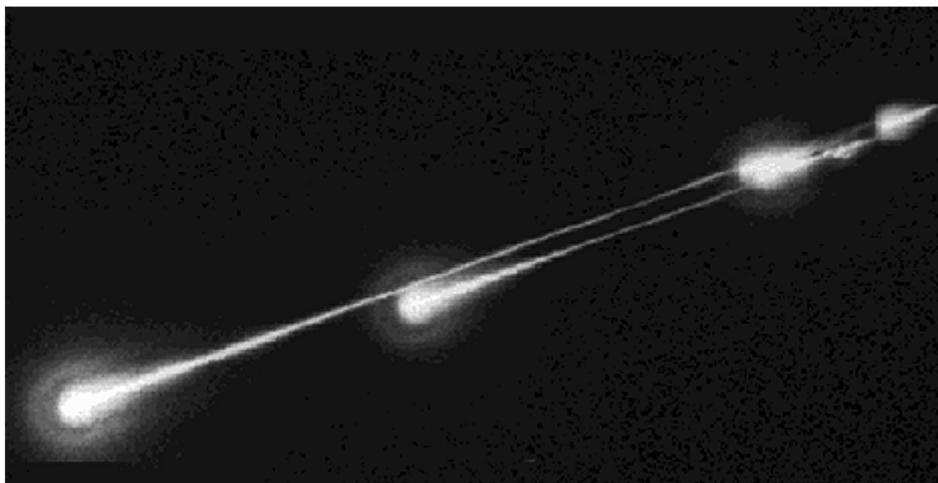


Fig. 3.7 – Il bolide di Peekskill (New York) osservato il 9 ottobre 1992. Immagine ripresa da S. Eichmiller di Altoona, in Pennsylvania.

Se il meteoroide è sufficientemente grande può sopravvivere all'ablazione. Quando la velocità in atmosfera scende al di sotto dei 3 km/s la perdita di massa e l'emissione di radiazione cessano e il meteoroide entra nella fase di volo buio (o dark flight). Da questo momento inizia un processo di raffreddamento della superficie e la traiettoria del corpo si fa sempre più verticale.

La velocità di impatto del meteoroide sulla superficie terrestre va da 10 a 100 m/s per corpi di massa compresa fra 10 g e 10 kg.

Quando un meteoroide giunge al suolo si parla di meteorite: la probabilità che questo accada dipende dalle dimensioni e anche dal materiale di cui è composto. Un meteoroide di ferro-nichel giungerà più facilmente al suolo di uno di pura roccia.

Nell'impatto il corpo si conficca nel terreno creando una buca che è in genere una decina di volte più grande delle sue dimensioni. Per grandi meteoroidi o piccoli asteroidi la velocità può mantenersi elevata fino al suolo, l'ablazione non cessa, non esiste la fase di volo buio e nella caduta si forma un vero e proprio cratere da impatto. In questo caso si parla di superbolide.

L'osservazione dei bolidi è del tutto occasionale. I satelliti militari di sorveglianza sono una buona sorgente di dati per i superbolidi, perchè i loro sensori infrarosso sono in grado di rilevarne le emissioni. L'unico problema è la difficoltà di ottenere i dati dalle autorità militari. Dalle informazioni disponibili si può stimare che ogni anno si disintegrino in atmosfera da 30 a 50 superbolidi (la maggior parte sopra gli oceani), cioè da 2 a 4 al mese.

Un'altra questione è come trovare la possibile meteorite una volta che si è osservato il bolide e come calcolare l'orbita del meteoroide originale attorno al Sole. Le meteoriti costituiscono una preziosa sorgente di dati sulla composizione originale del Sistema Solare e quindi vale senz'altro la pena cercarle: ogni bolide di cui non si riesce a stabilire nulla è una potenziale miniera di informazioni persa.

3.4 – GLI SCIAMI METEORITICI

All'origine di questi fenomeni celesti vi sono particelle di polvere e frammenti di roccia, lasciati dalle comete, che orbitano in sciami intorno al Sole. Infatti ogni nucleo cometario perde con-

tinuamente materia che va a formare la coda: la parte più pesante di questo materiale non è spinta via dal vento solare, ma resta su un'orbita simile a quella originaria. Col tempo, l'orbita descritta dalla cometa si riempie di sciami di particelle, molto numerosi, che si raggruppano in nubi. Quando la Terra incontra queste zone si formano sciami di meteore, ovvero una *pioggia di stelle cadenti*; la disposizione del materiale meteoritico in orbite ben definite fa sì che il fenomeno risulti periodico.

Sciame	data del massimo	ZHR	radiante	durata (gg)	cometa associata
Quadrantidi	2 – 3 gennaio	145	Drago, Ercole, Boote	2	
Liridi I	21 aprile	20	Lira	3	Thatcher
Aquaridi I	4 – 5 maggio	120	Acquario	13	Halley
Draconidi	26 giugno	4	Drago	8	Pons–Winnecke
Perseidi	11 – 12 agosto	300	Perseo	16	Swift–Tuttle
Giacobinidi o Draconidi	9 ottobre	var	Drago	2	Giacobini–Zinner
Orionidi	20 – 21 ottobre	50	Orione	12	Halley
Taurini	7 – 8 novembre	25	Toro	30	Encke
Leonidi	15 – 16 novembre	var	Leone	7	Tempel–Tuttle
Bielidi	22 – 23 novembre	var	Andromeda	9	Biela
Ursidi	22 dicembre	10	Orsa Minore	3	Tuttle

Tabella 3.1 – I principali sciami meteorici

Uno dei parametri che indica l'intensità di uno sciame meteoritico è lo ZHR, ovvero il numero di meteore per ora.

Gli sciami meteoritici possono apparire in qualsiasi parte del cielo, ma sembrano provenire da un unico punto che viene chiamato *radiante*.

Alcuni osservatori ritengono che la zona di cielo migliore dove guardare sia tra il radiante dello sciame e lo zenit (il punto direttamente sopra la testa). In linea generale conviene guardare verso la parte più scura del cielo, indipendentemente da dove si trovi. Tutto ciò che serve per osservare questi spettacoli celesti è un cielo buio, un posto confortevole dove mettersi ed un po' di pazienza. L'inquinamento luminoso o la Luna riducono drasticamente il numero di meteore che è possibile osservare.

Nella tabella 3.1 vengono riportati i principali sciami meteoritici e più avanti vengono brevemente descritte le caratteristiche dei più noti.

PERSEIDI

Prende il nome dalla costellazione di Perseo in cui si trova il radiante. Fu registrato dai cinesi diverse volte, a partire dal 36 d.C., e successivamente da giapponesi, coreani ed europei. È sicuramente il più conosciuto e osservato perché è visibile in estate e presenta costantemente una buona attività anche se non si sono mai verificate piogge straordinarie. Sono le famose “lacrime di San Lorenzo”, così dette perché secondo la tradizione popolare sono legate al martirio del santo.

Il massimo si ha tra l'11 e il 12 agosto, ma l'attività dello sciame inizia alla fine di luglio e termina oltre il 20 agosto. Solo durante il picco si possono scorgere fino a un centinaio di meteore all'ora: negli altri giorni il numero è decisamente minore, ma comunque superiore alle 5-10 meteore l'ora che si vedono nelle notti "normali".



Fig. 3.8 – Una Perseide solca il cielo sotto la spada di Orione la mattina del 12 agosto 1997. La ripresa è del californiano Wally Pacholka.



Fig. 3.9 – Cometa Swift-Tuttle ripresa da Herman Mikuz (Slovenia)

Le Perseidi sono veloci (60 km/s) e si rendono visibili tra 110 e 120 km di altezza, spegnendosi a 90-100 km. La maggior parte sono di colore bianco o giallo, ma in piccola percentuale sono rosse, verdi o blu; spesso le verdi sono le più luminose. Circa un terzo lascia una scia persistente.

Sono associate alla cometa Swift-Tuttle, che ha un nucleo del diametro di circa 10 km; il suo ultimo passaggio vicino al Sole risale al 1992, ma dovremo aspettare fino al 2126 per rivederla.

Nella letteratura ci sono parecchi riferimenti alle lacrime di San Lorenzo; uno autorevole è di Giovanni Pascoli nella poesia intitolata “X AGOSTO”

*San Lorenzo, io lo so perché tanto
di stelle per l'aria tranquilla
arde e cade, perché si gran pianto
nel concavo cielo sfavilla.*

*Ritornava una rondine al tetto:
l'uccisero: cadde tra i spini;
ella aveva nel becco un insetto:
la cena dei suoi rondinini.*

*Ora è là, come in croce, che tende
quel verme a quel cielo lontano;
e il suo nido è nell'ombra, che attende,
che pigola sempre più piano.*

*Anche un uomo tornava al suo nido:
l'uccisero: disse: Perdono;
e restò negli aperti occhi un grido:
portava due bambole in dono.*

*Ora là, nella casa romita,
lo aspettano, aspettano in vano:
egli immobile, attonito, addita
le bambole al cielo lontano.*

E tu, Cielo, dall'alto dei mondi

*sereni, infinito, immortale,
oh! d'un pianto di stelle lo inondi
quest'atomo opaco del Male!*

LEONIDI

Prendono il nome dalla posizione del radiante, situato nella costellazione del Leone. La Terra attraversa la nube intorno al 17 novembre. Lo sciame è associato alla cometa Tempel – Tuttle, che ha un periodo di 33,22 anni. Quando la cometa è appena passata la pioggia meteoritica può assumere il carattere di "tempesta", ma non sempre il passaggio della cometa è stato seguito da uno spettacolo mozzafiato.

Nel 1833 la tempesta fu memorabile (circa 100 000 meteore all'ora), nel 1866 molto meno intensa (al massimo 17 000), quasi inesistente nel 1899 – 1900 – 1901 (al massimo 7000), mentre fu eccezionale nel 1966 (150 000 meteore l'ora!).

Di recente la cometa è passata al perielio il 28 febbraio 1998 e alla minima distanza dalla Terra nella notte tra il 17 ed il 18 gennaio 1998.

Il tasso di produzione delle Leonidi è decisamente aumentato dopo questo passaggio: nel 1998 lo ZHR è stato di circa 180, mentre nel 1999 esso ha raggiunto un inaspettato 8150.

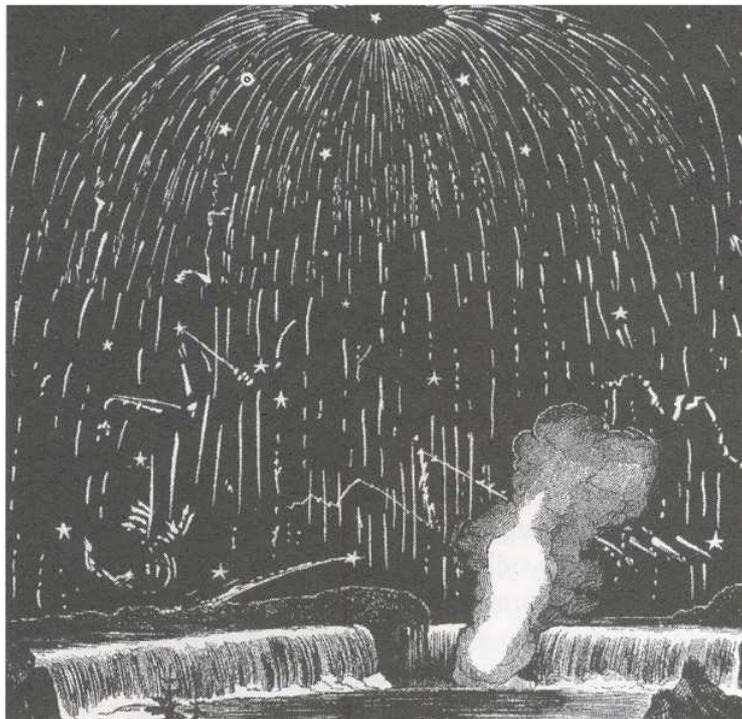


Fig. 3.10 – Leonidi del 1833; sullo sfondo le cascate del Niagara.

Le previsioni per il 2001 indicavano uno ZHR ancora superiore (circa 15 000), ma esso si rivelò sovrastimato rispetto al valore reale misurato (circa 2500 – 3800 a seconda della località).



Fig. 3.11 – Il picco delle Leonidi del 1997 visto dallo spazio dal satellite MSX



Fig. 3.12 – Leonidi del 1998 Juraj Toth del Modra Observatory.



Fig. 3.13 – Leonide del 1999, ripresa da A. Angeletti

L'attraversamento dello sciame avviene in un giorno o due, in quanto il materiale risulta abbastanza ben concentrato sull'orbita. Le polveri sono distribuite in varie nubi più o meno dense: la

loro elevata concentrazione ha come conseguenza un tempo di osservazione limitato. La regione terrestre in cui il fenomeno è ben visibile risulta così molto ristretta.

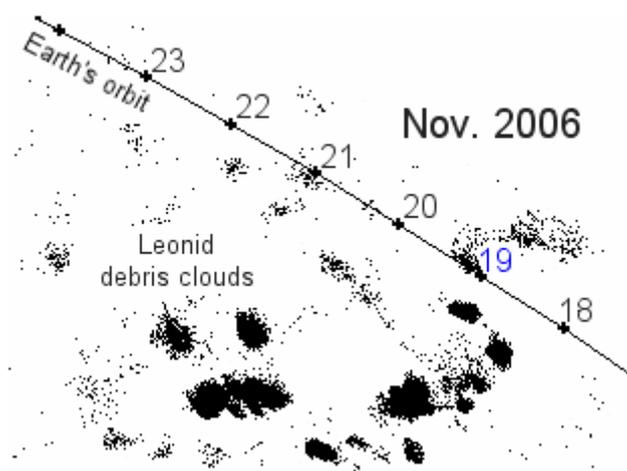


Fig. 3.14 – L'orbita della Terra e la posizione prevista dei detriti della Tempel – Tuttle, nel passaggio del 2006.

Le Leonidi sono molto veloci; la cometa Tempel–Tuttle è retrograda (moto opposto a quello della Terra a circa 42 km/s), mentre il moto della Terra è diretto (a 30 km/s). L'incontro delle particelle cometarie con l'atmosfera terrestre avviene quindi a circa 72 km/s, dando origine a scie luminose che cominciano già a quote elevate e che sono maggiormente visibili e spettacolari.

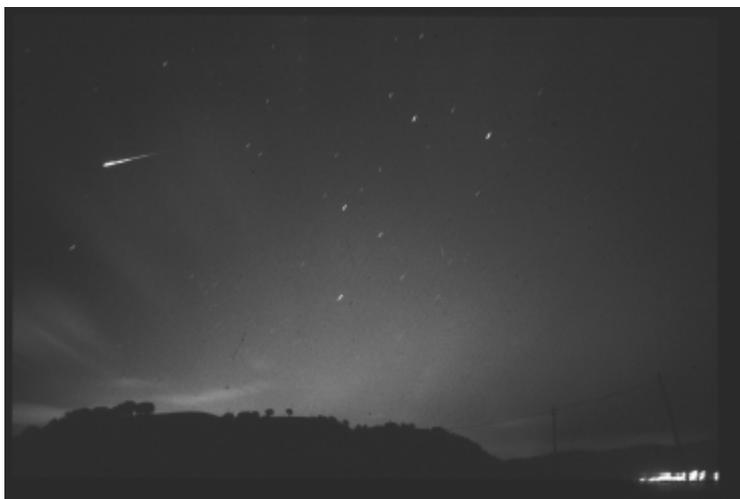


Fig. 3.15 – Immagine di una Leonide ripresa da A. Angeletti nel 1999

LE QUADRANTIDI

Anche se non sono tra gli sciame più appariscenti le Quadrantidi meritano una nota di attenzione perché sono diventate visibili solamente in anni recenti; le prime osservazioni risalgono al 1825. Nonostante siano state fatte varie ipotesi, ancora non è stata individuata con sicurezza alcuna cometa che ne sia all'origine. C'è chi sostiene che le Quadrantidi derivino da una cometa catturata da Giove e ora disintegrata, mentre secondo altri si tratta di particelle lasciate migliaia di anni fa dalla cometa 1986 VIII (Machholz) oppure dalla cometa 1491 I, quando queste avevano orbite simili a quelle dello sciame odierno.

Studi recenti hanno mostrato che il pianeta Giove, avvicinandosi ciclicamente all'orbita fortemente ellittica dello sciame, procura delle forti perturbazioni, che sparpagliano i meteoroidi e creano delle oscillazioni della corrente sul piano eclittico. Questi mutamenti orbitali influenzano il numero dei meteoroidi intercettati dal nostro pianeta e le date in cui il fenomeno si manifesta.



Fig. 3.16 – Immagine di una brillante Quadrantide nell'Orsa Maggiore, ripresa dall'inglese James Shepherd il 4 gennaio 1984.

La Terra può attraversare la parte centrale dello sciame o la periferia, con un numero di meteore estremamente variabile di anno in anno. Intorno al 1940 si evidenziavano mediamente tassi orari di 40-50 Quadrantidi, mentre negli anni '70 le frequenze sono passate a 90-120 meteore/ora, intervallate da saltuari picchi di alcune centinaia di meteore.

Il radiante dello sciame è situato nella parte nord della costellazione del Boote, in prossimità delle costellazioni di Ercole e del Drago. Per chi osserva da latitudini superiori a $+41^\circ$ esso rimane sempre sopra l'orizzonte.

Le Quadrantidi, durante il massimo, si mostrano mediamente brillanti e non di rado appaiono dei bolidi colorati (per lo più giallo–bluastri).

La velocità di ingresso nell'atmosfera abbastanza contenuta (41 km/s).

3.5 – CLASSIFICAZIONE DEI METEORITI

Le più importanti raccolte di meteoriti nel mondo si trovano presso:

- Museo di Storia Naturale di Vienna
- Museo di Storia Naturale di Parigi
- Museo Naturale, Università Humboldt a Berlino
- Istituto Max Planck per la Chimica di Magonza in Germania
- Rassegna di Geologia dell'India a Calcutta
- Collezione dell'Osservatorio Vaticano a Roma
- Istituto Nazionale di Ricerche Polari (NIPR) a Tokyo
- Accademia delle Scienze a Mosca
- The Open University a Milton Keynes (Gran Bretagna)
- Museo di Storia Naturale di Londra
- Museo Nazionale degli Stati Uniti a Washington
- Centro di Studi sui Meteoriti a Tempe (Arizona)
- Centro Spaziale Johnson NASA a Houston (Texas)
- Museo Field di Storia Naturale di Chicago
- Museo Americano di Storia Naturale di New York

Le due maggiori raccolte sono quella del NIPR di Tokyo (con circa 8 900 esemplari nel 1994) e quella del Johnson Space Center della NASA (con circa 7 650 esemplari nel 1995). Entrambe sono costituite soprattutto di meteoriti rinvenute in Antartide, che insieme ai deserti caldi (Sahara, Kalahari, ecc.) rappresenta l'Eldorado delle nuove scoperte.

Gli elenchi di nuove meteoriti sono riportati nel Meteoritical Bulletin, che viene pubblicato all'interno della rivista Meteoritical and Planetary Science.

Ogni anno la Terra raccoglie una quantità di materiale meteoritico, stimata in circa 50 000 tonnellate, ma quasi tutta come micrometeoriti (di dimensioni inferiori a 0,5 mm). La gran parte però evapora per attrito atmosferico prima di giungere al suolo: solo alcune decine di tonnellate vengono effettivamente incorporate dal nostro pianeta.

Le meteoriti vengono generalmente classificate in tre grandi gruppi, a seconda della loro composizione: rocciosa (aeroliti), metallica (sideriti), mista (sideroliti).

Il primo gruppo rappresenta il 95% delle meteoriti che sono state viste cadere direttamente: quando giungono al suolo si confondono facilmente con le rocce terrestri e molte passano inosservate. Gli altri gruppi sono invece ben identificabili, anche se poco comuni.

METEORITI ROCCIOSE (Aeroliti)	CONDRIITI	Ordinarie	H, L, LL
		Carbonacee	CI, CM, CV, CO, CK, CR
		Enstatiti	H, L
	ACONDRIITI	Angriti Aubriti Ureiliti	
		Gruppo HED (Vesta)	Howarditi, Eucriti, Diogeniti
		Gruppo SNC (Marte) Chassigniti	Shergottiti, Nakhliti
		Acondriti primitive	Acapulcoiti, Brachinita, Lodraniti, Winonaiti
METEORITI MISTE (Sideroliti)	MESOSIDERITI PALLASITI		
METEORITI FERROSE (Sideriti)	ESAEDRITI OTTAEDRITI ATASSITI		

Tabella 3.2 – Classificazione delle meteoriti

Il termine *condrite* deriva da *condrula*, una struttura sferoidale di piccole dimensioni (circa 1 mm), formata da silicati che attraversano una fase di fusione e successiva risolidificazione in gocce, che risultano poi più o meno sferiche. Le condrule costituiscono la struttura base di tutte le condriti. Le *condriti ordinarie* si articolano in tre sottotipi, classificati a seconda del contenuto in ferro: H (circa il 27% in Fe), L (circa il 23%) e LL (sotto il 20%).

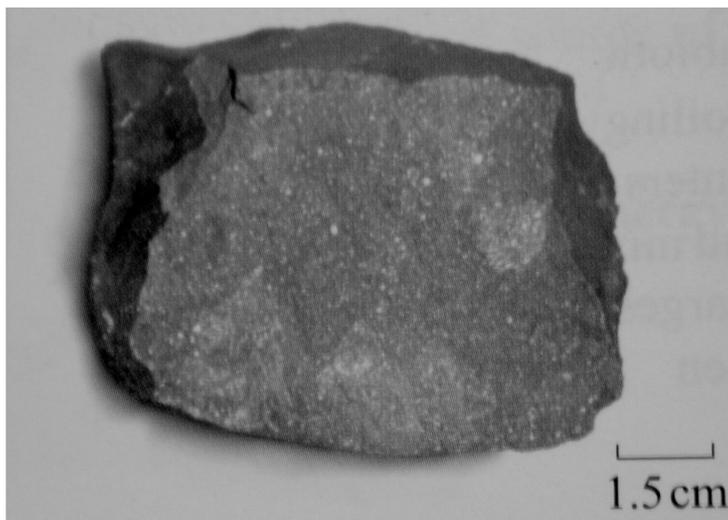


Fig. 3.17 – Meteorite di Murchison, condrite carbonacea caduta nel 1969.

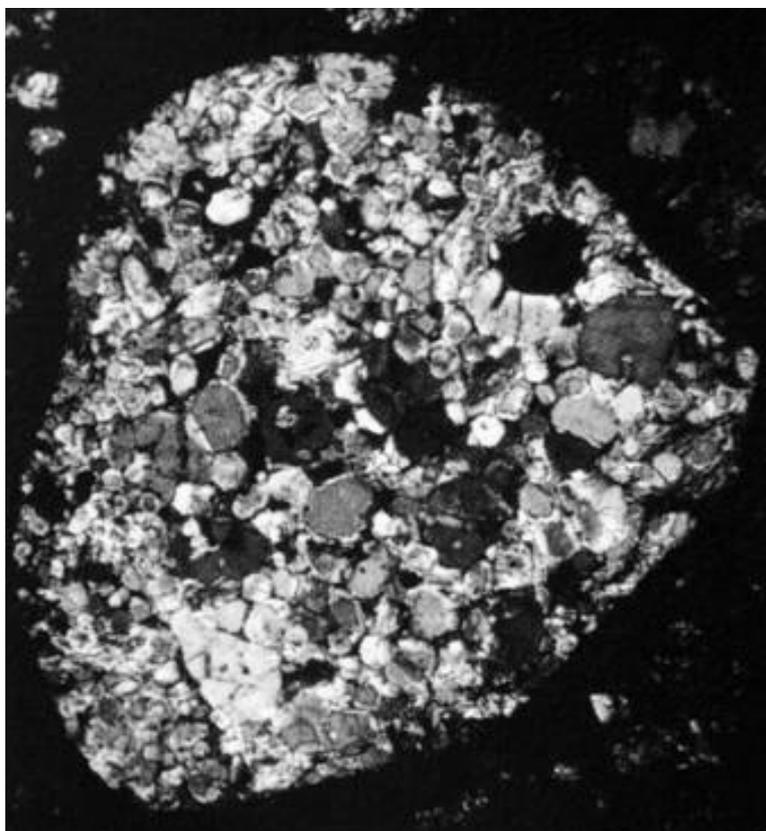


Fig. 3.18 – Condruola del meteorite di Ornans

Le *condriti enstatiti* (ne esistono solo 24 esemplari) debbono il loro nome a un minerale composto di silicati, il pirosseno, presente anche sulla Terra ma impoverito nel contenuto di ossigeno (perché formatosi in una zona diversa del Sistema Solare). Anche alle enstatiti si applica la classificazione H, L, LL.

Le *condriti carbonacee* (o *carboniose*) sono antichissime e costituiscono un gruppo tanto raro quanto importante, perché custodiscono informazioni sulle prime fasi di formazione del Sistema Solare. Contengono molti composti organici e, spesso, anche tracce di acqua primordiale. Hanno densità molto bassa, con struttura porosa e piuttosto fragile (circa il 10% del volume risulta occupato dalle cavità). A questa classe appartiene il frammento più antico mai studiato, il meteorite di Allende caduto in Messico nel 1969 (l'età stimata è di 4,56 miliardi di anni).



Fig. 3.19 – Meteorite di Orgueil (1864)

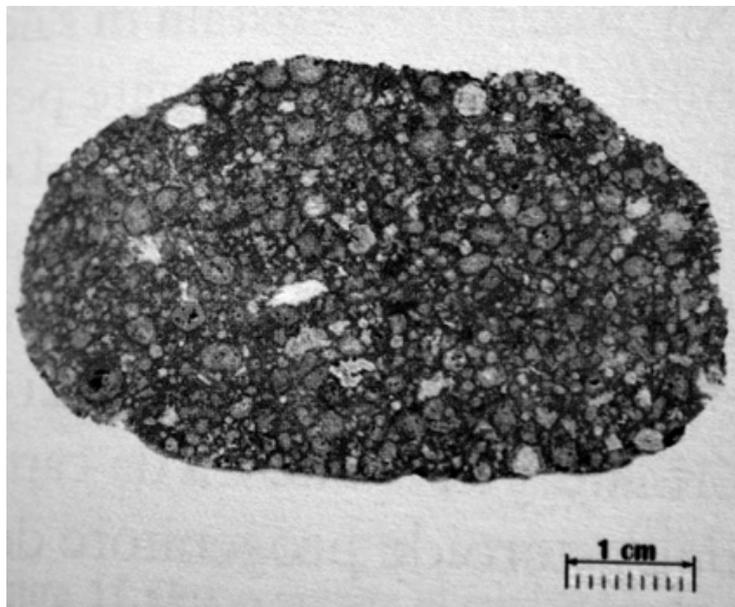


Fig. 3.20 – Meteorite di Allende (frammento con condrule)

Il gruppo delle *acondriti* comprende tutti le meteoriti rocciose che NON presentano condrule all'interno. Dal punto di vista morfologico somigliano moltissimo alle rocce ignee terrestri e ciò fa pensare ad una origine simile, all'interno di corpi di notevoli dimensioni con differenziazione interna. La somiglianza ne rende però difficilissima l'individuazione se non vengono osservate durante la caduta.

Angriti: un solo esemplare, rinvenuto ad Angra dos Reis (Brasile) nel 1869.

Aubriti: assai simili alle enstatiti, di cui rappresentano probabilmente un'evoluzione successiva (per fusione e differenziazione).

Ureliti: rare, contengono circa il 2% di carbonio (grafite, microdiamanti). Forse evolute dalle condriti carbonacee.

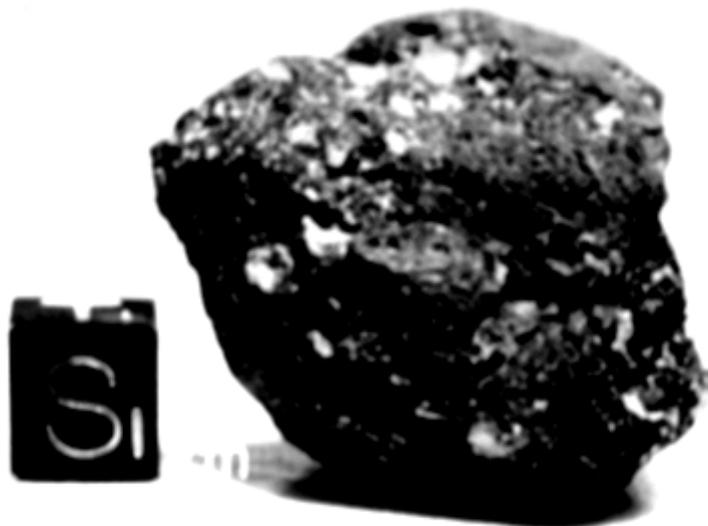


Fig. 3.21 – Acondrite dell'Antartide (di origine LUNARE)

Le acondriti del gruppo EHD, come suggerisce la sigla, si dividono in *eucriiti*, *howarditi*, *diogeniti*. Mostrano grandi affinità di composizione con la crosta di Vesta (che è stata studiata con metodi spettroscopici) e ciò ha permesso di stabilire che le EHD provengono da questo asteroide. Vesta possiede vicino al suo polo sud un cratere di ampiezza pari a 460 km e profondo 13 km (il corpo ha dimensioni complessive 580x560x460 km!). L'origine delle acondriti EHD sembra dunque da attribuirsi proprio a tale catastrofico impatto.

Le acondriti marziane (SNC) si dividono in *shergottiti*, *nakhliti* e *chassigniti*. Sono considerate frammenti di Marte, con età molto minore rispetto alle altre meteoriti (in media 1,3 miliardi di anni invece di 4,5). Indizio decisivo per l'attribuzione è la corrispondenza tra l'analisi chimica dei gas inglobati del minerale e i dati atmosferici delle sonde Viking. Nel 1997 un gruppo di scienziati pubblicò i risultati dello studio condotto su ALH84001, acondrite SNC di età insolita (4,5 miliardi di anni): si ipotizzava che la roccia custodisse dei batteri marziani fossili. La questione è ancora aperta, ma oggi si propende per un'origine non biologica delle strutture osservate.



Fig. 3.21 – Frammento di eucriite

Le meteoriti di tipo ferroso sono suddivise in *esaedriti*, *ottaedriti* e *atassiti*. Spesso mostrano un fitto reticolo di linee (figure di Widmanstätten). Le tipologie si differenziano per il diverso rapporto esistente tra due leghe di ferro-nichel (*kamacite* e *taenite*). Le esaedriti sono interamente composte di kamacite, le ottaedriti invece sono un miscuglio di entrambe. Le atassiti, infine, sono

composte di sola taenite. Sono rarissime, però la più grande meteorite mai rinvenuta, la Hoba West (Namibia), è proprio una atassite di ben 60 tonnellate, caduta in epoca preistorica.



Fig. 3.22 – Microfotografia del meteorite ALH84001



Fig. 3.23 – Figure di Widmanstätten nel meteorite di Gibeon

LA STRUTTURA DELLE COMETE

4.1 - INTRODUZIONE

Le comete si possono considerare residui inutilizzati del materiale “di costruzione” dei pianeti esterni. Per questo motivo si ritiene che la loro composizione sia molto simile a quella della nube protosolare: lo stato di conservazione del materiale appare ottimo e fa sperare di poter ottenere informazioni di importanza fondamentale per la comprensione del processo di formazione del Sistema Solare.

Riassumiamo in modo sintetico le caratteristiche essenziali del modello standard di formazione del Sistema Solare: secondo la teoria più accreditata il Sole, con pianeti, satelliti e i corpi minori, è nato dalla condensazione di un disco di gas e polveri circa 4,55 miliardi di anni fa (il valore più accurato è quello fornito dalle meteoriti). Prima si è formato il Sole (nella parte centrale e più massiccia del disco), poi all'esterno si sono progressivamente formate le condensazioni che, in tempi diversi, hanno dato origine ai pianeti; Giove è stato il primo a condensarsi (e ha così impedito alla fascia degli asteroidi di fare lo stesso), mentre l'ultimo pianeta a completare il processo sembra essere stato Nettuno.

La nebulosa solare non era omogenea dal punto di vista chimico: nella parte centrale, più calda, potevano condensare solo gli elementi più refrattari come i metalli e i silicati. Con l'aumentare della distanza e il diminuire della temperatura cresceva la percentuale di elementi volatili e a basso punto di fusione, come l'acqua, il metano, l'ammoniaca e altri composti organici.



Fig. 4.1 – La cometa Kohoutek (1973 F)

I gas più leggeri come l'idrogeno e l'elio, che costituivano più del 95% della massa del disco, erano quasi tutti entrati a far parte del protosole: la parte residua fu anch'essa espulsa verso l'esterno. Questo fatto spiega perché oggi i pianeti più interni siano densi (perché composti soprattutto di metalli e silicati) e piccoli (perché non c'era molto materiale di questo tipo), mentre i pianeti giganti si trovano più all'esterno perché hanno potuto catturare il gas in uscita dal disco.

Il materiale residuo della formazione, oltre a formare i satelliti dei pianeti, ha dato origine alle zone oggi note come fascia principale degli asteroidi e regione dei corpi trans-nettuniani al di là dell'orbita di Nettuno. Proprio queste due zone sono quelle di maggior interesse per chi cerca elementi utili a ricostruire la storia della nascita del Sistema Solare.

4.2 – LA STRUTTURA DI UNA COMETA

4.2.1 – Caratteri generali

L'aspetto caratteristico che di solito viene associato alle comete (chioma diffusa, più una coda) è in realtà un effetto transitorio che ha luogo solo in prossimità del perielio. Ne è responsabile l'azione della radiazione del Sole – e anche del vento solare - sul *nucleo*, che è l'unica parte permanente della struttura cometaria.

L'azione del Sole fa evaporare la crosta del nucleo, da cui fuoriescono gas e polveri. L'emissione riguarda solo alcune zone: ampie regioni del nucleo restano inerti. Il materiale espulso forma progressivamente le altre parti della cometa: *code* (una di *gas ionizzati*, una di *polveri*), *chioma*, *corona*.

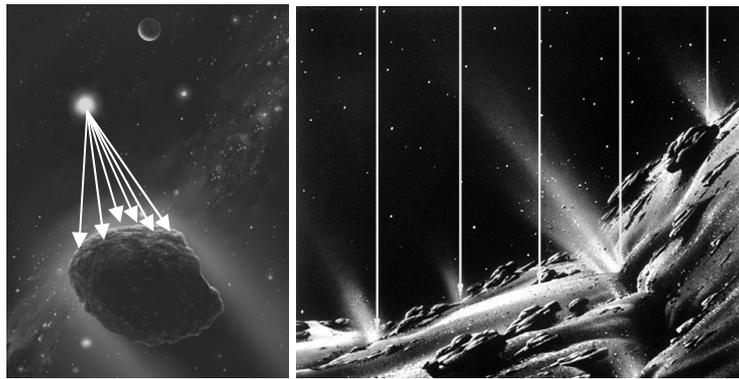


Fig. 4.2 – L'azione del vento solare su una cometa

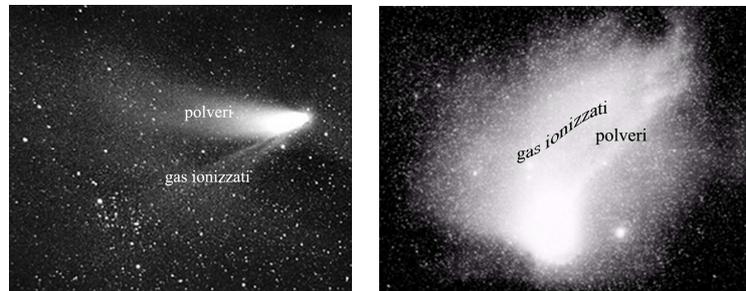
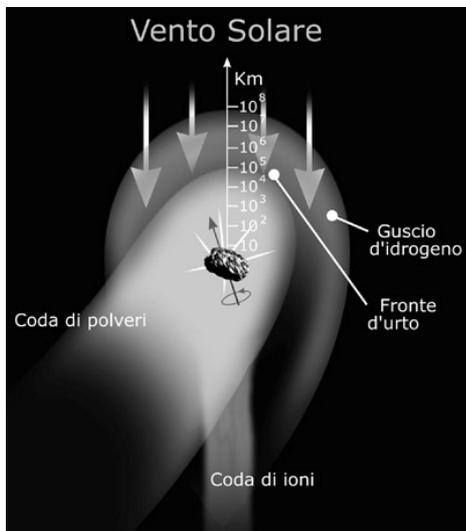


Fig. 4.4 – Le code di un cometa: a sinistra la cometa Hale-Bopp del 1997; a destra la cometa di Halley del 1986.

Fig. 4.3 – Struttura di una cometa.

Le due code sono diverse e il loro aspetto varia anche da cometa a cometa. La coda di polveri viene deviata dall'azione del vento solare: la pressione di radiazione agisce sui grani di polvere in maniera variabile a seconda delle loro dimensioni, della distanza dal Sole e della velocità di rotazione del nucleo. Le forme risultanti possono essere molto varie, ma la coda di polveri si allinea comunque in direzione opposta al Sole.

4.2.2 – Il meccanismo di emissione del nucleo

Finché la cometa si trova lontana dal Sole la crosta superficiale del nucleo (che dalle misure

effettuate è uno degli oggetti più neri che si conoscano) preserva gli elementi volatili all'interno; ma quando il perielio si avvicina la situazione cambia perché la protezione evapora progressivamente, liberando gas e polveri. La gravità solare e la pressione di radiazione sono entrambe proporzionali a $1/r^2$, dove r è la distanza dal Sole: l'emissione – che abbiamo già detto essere piuttosto irregolare – determina dunque delle perturbazioni sensibili alla traiettoria del nucleo, proprio come un aereo a reazione (effetto jet o razzo). L'orbita risultante non è un'ellisse perfetta, sia per la pressione di radiazione che tende ad allontanare il nucleo dal Sole, sia per i continui getti di gas che fuoriescono da esso. La presenza di questi effetti non-gravitazionali rende alquanto problematico prevedere con molta precisione la traiettoria di una cometa e quindi la sua posizione apparente nel cielo. Si tratta comunque di una questione semplice se la si confronta con il problema di determinare in anticipo la luminosità dell'oggetto cometario: questo è un compito di difficoltà estrema, perché lo splendore dipende da molti fattori, alcuni dei quali variano da passaggio a passaggio e altri non sono ancora conosciuti.

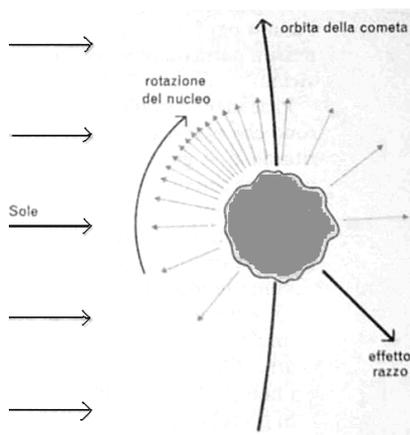


Fig. 4.5 – Effetto razzo

Il tasso di sublimazione della crosta superficiale è determinato dall'intensità dell'irraggiamento solare e dipende da r^2 , dove r è sempre la distanza dal Sole. Qualsiasi deviazione da questa legge viene studiata con grande interesse, perché rispecchia i dettagli del processo di espulsione di gas e polveri dal nucleo, dei quali ancora oggi non sappiamo quasi nulla.

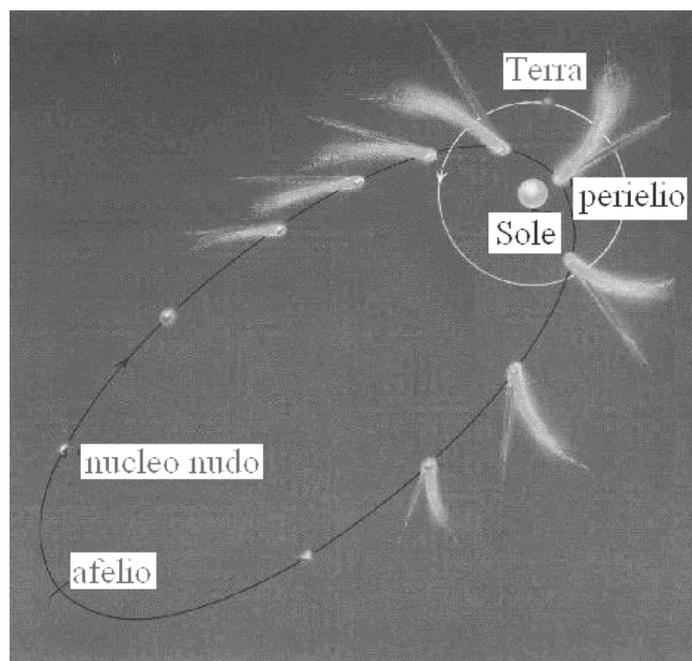


Fig. 4.6 – La forma di una cometa al variare della distanza da Sole.

Il meccanismo di emissione del materiale dal nucleo è assai complesso: la radiazione solare incidente viene in parte riflessa e in parte assorbita. La riflessione dipende dall'albedo della superficie: l'assorbimento dipende dall'angolo di incidenza della radiazione e dalla temperatura del nucleo. Parte di quanto assorbito viene poi riemesso, con modalità che dipendono dalla temperatura e dalle proprietà strutturali del nucleo.

La quantità di gas e polveri emessa è assai variabile, ma di solito raggiunge il massimo vicino al perielio: per esempio, i valori misurati per la cometa Arend-Roland, alla minima distanza dal Sole, sono di circa 75 tonnellate di gas e 60 tonnellate di polveri ogni secondo.

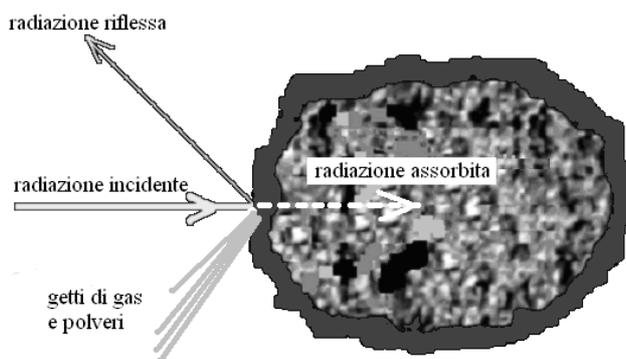


Fig. 4.7 – La radiazione solare e la cometa.

Per un discorso più generale manca ancora una statistica attendibile e siamo quindi al livello di ipotesi, per quanto ragionevoli. Alla distanza della Terra (1 UA) una cometa “tipica” perde da 10 a 100 tonnellate circa di materiale al secondo; per un intero passaggio si può arrivare a 100–1000 miliardi di tonnellate, quasi tutte emesse vicino al perielio, e tale massa corrisponde a circa l'1% dell'intero nucleo. Le comete hanno dunque vita molto breve su scala astronomica: da 10 000 anni per le comete a corto periodo^[1] fino a qualche milione di anni per le più eccentriche.

Le emissioni del nucleo cessano rapidamente quando la cometa si allontana, in particolare alla distanza di circa 3 UA, che è la soglia di congelamento dell'H₂O: esistono però eccezioni di comete attive a distanze maggiori. Se ne deduce che il componente principale del nucleo è ghiaccio d'acqua (circa l'80%). Sono presenti anche altri “ghiacci” come CO (monossido di carbonio), CO₂ (anidride carbonica) e CH₄ (metano), inglobati nella struttura a reticolo dei cristalli di ghiaccio d'acqua (*clatrati*) o sotto forma di composti idrati, cioè con acqua aggiunta (per esempio CH₄·6H₂O e CO₂·6H₂O, metano e anidride carbonica idrati).

4.3 – PROPRIETÀ FISICHE DEL NUCLEO

Un nucleo di cometa è un conglomerato di ghiacci di vario tipo (soprattutto ghiaccio d'acqua) e grani di polvere, composti probabilmente di silicati e molecole organiche, anche molto complesse.

^[1] Il periodo di una cometa, e in generale di un oggetto che orbita intorno al Sole, è già stato definito nel capitolo 2 (Le comete nella storia). Sulla base del tempo necessario a completare una rivoluzione attorno al Sole, si possono distinguere le comete *di corto periodo* (fino a circa 200 anni, sono circa 140 – la cometa di Encke, con un periodo di 1206 giorni (3,3 anni) è quella che ritorna più spesso al perielio) e *di lungo periodo* (oltre 200 anni e fino a moltissimi milioni di anni – la cometa di Delevan, individuata nel 1914, sembra avere un periodo di circa 24 milioni di anni.); le prime dovrebbero provenire dalla fascia di Edgeworth-Kuiper e/o dal disco diffuso, mentre per le seconde si ritiene che la zona di origine sia la nube di Oort.

La struttura dovrebbe essere porosa e poco compatta: spesso si osservano i nuclei spezzarsi sotto l'azione di forze gravitazionali abbastanza intense ma non eccezionali. Tuttavia è raro che la distruzione sia completa: nel 1994 la cometa Shoemaker-Levy 9 si separò in 21 nuclei distinti prima dell'impatto finale con Giove).

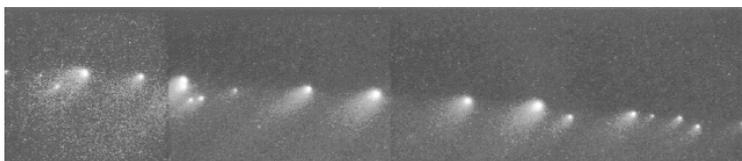


Fig. 4.8 – Frammenti della Cometa Shoemaker – Levy 9

Misure dirette della compattezza di nuclei cometari sono oggi ancora impossibili. Si usano allora metodi indiretti:

- 1) l'analisi delle interazioni mareali del Sole sulle comete che lo sfiorano al perielio (la famiglia Kreutzer, scoperta dalla sonda SOHO);
- 2) L'analisi dei periodi di rotazione dei nuclei cometari (ma i dati disponibili sono ancora scarsi);
- 3) Lo studio delle traiettorie degli sciami meteoritici, associati a comete, che giungono nell'atmosfera terrestre.

I valori ricavati attraverso questi metodi oscillano tra 100 e 10 000 Newton/m²; ciò corrisponde a carichi di rottura rispettivamente di 1 – 100 grammi per ogni cm². Le comete non sono quindi molto compatte, e anche la compressione dovuta alla loro stessa gravità non modifica la situazione. Anche se non c'è molta coesione il nucleo non è un mucchio di sassi, ma un corpo centrale ben definito. Le immagini delle sonde ne hanno evidenziato la forma irregolare, i getti di gas che escono apparentemente a caso dalla superficie, le zone inattive di colore molto scuro e anche crateri, rilievi e depressioni.

Le piccole dimensioni dei nuclei cometari (al massimo circa 100 km) fanno pensare che non vi sia alcuna differenziazione interna in nucleo e mantello, come accade per i pianeti: è assai probabile che si tratti di strutture omogenee e non differenziate.

Spesso si osservano rapidi accrescimenti nell'emissione (*outbursts*), che possono aumentare la luminosità anche di 100 volte. Dopo il parossismo si forma una chioma temporanea che svanisce nel giro di poche settimane. Una possibile spiegazione per gli *outbursts* è che essi dipendano da reazioni chimiche esotermiche ad opera di radicali liberi su sacche di gas imprigionate sotto la crosta del nucleo: l'energia liberata aumenterebbe la pressione, fino al verificarsi delle esplosioni. Per esempio, la transizione di fase dal ghiaccio amorfo a quello cristallino, che avviene a circa 140 K, è un processo che fornisce 24 calorie per ogni grammo.

Un'altra possibile sorgente di energia è la rapida sublimazione di clatrati (CO₂ o CO solide imprigionate nel reticolo cristallino del ghiaccio d'acqua). Può darsi che processi di tipo diverso siano all'opera su diverse comete, o anche sulla stessa cometa in tempi diversi: le informazioni sono troppo poche per trarre conclusioni.

Non è possibile una misura diretta dalla Terra del nucleo di una cometa, perché è troppo piccolo; si ricorre allora a misure fotometriche nei periodi di inattività, lontano dal perielio. Questo metodo dà valori compresi tra 1 e 10 km; si ritiene però che le dimensioni possano essere anche maggiori, fino a circa 100 km (tra le ultime comete apparse la Hale-Bopp aveva un nucleo di 50 km, la Hyakutake 2–3 km).



Fig. 4.9 – Il nucleo della cometa di Halley

La prima misura diretta è stata effettuata dalla sonda Giotto sul nucleo della cometa di Halley. In passato il nucleo doveva anche essere più grande, ma dopo tanti passaggi (l'età della Halley è stimata in circa 500 000 anni) deve aver perduto una parte consistente del suo materiale.

Misure della temperatura del nucleo hanno fornito valori di 300 K – 400 K (da 30° C a 130° C), ben più alti del valore teorico di 190 K (–180°C), che è stato calcolato sul tasso di evaporazione del ghiaccio cometario ad opera dell'irraggiamento solare. La discrepanza potrebbe essere spiegata dalla presenza di una crosta superficiale molto scura, formata da un miscuglio di vari composti organici (*kerogeno* e CHON – quest'ultimo acronimo ricavato dai simboli chimici di carbonio, idrogeno, ossigeno e azoto) “cotti” dalla radiazione solare. Il risultato è che una cometa lontana dal Sole e inattiva appare nerissima, nonostante sia in gran parte composta di ghiaccio d'acqua. Solo quando si avvicina al Sole le cose, almeno parzialmente, cambiano.

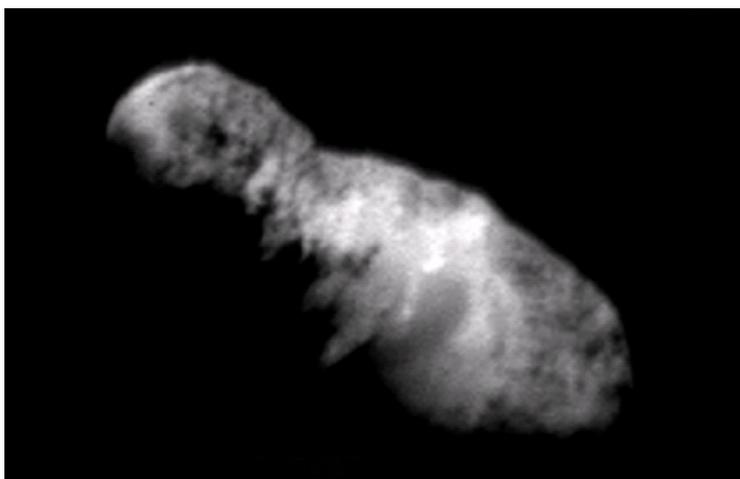


Fig. 4.10 – Il nucleo della cometa Borrelly ripreso nel 2001 dalla sonda Deep Space 1

Un parametro fisico importante per comprendere la struttura del nucleo è la densità: tanto per cambiare, si tratta di misure molto difficili da eseguire. La procedura più seguita è quella di ottenere prima una stima della massa del nucleo sfruttando l'effetto perturbativo delle forze non gra-

vitazionali (quelle dovute all'emissione di gas e polveri e alla pressione di radiazione) che modificano l'orbita del nucleo. Per ottenere poi la densità occorre un valore attendibile delle dimensioni: non è difficile immaginare l'entità dell'errore sulla misura finale. Alcuni valori ricavati finora danno $0,1 \text{ g/cm}^3$ (per la cometa Kopff), $0,54 \text{ g/cm}^3$ (cometa Tempel 2), $0,19 \text{ g/cm}^3$ (cometa Giacobini-Zinner). Si tratta di densità alquanto basse, indizio di una struttura quasi spugnosa.

Le misure di rotazione dei nuclei cometari forniscono valori compresi tra alcune ore e alcuni giorni: tuttavia la loro attendibilità è ancora incerta e non ce n'è abbastanza per costruire modelli teorici.

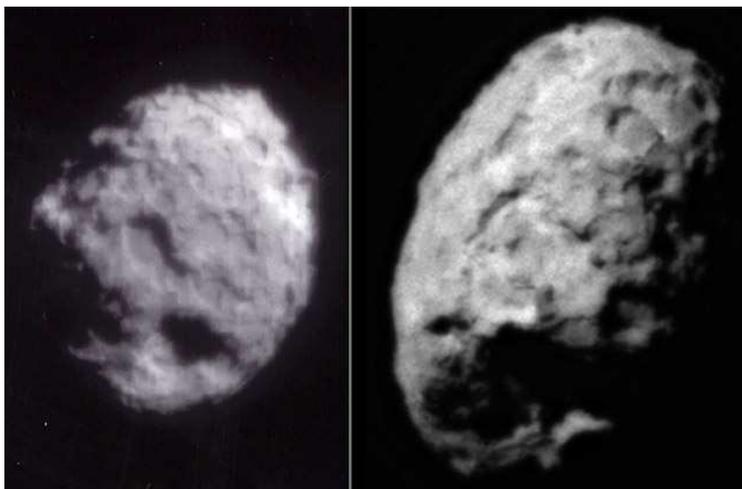


Fig. 4.11 – Due immagini del nucleo della cometa Wild

Lo studio della composizione chimica del nucleo si basa soprattutto sull'analisi spettroscopica della chioma. Le abbondanze chimiche, almeno per la cometa di Halley, risultano molto simili a quelle solari, con l'eccezione dell'idrogeno (meno del Sole) e del carbonio, che sembra in gran parte segregato sotto forma di composti organici complessi del tipo CHON.

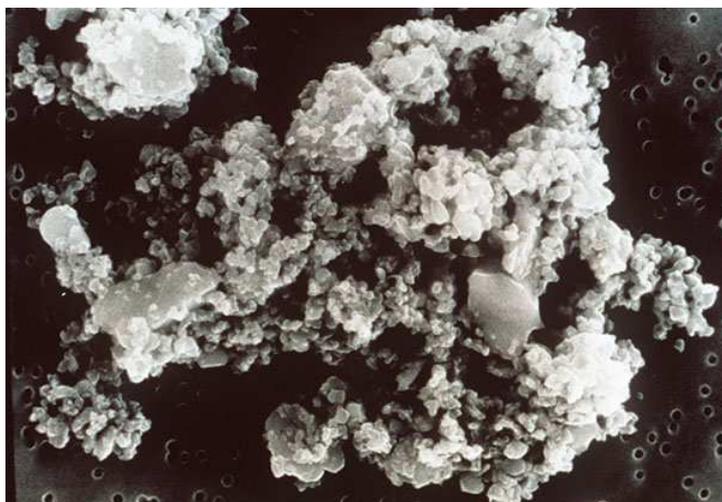


Fig. 4.12 – Un grano di probabile origine cometaria.

Particolare interesse riveste lo studio delle abbondanze isotopiche^[2]. A quanto sembra, il rapporto $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ sarebbe più basso del corrispondente valore per il mezzo interstellare. Ciò

^[2] Si dice *isotopo* di un dato elemento chimico un nucleo che ha lo stesso numero di protoni dell'elemento, ma diverso numero di neutroni. Per esempio, il nucleo dell'idrogeno è composto da un solo protone: se nel nucleo inseriamo anche un neutrone otterremo il *deuterio*, una forma di idrogeno che ha le stesse proprietà chimiche di quest'ultimo, ma massa

suggerisce che l'equazione “*materiale cometario = nebulosa protosolare = materiale interstellare*” debba essere considerata con notevole scetticismo: come accade sempre in questi casi, è necessario raccogliere ulteriori dati. Nella misura del rapporto $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ si è fatto uso principalmente di osservazioni effettuate nella banda delle radiofrequenze, ancora da convalidare pienamente; sembra che esso sia causato da un incremento dell'isotopo più pesante nelle nubi interstellari, dovuto all'immissione di materiale stellare elaborato dal ciclo CNO in stelle di alta sequenza.

Gli altri valori delle abbondanze isotopiche (con l'eccezione del rapporto deuterio/idrogeno D/H, che merita un discorso a parte) sono più o meno allineati con i valori solari: in particolare, per l'ossigeno e lo zolfo, i rapporti $^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$, $^{32}\text{S}/^{34}\text{S}$.

È praticamente impossibile elencare in poco spazio tutti composti organici individuati nelle comete. A parte i soliti metano (CH_4), monossido di carbonio (CO) e anidride carbonica (CO_2) ricordiamo i composti organici: CH, C_2H_2 , C_2H_6 , CN, HCN, HCNO, H_2CO , CH_3OH , CS, CS_2 , OCS. Tra le varie specie non organiche citiamo invece NH, NH_2 , NH_3 , NO, H_2S , SO_2 , Ca, Ni, Fe, Cr, Mn, Co, Cu, S_2 , K, Na.

A questo punto vale la pena soffermarsi su un aspetto di estremo interesse, è imperniato sulla misura del rapporto isotopico D/H tra deuterio e idrogeno. Sintetizzato in modeste quantità all'inizio della storia dell'Universo, il deuterio mostra una distribuzione di abbondanza bimodale tra i corpi del Sistema Solare. Per esempio, il rapporto D/H delle (poche) comete analizzate finora è circa 10 volte il valore originario stimato per la nebulosa protosolare. L'arricchimento sembra dipendere dalla maggiore efficacia di alcune reazioni ioniche e molecolari generatrici di deuterio nell'ambiente del nucleo (bassa temperatura + alta densità).



Fig. 4.13 – La cometa 153P/Ikeya-Zhang ripresa da Rolando Ligustri dall'Osservatorio Astronomico di Talmassons (Ud) il 10 marzo 2002.

Continuando nei confronti ci si accorge che il rapporto D/H è molto più basso per le comete che per Giove e Saturno (che anche in questo risultano simili al Sole). Ciò può suggerire una do-

maggiore e dunque diverse proprietà fisiche. Un altro esempio: ^{12}C è un carbonio che ha 6 protoni e 6 neutroni nel nucleo, mentre ^{13}C ha sei protoni e sette neutroni. Si tratta sempre di carbonio, ma è diverso come proprietà fisiche dall'isotopo ^{12}C , più comune. Non è possibile trasformare un isotopo in un altro senza l'intervento di reazioni nucleari, quindi le percentuali isotopiche dicono sempre qualcosa di importante sulla storia passata del sistema.

manda importante: che risultati dà il confronto tra il D/H dei nuclei cometari e quello dell'acqua degli oceani terrestri?

L'importanza della questione nasce da un problema non ancora risolto dai modelli di formazione del Sistema Solare. Il modello standard, descritto per sommi capi all'inizio del capitolo, prevede che il disco che ha formato i pianeti avesse distribuzione di temperature decrescenti partendo dal centro (protosole) e andando verso l'esterno. Nella zona dove si è formata la Terra i modelli teorici danno una temperatura intorno ai 600 K (circa 330°C), valore che non poteva in alcun caso permettere la condensazione del vapore acqueo. Ma allora, da dove viene l'acqua degli oceani della Terra?

Potrebbe darsi che molti impatti cometari abbiano arricchito di acqua un pianeta in precedenza asciutto: in tal caso il rapporto D/H dovrebbe essere simile per le comete e gli oceani terrestri.

I risultati (parziali) finora ottenuti si possono riassumere nella seguente tabella:

<i>corpo celeste</i>	<i>rapporto D/H</i>
Terra	$1,5 \cdot 10^{-4}$
Cometa di Halley	$3,16 \cdot 10^{-4}$
Cometa Hyakutake	$2,82 \cdot 10^{-4}$

Gli oceani terrestri sembrano più impoveriti di deuterio rispetto ai nuclei cometari. La questione, tuttavia, rimane ancora aperta e i dati sono tuttora in discussione. Le missioni spaziali del prossimo futuro daranno un contributo fondamentale per la soluzione di questo problema (e speriamo anche di tutti gli altri!).

Un team di scienziati internazionali, tra i quali sette italiani, analizzando i grani di polvere della cometa Wild 2 ha individuato lunghe molecole organiche di ammine, precursori del DNA. Alcuni degli autori della scoperta ritengono che questa sia la conferma della teoria, nata nei primi anni del novecento, secondo la quale la vita sulla Terra abbia avuto origine da molecole portate dalle comete. Ad avvalorare questa ipotesi vi sono anche i tempi rapidi con cui la vita è comparsa e si è sviluppata sulla Terra: in poche decine di milioni di anni la situazione è mutata radicalmente.



Fig. 4.14 – La cometa Ikeya-Seki (1965)

GLI ASTEROIDI DELLA FASCIA PRINCIPALE

5.1 – COLLISIONI NEL SISTEMA SOLARE

Come si è già detto, oltre che dal Sole e dai pianeti maggiori, il Sistema Solare è densamente popolato da numerosissimi corpi minori: satelliti, asteroidi, comete e oggetti trans-nettuniani, meglio noti come TNO (tra i quali l'ex-pianeta Plutone). Alcuni hanno dimensioni ragguardevoli e possono essere scoperti, osservati e studiati; altri sono più piccoli e ci accorgiamo della loro esistenza solo se e quando arrivano sulla Terra o nell'atmosfera terrestre, sotto forma di meteoriti, bolidi, meteore.

L'atmosfera terrestre ne filtra e distrugge parecchi, consumandoli per ablazione grazie all'attrito: alcuni però arrivano a terra, formando anche crateri da impatto.

L'esistenza di eventi collisionali è, a ben guardare, una costante di tutto il Sistema Solare; è facile rendersene conto con un po' di aritmetica e un semplice modello.

La Terra ha un raggio R più o meno di 6000 km e orbita intorno al Sole a una velocità v pari a circa 30 km/s; in un secondo, allora, essa “spazza” un volume pari a quello del cilindro di base πR^2 e altezza v :

$$V = \pi R^2 v \approx 3,4 \text{ miliardi di km}^3 \text{ (al secondo)}$$

Nei 4,5 miliardi di anni della sua esistenza il nostro pianeta ha dunque spazzato un volume di circa $4,8 \cdot 10^{26} \text{ km}^3$, ovvero circa dieci volte il volume della sfera centrata nel Sole e che arriva fino a Marte (la cui distanza media dal Sole è 226 milioni di km). Ora, in un volume di queste dimensioni c'è un numero sbalorditivo di oggetti (anche qualche pianeta). Facciamo notare che questo calcolo è solo rudimentale: i corpi che la Terra può incontrare non sono fermi rispetto al Sole. La velocità relativa proiettile-Terra (che è quella che avremmo dovuto usare) è un po' più piccola. Inoltre non è vero che la Terra si muova a caso: essa percorre un'orbita definita, anche se essa cambia un po' nel tempo. Questo fa sì che non ci siano collisioni con Mercurio, Venere o Marte, ma non cambia la conclusione qualitativa: *un numero incredibile di corpi ha urtato la Terra nel corso della sua storia.*

Il riconoscimento del ruolo svolto dagli impatti nella storia del Sistema Solare è avvenuto solo nel corso degli ultimi trent'anni. A questo ritardo ha molto contribuito la tradizionale riluttanza della comunità scientifica a considerare fenomeni catastrofici, quali le collisioni tra corpi celesti, come fattori di primo piano nell'evoluzione di pianeti e satelliti.

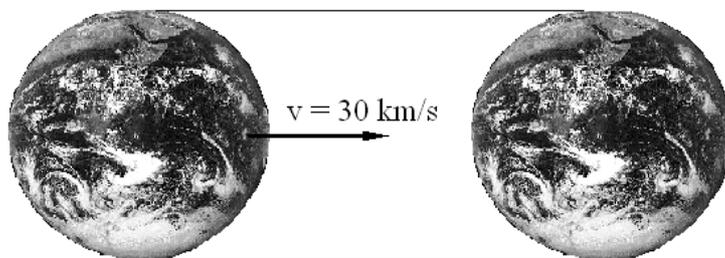


Fig. 5.1 – La Terra nel suo movimento “spazza” un certo volume di spazio

Il discorso che abbiamo appena fatto non cambia andando in zone diverse del Sistema Solare, né cambia di molto anche se, invece di pensare ad un pianeta grosso come la Terra, si prende in considerazione un oggetto di dimensioni più contenute (come un asteroide). Possiamo quindi affer-

mare che le collisioni sono un evento generale: quelle che cambiano sono le conseguenze.

Con riferimento specifico agli asteroidi, le collisioni operano attraverso tre differenti processi:

- a) erosione
- b) craterizzazione
- c) distruzione vera e propria (alla quale può o meno far seguito una riaccumulazione parziale/totale dei frammenti).

Le perdite di massa dei corpi minori a seguito dei processi collisionali (erosione, craterizzazione e distruzione) sono assai importanti.

La situazione attuale della fascia principale degli asteroidi è, per certi versi, simile a quella di un'autostrada cosmica con migliaia di corsie e milioni di auto senza controllo. I processi distruttivi sono ora dominanti, ma sappiamo che nel passato la situazione doveva essere diversa, perché nelle fasi iniziali della formazione del Sistema Solare prevalevano certamente processi di accrescimento e coalescenza tra corpi (altrimenti oggi i pianeti non esisterebbero).

Che cosa dunque è successo per cambiare in modo così drastico l'evoluzione degli asteroidi? La teoria più accreditata ne attribuisce la responsabilità a Giove. Il pianeta si è formato per accrescimento di planetesimi minori, e la sua enorme massa testimonia che la gravità ha svolto un ruolo fondamentale nel processo di formazione, accelerandolo in maniera esponenziale: i frammenti residui sono poi stati progressivamente accelerati ad ogni passaggio ravvicinato a Giove fino alle condizioni osservate oggi, che gli studiosi definiscono di "ipervelocità" (per una spiegazione del termine si veda il paragrafo successivo).

5.2 – FISICA DELLA COLLISIONE

Tipicamente le collisioni avvengono a grande velocità relativa: decine di km/s per la Terra, 5 km/s in media per gli asteroidi e circa 1 km/s per i TNO. La velocità di impatto è più o meno proporzionale alla velocità del moto orbitale, che diminuisce secondo la radice quadrata della distanza dal Sole; nel caso di un'orbita circolare di raggio R , essa è

$$v = \sqrt{\frac{GM_S}{R}},$$

dove M_S è la massa del Sole e $G = 6,673 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3/\text{kg} \cdot \text{s}^2$ è la costante di gravitazione universale.

Nel Sistema Solare interno, compresa la fascia principale, questi valori superano largamente la velocità del suono tipica dei materiali solidi che costituiscono gli asteroidi (che è di 2–3 km/s): è in questo senso che gli astronomi usano il termine di *ipervelocità*. In condizioni del genere è impensabile che si verifichino processi di rimbalzo o di coalescenza che permettano al proiettile (così viene chiamato il più piccolo dei due corpi) di sopravvivere.

Nella zona d'impatto si hanno processi fisici complessi; frammentazione della materia solida, onde d'urto e perfino la formazione di plasma. Essi sono stati studiati seguendo tre diverse strade:

- a) in laboratori attrezzati a far urtare tra loro corpi collidenti piccoli, scalando opportunamente dimensioni e velocità del proiettile e del bersaglio in modo da riprodurre in miniatura gli impatti reali. Ogni fase dell'interazione è filmata e registrata;
- b) studiando le conseguenze dei test nucleari ancora oggi effettuati. Gli effetti di un'esplosione nucleare, infatti, non sono molto diversi da quelli di un impatto catastrofico
- c) una terza possibilità, infine, è lo studio delle collisioni mediante elaborate simulazioni numeriche (il nome usato in inglese, *hydrocodes*, fa riferimento alla dinamica dei fluidi, che usa algo-

ritmi simili). Dal punto di vista teorico il problema è molto complesso.

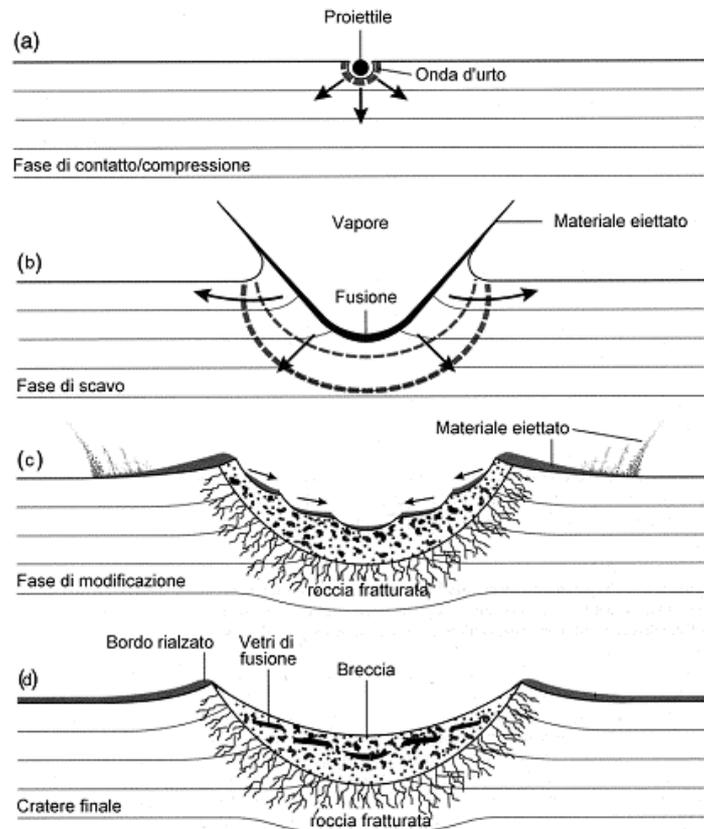


Fig. 5.2 – Formazione di un cratere da impatto^[57]

Il primo metodo ha lo svantaggio di non garantire con assoluta certezza l'estendibilità dei risultati di laboratorio agli asteroidi reali. Le indicazioni sono ancora incerte, in particolare su alcune questioni cruciali come la struttura interna.

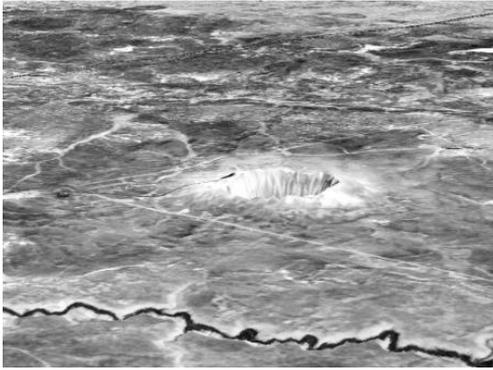
Il secondo metodo è difficile da utilizzare in modo sistematico perché molto spesso i dati più interessanti dell'esperimento sono coperti dal segreto militare.

Per il terzo metodo, infine, esiste la possibilità che gli errori di troncamento insiti nel trattamento delle cifre significative da parte del computer alterino i risultati in modo sottile ma importante (solo per fare un esempio: le approssimazioni potrebbero portare a sottostimare il trasporto energetico nelle collisioni, aumentando artificiosamente la compattezza degli asteroidi).

La materia coinvolta nella collisione, quando non si trasforma in plasma, viene espulsa dalla zona dell'impatto con velocità di regola intorno ai 10–100 m/s, a volte anche molto maggiori. Si forma così un cratere da impatto la cui profondità è all'incirca pari alle dimensioni del proiettile, ma con larghezza una decina di volte maggiore. Se il bersaglio è piccolo la materia coinvolta nella formazione del cratere viene espulsa nello spazio; se invece questo è grande (come nel caso di un pianeta) essa ricade tutt'intorno al sito dell'impatto.

È naturale chiedersi che cosa succede quando le dimensioni del cratere diventano grandi quanto quelle del bersaglio: a questa domanda cercheremo di dare risposta nel prossimo paragrafo.

[⁵⁷] L'immagine è tratta dal sito: www.pd.astro.it/meteoriti/cap7.htm



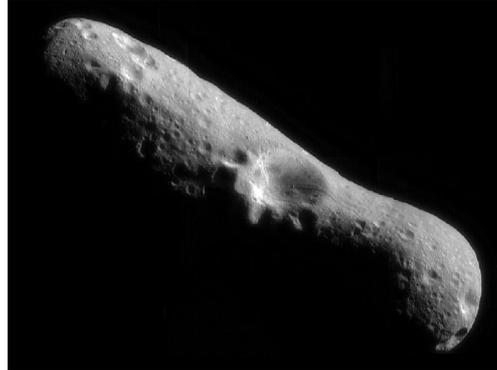
Il Meteor Crater dell'Arizona



Crateri su Mercurio



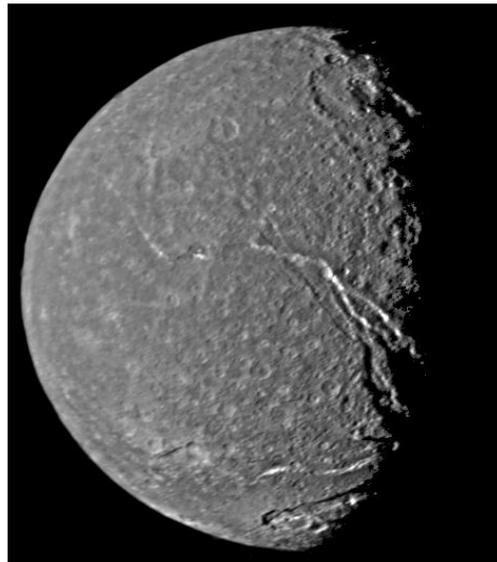
Crateri su Venere



Crateri su asteroidi: Eros



Crateri su asteroidi: Gaspra



Crateri su Titania



Crateri lunari

Fig. 5.3 – Alcuni esempi di crateri nel Sistema Solare

5.3 – COLLISIONI CATASTROFICHE

Quando il proiettile è abbastanza grande la collisione può provocare la distruzione catastrofica del bersaglio. Si formano moltissimi frammenti di varie dimensioni, che dopo la collisione si muovono indipendentemente. Esiste la possibilità che alcuni di essi possano successivamente riaccumularsi sotto l'azione della loro stessa gravità, mentre altri restano in moto come nuovi corpi minori.

Come l'intuizione suggerisce, è più facile distruggere corpi di dimensioni minori (negli asteroidi maggiori la gravità contribuisce a compattare la struttura) e molto più facile disperdere i frammenti senza riaccumularli.

Molto interessante è la previsione teorica dell'esistenza di oggetti distrutti e completamente riaccumulati, privi di rigidità interna perché tenuti insieme solo dalla loro gravità: essi prendono il nome di *rubble piles* (letteralmente: cumuli di sassolini) e devono avere una densità più bassa del valore tipico per un asteroide, che è circa 3 g/cm^3 . Per gli asteroidi ferrosi si registrano valori più alti, mentre per quelli rocciosi siamo intorno a $2,6 \text{ g/cm}^3$ (come gli asteroidi 233 Ida e 433 Eros: il numero è il progressivo del catalogo degli asteroidi in ordine di scoperta) e in certi casi si giunge fino a $1,3 \text{ g/cm}^3$ (16 Psyche e 253 Mathilde), che fa pensare a una possibile struttura di *rubble pile*. Corpi del genere non possono ruotare troppo velocemente, altrimenti i loro costituenti si disperderebbero.

Considerata all'inizio come una mera possibilità teorica, l'esistenza dei *rubble piles* si è imposta all'attenzione degli studiosi dopo la misura dei periodi di rotazione di quasi 2000 asteroidi della fascia principale (figura 5.4): pochi hanno periodo inferiore alle 2 ore, valore che rappresenta un limite fisico significativo, come possiamo mostrare con un calcolo abbastanza semplice.

È noto che un oggetto in rotazione non può avere una velocità arbitrariamente elevata: alla sua superficie agisce la forza centrifuga, che tende ad allontanare le varie parti di cui esso è costituito. Ad essa si oppongono "le forze di stato solido", ovvero quelle di coesione del materiale; nel caso poi che le dimensioni del corpo siano ragguardevoli la gravità diventa la forza più importante nel contrastare le spinte centrifughe.

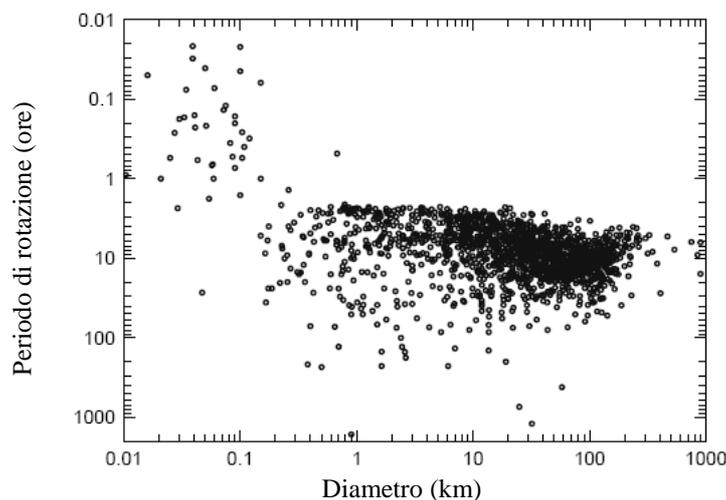


Fig. 5.4 – Frequenza di rotazione; dati 2005 su 1686 asteroidi^[58]

Alle densità tipiche della fascia degli asteroidi ($\rho \sim 3 \text{ g/cm}^3$) la transizione fra stato solido e gravità può considerarsi compiuta per oggetti di raggio superiore a circa 100 km. Considerando dunque corpi sferici dominati dalla gravità, con densità 3 g/cm^3 (cioè 3000 kg/m^3), la velocità limite di rottura v_L si trova uguagliando la forza centrifuga agente su una porzione di massa superficiale m

^[58] Immagine ripresa da www.on.br/acm2005/presentation/R15.1.pdf.

del corpo con l'attrazione gravitazionale di tutto l'asteroide su m :

$$\frac{m v_L^2}{R} = \frac{GMm}{R^2},$$

dove M è la massa dell'intero asteroide, R il suo raggio.

Ponendo $M = \frac{4}{3} \pi \rho R^3$, e semplificando m ed R , si ottiene:

$$v_L = \sqrt{\frac{GM}{R}} = \sqrt{\frac{G \frac{4}{3} \pi \rho R^3}{R}} = R \sqrt{\frac{4}{3} \pi G \rho}$$

Ora la velocità angolare limite è $\omega_L = \frac{v_L}{R}$ e il periodo corrispondente è:

$$T_L = \frac{2\pi}{\omega_L} = \frac{2\pi R}{v_L} = \frac{2\pi R}{R \sqrt{\frac{4}{3} \pi G \rho}} = \sqrt{\frac{3\pi}{G\rho}} \approx 6863 \text{ s},$$

ovvero 1 h e 54 min: ecco come si ricava il limite di 2 ore.

Se il corpo è un *rubble pile* la coesione interna viene a mancare e il compito di mantenere unito l'asteroide ricade interamente sulla gravità; la velocità limite per la rotazione di questo tipo di oggetti sarà dunque più bassa.

La distribuzione delle velocità di rotazione osservate mostra che i corpi di dimensioni più piccoli sono veloci (in alcuni casi si scende anche al di sotto del limite di 2 ore), poi si verifica una diminuzione fino a raggiungere una velocità minima intorno a $R \sim 100$ km, valore che risale nuovamente in corrispondenza degli asteroidi maggiori. Questo fatto ha portato a sospettare che molti – se non addirittura tutti – gli asteroidi di medie dimensioni siano proprio dei *rubble piles*: il problema rimane ancora aperto.

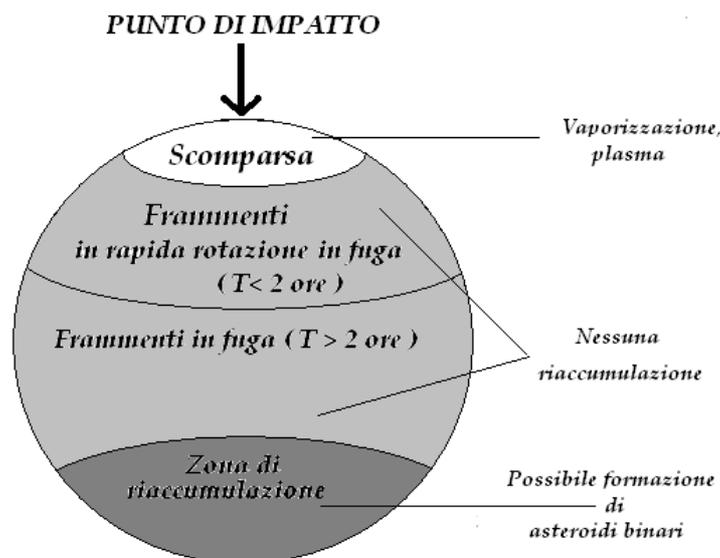


Fig. 5.5 – Distribuzione dei frammenti in una collisione catastrofica^[59]

^[59] Da Paolicchi, "Collisional evolution of asteroids", Sirolo 2001

Torniamo alla questione delle collisioni catastrofiche. Nella zona più prossima all'impatto il materiale può vaporizzare o trasformarsi in plasma, oppure viene scagliato lontano a grandissima velocità; in zone un po' più distanti si formano frammenti con altissima velocità di rotazione ($T < 2$ ore), mentre allontanandosi progressivamente dal punto di impatto il materiale del bersaglio viene distrutto e frammentato, ma tende in parte a riaccumularsi per gravità.

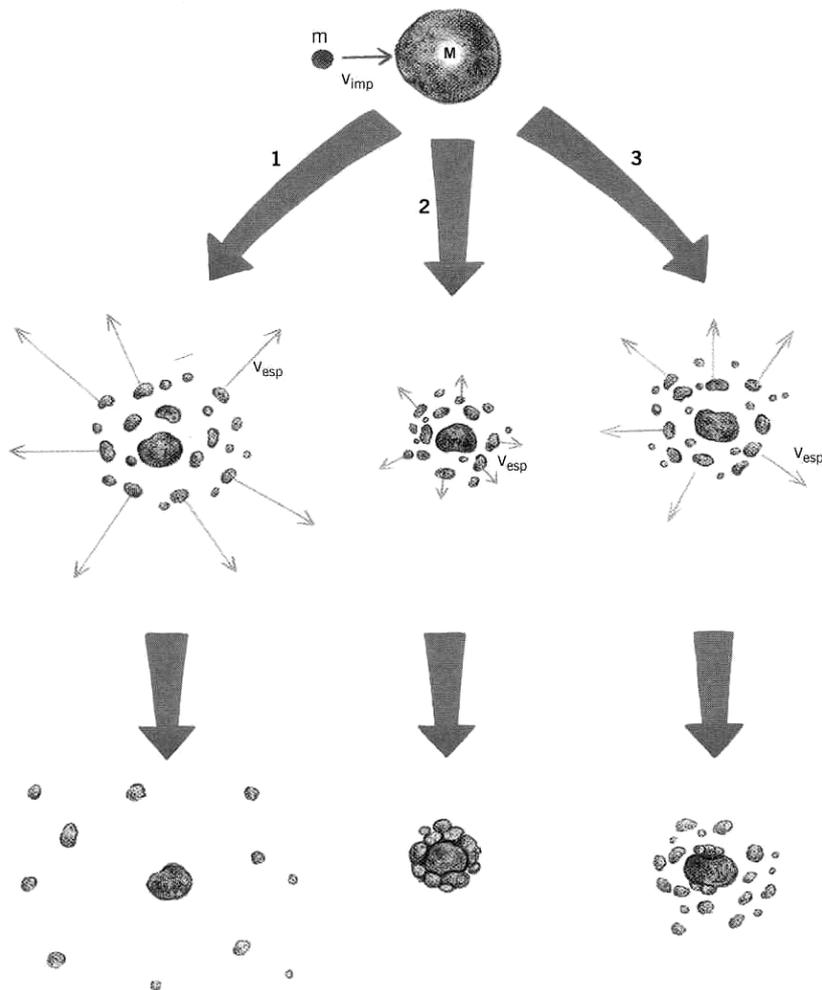


Fig. 5.6 – Nel caso in cui l'impatto porta alla distruzione dell'asteroide bersaglio si possono verificare tre situazioni. 1) Se la velocità dei frammenti è molto maggiore della velocità di fuga del bersaglio, essi si portano su orbite completamente diverse rispetto a quella del "genitore". 2) Se la velocità dei frammenti è minore della velocità di fuga, essi ricadono uno sull'altro a formare un *rubble piles*. 3) se la velocità dei frammenti è comparabile o leggermente superiore alla velocità di fuga, allora alcuni possono ricadere l'uno sull'altro, mentre la maggior parte sfugge e acquisisce orbite che differiscono di poco da quella del genitore: sono le famiglie dinamiche.^[60]

Nel punto antipodale (quello opposto rispetto al punto di impatto) tutto il materiale si riaccumula: è anche possibile la formazione di asteroidi binari se il frammento più grande (proveniente dalla zona centrale o antipodale) resta abbastanza vicino ad un altro frammento di dimensioni ragguardevoli, legandosi gravitazionalmente ad esso. Il processo può portare a componenti gemelle - con separazione scarsa o addirittura nulla - oppure a sistemi sbilanciati come la coppia Ida + Dactyl.

^[60] Vedi riferimento bibliografico [15]

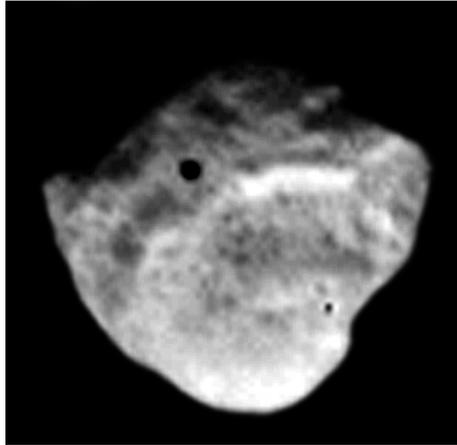


Fig. 5.7 – Iperione

La figura 5.6 mostra lo schema generale di un impatto con i destini successivi dei vari frammenti. Occorre ricordare che, in generale, i frammenti di collisioni catastrofiche non ruotano lungo gli assi principali di inerzia, ma almeno in una prima fase presentano rotazioni caotiche, con rotolamenti e precessioni di vario tipo. Iperione, un satellite di Saturno, è un buon modello di quanto succede in una situazione del genere: di forma irregolare (175x120x100 km), esso ruota in modo caotico a seguito di una collisione distruttiva.

5.4 – LA FORMAZIONE DI FAMIGLIE E IL QUADRO TEORICO ATTUALE

I frammenti che sfuggono alla riaccumulazione si muovono lungo orbite indipendenti, ma non troppo diverse (la velocità con cui si allontanano è piccola se confrontata con le velocità relative fra asteroidi).

È possibile riconoscere questi gruppi di oggetti nati da una unica origine: una famiglia di asteroidi.

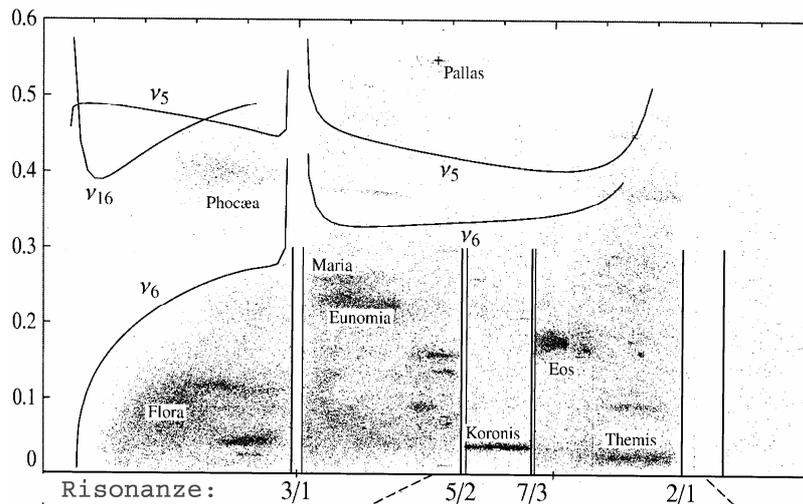


Fig. 5.8 – Le famiglie di asteroidi. In ascissa c'è il semiasse maggiore delle orbite, in ordinata l'eccentricità

Nello spazio astratto degli elementi orbitali (il semiasse maggiore a , l'eccentricità e e l'inclinazione i) le famiglie sono addensamenti statisticamente significativi dal punto di vista dinamico. Fino ad oggi si conoscono una ventina di famiglie; le più grandi si riconoscono anche a oc-

chio. Il loro studio fornisce importanti strumenti per la comprensione della fisica delle collisioni, anche se molti aspetti sono ancora ben lontani dall'essere completamente chiariti.

Nel Sistema Solare le famiglie non sono l'unico esempio di collisione catastrofica, come testimonia il caso di Iperione, la cui collisione potrebbe avere avuto conseguenze di portata più vasta come la formazione dell'atmo-sfera di Titano.

Nella formazione di una famiglia devono essere frequenti anche impatti secondari successivi a quello (catastrofico) iniziale. Anche se le traiettorie di impatto hanno tutte probabilità simile, e quindi non esistono versi di rotazione privilegiati, le molte collisioni dovrebbero nel lungo periodo accelerare di molto la rotazione dei membri della famiglia: un discorso del genere, con le dovute cautele, può essere considerato valido anche per tutti gli asteroidi della fascia principale. Questa previsione teorica è però smentita dalle osservazioni: sembra dunque che il momento angolare iniziale dei corpi della fascia asteroidale debba essere stato molto piccolo.

Le simulazioni numeriche per le famiglie hanno suggerito due conclusioni, *nessuna delle quali trova riscontro nelle osservazioni*:

- 1) i membri di una famiglia dovrebbero essere frammenti piccoli;
- 2) la dispersione dei parametri orbitali (semiasse maggiore a , eccentricità e) intorno alla media deve essere molto contenuta.

Sono stati invece individuati oggetti piuttosto grandi in parecchie famiglie, e la dispersione orbitale dei membri risulta molto più ampia di quanto previsto; ciò indica che la distribuzione delle velocità dei frammenti osservati è più elevata di quella risultante dalle simulazioni.

Per riconciliare la teoria con le osservazioni si sono formulate diverse ipotesi. Il mancato verificarsi della conclusione 2) potrebbe essere spiegato aumentando la massa dell'asteroide progenitore, oppure tenendo conto degli effetti dinamici come le risonanze orbitali, che tenderebbero ad allargare la dispersione teorica; per la 1) si potrebbe ipotizzare la riaccumulazione di molti frammenti in uno o più *rubble piles*.

Nella ricostruzione della storia delle famiglie restano ancora aperte due possibilità: nel primo caso le famiglie che vediamo oggi non sarebbero il semplice risultato di impatti catastrofici, ma avrebbero subito un ulteriore processo di evoluzione. Se questo è vero, il numero attuale delle famiglie e le loro caratteristiche non ci sarebbero di grande aiuto nella determinazione della massa iniziale della fascia principale, alla nascita del Sistema Solare (4,55 miliardi di anni fa). L'alternativa a questa ipotesi è che le simulazioni numeriche diano risultati sbagliati perché troppo sensibili agli errori di arrotondamento e alle approssimazioni del modello fisico in esse implementato; in tal caso la situazione sarebbe anche peggiore, perché perderebbe di valore la conferma del limite di 2 ore sul periodo degli asteroidi e, soprattutto, non sapremmo come modellizzare i meccanismi di craterizzazione ed evoluzione dei corpi della fascia principale. Occorrerebbe insomma rivedere la fisica dell'intero processo.

Un fatto che sta emergendo con sempre maggiore evidenza è questo: i processi di frammentazione *non sono privi di memoria, anzi dipendono pesantemente dalla storia precedente*. Poiché disponiamo solo di informazioni indirette sul passato della fascia degli asteroidi, è facile comprendere quanto l'analisi del problema sia ardua.

Un'analoga situazione ambivalente si ritrova nella questione della struttura interna degli asteroidi, dove non siamo ancora in grado di discriminare tra due possibili scenari, che per comodità chiameremo A e B:

- A) gran parte degli asteroidi piccoli (~ 1 km) sono oggi *rubble piles*, di bassa densità e facili da distruggere – anzi, *già* distrutti – ma difficili da disperdere definitivamente;
- B) gran parte degli asteroidi piccoli (~ 1 km) sono rocce compatte, di alta densità e difficili da distruggere per l'alto grado di coesione interna.

Solo l'acquisizione di nuovi ulteriori dati potrà consentirci di risolvere la questione.

5.5 – EVOLUZIONE DINAMICA DEGLI ASTEROIDI

Siamo abituati a pensare che l'orbita di un pianeta, e quindi anche di un asteroide, sia sempre la stessa nel tempo, come stabilito dalle leggi di Keplero. In realtà tali leggi sono valide solo se le masse in gioco (quelle del Sole e del corpo planetario) si considerano puntiformi e se si ignorano le perturbazioni degli altri corpi e le forze “non gravitazionali” (attriti, perdita di massa, interazione con la radiazione solare, eccetera).

Queste approssimazioni possono farci sbagliare di molto stime e previsioni, già nel breve periodo: un esempio lampante è rappresentato dalle comete.

Nel lungo periodo le leggi di Keplero non sono valide per alcun corpo planetario. Le orbite dei pianeti oscillano e si modificano nel tempo (anche dopo la complessa fase che segue la formazione). Gli effetti mareali influenzano il moto e le proprietà rotazionali dei satelliti dei pianeti maggiori. Per i corpi minori la vita è ancora più complicata: le perturbazioni planetarie alterano nel tempo la loro orbita come succede ai pianeti maggiori, ma esistono situazioni particolari.

5.5.1 – Le risonanze

Se guardiamo la distribuzione delle orbite degli asteroidi, per esempio nel piano “ $a - sen i$ ” o “ $a - e$ ” (per a si intende il semiasse maggiore dell'orbita, i è l'inclinazione ed e l'eccentricità) si notano delle concentrazioni (famiglie) e anche delle zone spopolate (*lacune di Kirkwood*).

Nella figura 5.9, in alto, le lacune sono indicate con una frazione (3/1, per es.). Si tratta delle cosiddette *risonanze di moto medio*, cioè di orbite per le quali il periodo è una frazione semplice (per esempio 1/3) di quello di Giove.

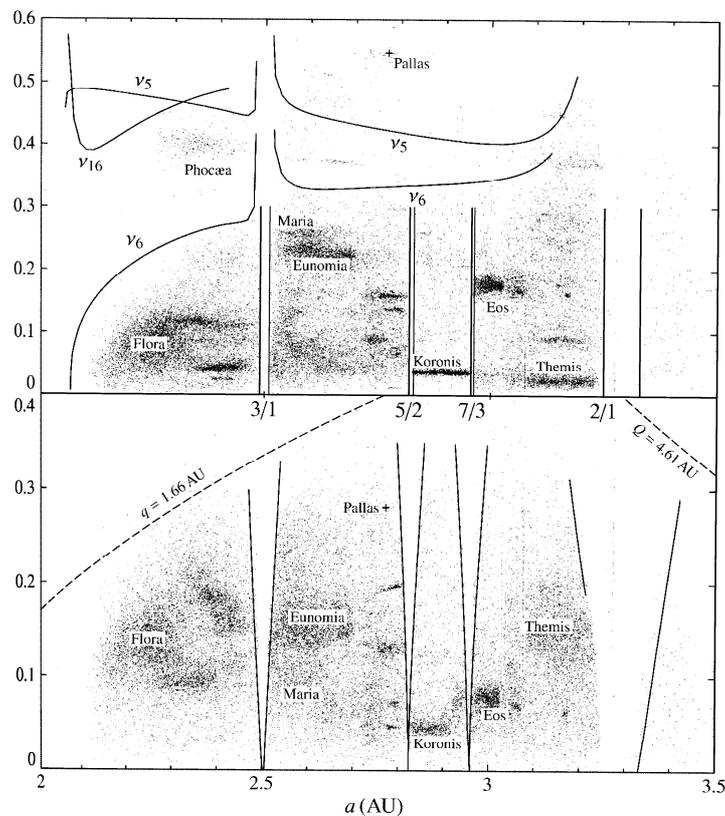


Fig. 5.9 – Distribuzione degli asteroidi

Orbite di questo tipo sono soggette a perturbazioni planetarie amplificate, che possono cau-

Nel capitolo 7 tratteremo diffusamente degli impatti di asteroidi con la Terra.



Fig. 5.11 – Veduta aerea del cratere Manicouagan, in Canada. Questa struttura circolare ha un diametro di circa 100 km e l'evento che l'ha originata risale a 215 milioni di anni fa

Studi fisici

La ricerca delle strategie di mitigazione rende particolarmente interessanti anche gli studi sulla struttura e composizione dei NEA.

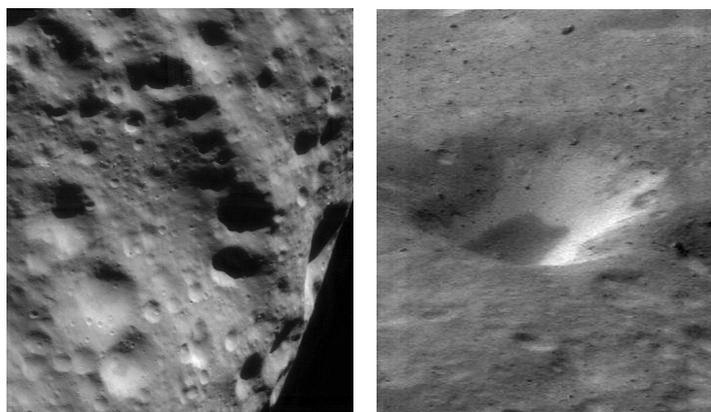


Fig. 5.12 – L'asteroide Eros

Gli studi possono essere fatti con osservazioni da terra (mediante telescopi o radar); data la occasionale vicinanza ci si può spingere anche a oggetti di decine o centinaia di metri. O dallo spazio (come la missione NEAR).

Gli studi da terra, oltre a darci interessanti informazioni generali (periodi di rotazione, forme, ecc.), hanno anche permesso di approfondire la tematica relativa alla composizione e alle caratteristiche superficiali. Si possono collegare ora le meteoriti, i NEA, gli asteroidi di Fascia Principale. Il quadro che ne emerge è complesso, anche per un importante effetto di alterazione superficiale conosciuto come *space weathering* (“invecchiamento” spaziale).

L'origine dei NEA/NEO

Abbiamo già detto che nella fascia principale esistono orbite instabili che portano alla immissione nella zona dei NEA. Anche dalle zone esterne (comete gioviane, per esempio) è possibile avere un apporto di oggetti, ma meno rilevante. Da qui la doppia denominazione NEA/NEO.

Sembrerebbe tutto chiaro, ma non è così. Studi dinamici ci dicono che molti NEA hanno vita

breve: cadranno sul Sole o sui pianeti interni nel giro di circa 10 milioni di anni. Quindi i NEA che oggi osserviamo devono essere arrivati piuttosto di recente, almeno in senso astronomico. Ma quelli che erano nati nelle risonanze hanno avuto miliardi di anni per arrivare, e non ci vuole tanto per il viaggio. E la formazione di nuovi oggetti per collisione non basta: dovremmo avere molte famiglie vicino alle risonanze, e non è così.

Il problema è stato probabilmente risolto con l'introduzione dell'effetto *Yarkovsky*. Tale effetto era stato teorizzato molti anni fa ed è stato recentemente riscoperto e applicato all'evoluzione degli asteroidi. Esso consiste nello scambio di quantità di moto tra Sole e corpo orbitante, dovuto alla ritardata riemissione del calore solare da parte di un oggetto rotante.

L'effetto risultante è quello di trasferire quantità di moto ai corpi in rotazione *diretta*, cioè che ruotano su se stessi in senso antiorario, facendoli evolvere verso l'esterno; il viceversa accade a i corpi in rotazione *retrograda*, cioè che ruotano su se stessi in senso orario. Questi ultimi possono così diventare col tempo dei NEA.

La radiazione solare, massima a "mezzogiorno", viene assorbita dal corpo celeste che a causa della sua rotazione la riemette più tardi, nel "pomeriggio". In questo modo viene prodotta sull'asteroide una spinta tipo razzo, questa, combinata con il moto intorno al Sole, ha l'effetto di rallentare il corpo e quindi avvicinarlo al Sole, se il loro moto di rotazione è retrogrado, viceversa nel caso di moto diretto.

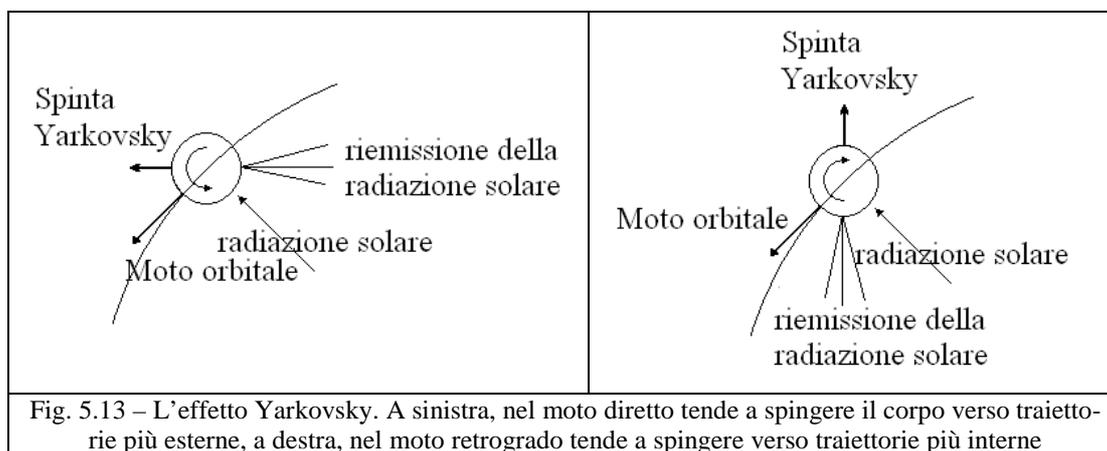


Fig. 5.13 – L'effetto Yarkovsky. A sinistra, nel moto diretto tende a spingere il corpo verso traiettorie più esterne, a destra, nel moto retrogrado tende a spingere verso traiettorie più interne

Il meccanismo è abbastanza efficiente per oggetti piccoli (da 1 a 10 km), e permette di ripopolare progressivamente le zone di risonanza, che restano comunque vuote perché da lì parte il viaggio verso le altre zone del Sistema Solare, ed in particolare verso i NEA.

Recentemente si è avuta una prima misurazione sperimentale dell'effetto Yarkovsky, e altre conferme sembrano venire dalle caratteristiche delle famiglie e dall'orientazione degli assi di rotazione dei NEA, che sono in prevalenza retrogradi.

GLI OGGETTI TRANS-NETTUNIANI

6.1 – INTRODUZIONE

Negli ultimi vent'anni è diventata sempre più evidente l'esistenza di una fascia esterna di corpi minori di grande importanza, situati oltre l'orbita di Nettuno e per questo motivo chiamati *oggetti trans-nettuniani* (TNO).

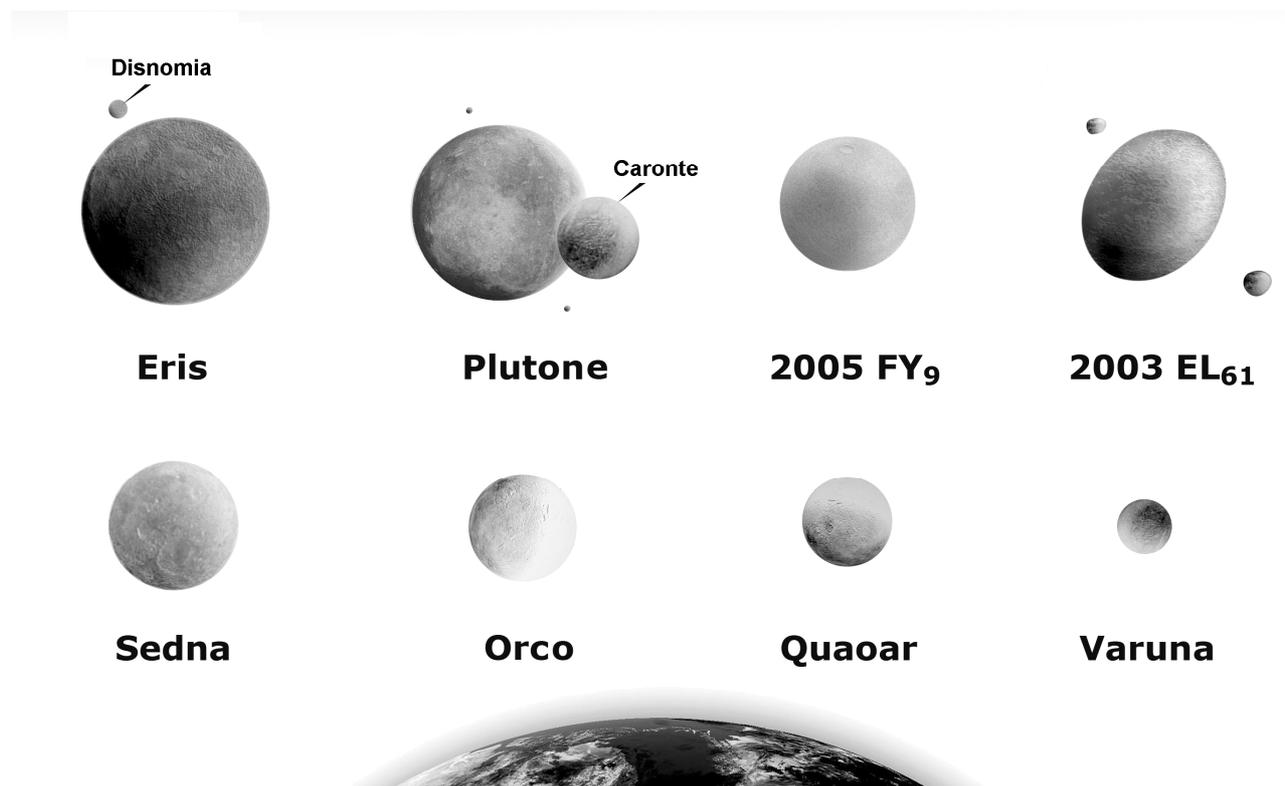


Fig. 6.1 – I TNO di maggiori dimensioni confrontati con la Terra (fonte Wikipedia).

Sotto questa denominazione si comprendono varie classi di oggetti: i *Plutini*, la fascia (o cintura) di Kuiper, il disco diffuso e – più esterna di tutte, a segnare i confini del Sistema Solare – la nube di Oort.

Alcuni studiosi avevano precorso i tempi: già Ernst Öpik nel 1932 aveva suggerito l'esistenza di una nube di materiale tutt'intorno al Sistema Solare. Successivamente l'australiano Edgeworth (1943) e l'olandese Oort (1950) avevano teorizzato l'esistenza delle strutture oggi note come fascia di Edgeworth-Kuiper e nube di Oort.

Lo stimolo per una seria ricerca osservativa non giunse fino al 1980, quando simulazioni numeriche per la regione al di là dell'orbita di Nettuno – eseguite nel tentativo di ricostruire la formazione dei pianeti giganti – fornirono risultati che suggerivano la presenza di una notevole quantità di massa nel Sistema Solare esterno.

È bene notare che i TNO occupano la regione di gran lunga più vasta del Sistema Solare: si ritiene infatti che la nube di Oort raggiunga i limiti dell'eliosfera, cioè la regione in cui la gravità del Sole è dominante, di raggio pari a circa 2 anni luce (più o meno 20 000 miliardi di chilometri) dal Sole: 2 anni luce sono circa 130 000 UA.

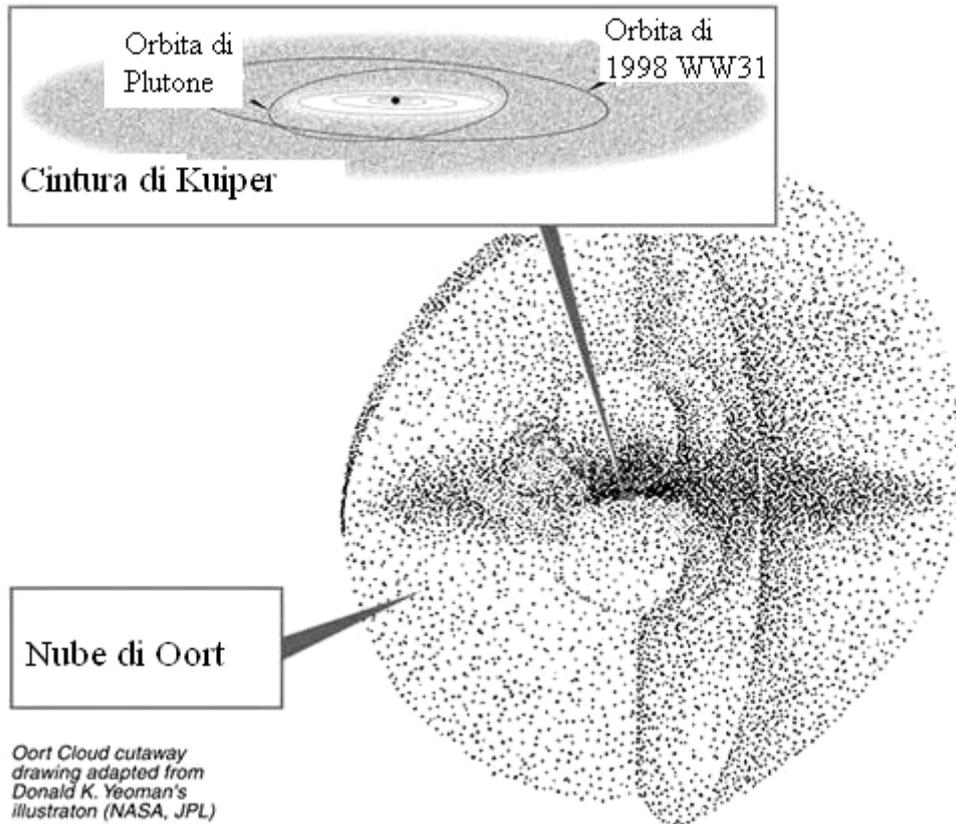


Fig. 6.2 – La cintura di Kuiper e la nube di Oort.

Nel passato soltanto le comete potevano fornire qualche informazione utile sul Sistema Solare esterno, e anch'esse con molte limitazioni; oggi però siamo entrati in una nuova fase. Le scoperte di oggetti in questa zona sono appena cominciate, e la maggior parte di essi è stata individuata a distanze che non superano ancora le 100 UA: questa regione ristretta ha comunque già un volume 36 volte superiore a quello del Sistema Solare fino all'orbita di Nettuno. In questa vastità il numero dei corpi deve essere enorme, con oggetti di massa anche molto superiore a quella degli asteroidi della fascia principale; per comprendere ciò basterà ricordare che i modelli chimici della nebulosa protosolare (la struttura che ha dato origine al Sole e ai pianeti) prevedono che una parte importante della sua massa fosse costituita da ghiacci di vario tipo (acqua, monossido di carbonio, anidride carbonica, ammoniacca, metano, azoto e altri composti, tutti allo stato solido per via delle bassissime temperature), che sono proprio i costituenti più probabili dei TNO. Anche ammettendo un impoverimento della popolazione originaria nel corso del tempo (come vedremo, vi sono motivi per supporlo), è ragionevole pensare che la massa complessiva di tali oggetti sia molto superiore alla massa terrestre; inoltre devono esistere corpi di grosse dimensioni – come Plutone o di più^[61] – perché il grande spazio a disposizione e le velocità più basse rispetto alla fascia degli asteroidi (in media 5 volte inferiori) rendono meno efficiente l'evoluzione collisionale della struttura, con eventi meno distruttivi. L'esistenza di corpi piuttosto grandi è suggerita, almeno per quanto riguarda il passato, anche dall'attuale inclinazione dell'asse di Urano (98°), indizio di un impatto catastrofico.

È dunque logico attendersi che i TNO siano meno evoluti degli asteroidi della fascia principale dal punto di vista collisionale e quindi, in un certo senso, più “giovani”.

^[61] Già dalle prime osservazioni era evidente che Eris aveva un diametro maggiore di quello di Plutone e in un articolo apparso su Science nel giugno 2007 viene confermato che la sua massa è maggiore del 27% rispetto a quella dell'ex no-no pianeta del Sistema Solare.

6.2 – CAUSE DI UNA TARDIVA SCOPERTA

La regione occupata dai TNO contiene, a quanto pare, molta più materia rispetto alla fascia principale degli asteroidi; tuttavia la loro scoperta è molto recente, mentre quella del primo asteroide (Cerere) risale al 1801. Come mai? Cerchiamo di comprendere la situazione un po' più in dettaglio. Un pianeta è un corpo che assorbe la luce solare e la riemette: per questo appare brillante. La sua distanza dal Sole è piccola rispetto alle distanze stellari e quindi il suo moto sulla sfera celeste è molto più rapido di quello delle stelle (che è difficilmente osservabile). Un altro fatto importante è che, se il pianeta orbita a distanza R_1 dal Sole, riceve una quantità di luce inversamente proporzionale al quadrato di R_1 : naturalmente la luce ricevuta dipende anche dalle dimensioni del pianeta. Essa viene poi in parte riflessa, ed è quindi simile a quella solare anche come "colore": il pianeta emette soprattutto nel visibile e nella banda infrarossa. La frazione di luce riflessa prende il nome di *albedo*: è uguale a 1 per uno specchio ideale, mentre per i pianeti è decisamente minore di 1 (circa 0,64 per Venere, 0,39 per la Terra, 0,15 per Marte e solo 0,07 per la Luna).

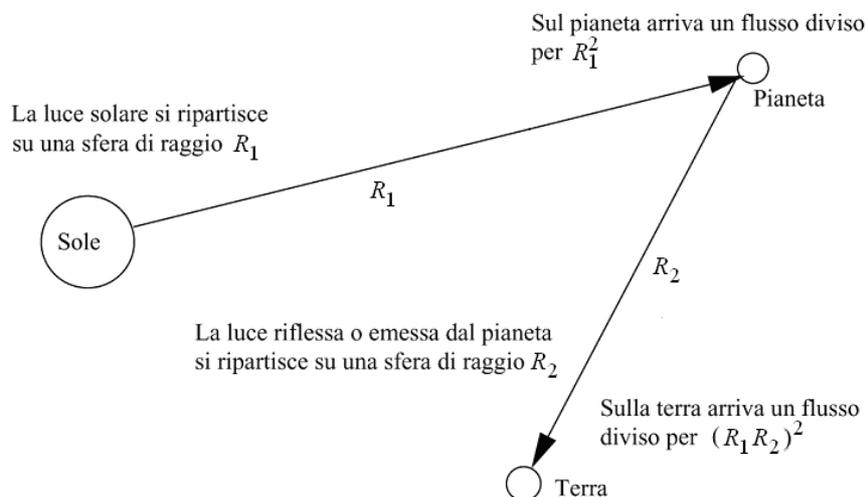


Fig. 6.3 – Luminosità di un corpo planetario

Non tutti i colori vengono riflessi con la stessa efficienza; i pianeti assumono, nel visibile, una colorazione che dipende dalla composizione della superficie o dell'atmosfera, e che non ha niente a che vedere con la temperatura superficiale (Marte è rosso, ma ben più caldo di Nettuno, che è invece azzurro: per le stelle il discorso cambia!). La luce non riflessa viene assorbita, riscalda il pianeta (non necessariamente in modo uniforme) ed è poi riemessa nell'infrarosso. Tale emissione definisce la temperatura superficiale del pianeta, che dipende dalla distanza dal Sole, dall'albedo e dall'atmosfera (effetto serra).

La luce del pianeta, infine, viene attenuata dalla sua distanza R_2 dalla Terra, ancora con una dipendenza proporzionale a $1/R_2^2$. Siccome un pianeta nella zona esterna del Sistema Solare è quasi ugualmente lontano dal Sole quanto dalla Terra (R_1 è circa uguale a R_2) la sua luminosità decresce all'incirca con la *quarta* potenza della sua distanza da noi.

Tutto questo insieme di cause rende il Sistema Solare esterno piuttosto buio: per esempio se la Terra fosse a una distanza di 100 UA, sarebbe vista dal Sole 100 milioni di volte meno luminosa che se si trovasse a 1 UA, con un incremento di ben 20 magnitudini.

Al giorno d'oggi, comunque, telescopi e strumenti di acquisizione moderni permettono di misurare sorgenti molto deboli. Un corpo planetario, anche di dimensioni non eccezionali, può essere visto a grande distanza nel visibile e nell'infrarosso. Il vero problema è accorgersi che non si trat-

ta di una delle tante stelle: non siamo in grado di studiare in dettaglio tutte le sorgenti luminose nel cielo.

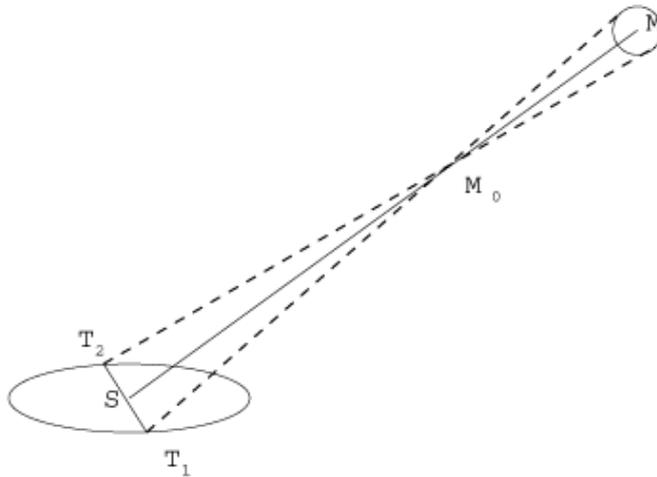


Fig. 6.4 – La parallasse

I corpi minori hanno sempre un aspetto puntiforme e l'unica possibilità è di rilevarne il moto apparente sulla sfera celeste. Questo moto dovuto a due diverse cause: la prima è lo spostamento del corpo lungo la sua orbita intorno al Sole (*moto proprio*), la seconda è invece il moto orbitale della Terra, o *parallasse*: noi abbiamo l'illusione di stare fermi e attribuiamo il nostro moto all'oggetto, che appare spostarsi solo perché è la Terra a muoversi intorno al Sole.



Fig. 6.5 – In alto a sinistra la “strisciata” prodotta dall'asteroide 2004 XP14 ripreso con un tempo di esposizione di 20 s.

Per pianeti abbastanza vicini i due effetti sono dello stesso ordine di grandezza, mentre per corpi lontani dal Sole la parallasse diviene decisamente dominante.

Quando il corpo da scoprire è vicino il moto può anche essere rivelato da una strisciata su una immagine astronomica. Per corpi più lontani si devono confrontare due o più immagini della stessa zona di cielo prese a distanza di tempo (metodo del *blinking*^[62]). Più immagini prese nella stessa notte sono sufficienti a scoprire un corpo planetario fino a distanze di alcune decine di UA.

^[62] Per un esempio vedi la figura 1.4 a pagina 8

Per distanze più grandi, dell'ordine di 100 UA, il moto apparente nell'arco di una notte diventa di pochi secondi d'arco e quindi molto difficile da rilevare; la scoperta avviene confrontando immagini prese in notti diverse, e la conferma arriva talvolta dopo alcuni mesi.

Il moto apparente dell'astro permette di ricostruirne l'orbita, e quindi di valutarne correttamente distanza: da questa, sulla base della luminosità apparente, è possibile dedurre le dimensioni del corpo.

Le due principali differenze nella scoperta di un asteroide della fascia principale e di un TNO stanno nella molto maggiore distanza del secondo, che ha quindi luminosità molto minore, e nel suo moto apparente che è molto più lento. Ciò giustifica lo sfasamento temporale nella conferma degli avvistamenti e anche come mai un oggetto come Eris, addirittura più grande di Plutone, sia stato identificato dopo parecchio tempo.

Proprio la scoperta di Eris ha causato un certo scompiglio nella comunità scientifica. La conferma che si trattava di un oggetto più grande di Plutone ha posto i planetologi di fronte a un dilemma: promuovere Eris a decimo pianeta oppure escluderlo, ma al costo di declassare il più piccolo Plutone? È stata decretata la "retrocessione" di Plutone e il suo inserimento, insieme a Eris e Cerere (e forse con un altro gruppo di potenziali candidati, riportati nel capitolo 1) nella nuova classe dei pianeti nani.

È alquanto probabile che nei prossimi anni vengano scoperti oggetti anche più grandi di Eris: oggi, comunque, gli scienziati ritengono che non si scopriranno nuovi veri pianeti da aggiungere alla lista degli otto attuali.

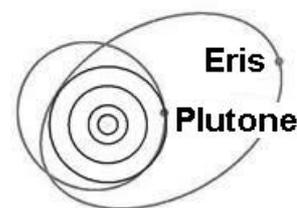


Fig. 6.6 – L'orbita di Eris

6.3 – I PLUTINI

La distribuzione delle orbite dei TNO presenta caratteristiche meno tormentate rispetto alla fascia principale degli asteroidi, ma è comunque piuttosto complessa. Zone di stabilità e instabilità coesistono l'una accanto all'altra, compenetrandosi in modo articolato con un andamento tipico della geometria frattale. Anche nella dinamica del Sistema Solare esterno si manifestano le risonanze, ma il loro effetto è meno marcato perché il pianeta più vicino, Nettuno, è quasi venti volte meno massiccio del signore degli asteroidi, Giove. L'unica eccezione al quadro è rappresentata dal gruppo di oggetti intrappolati nella risonanza 3/2 con Nettuno, che comprende anche il sistema Plutone–Caronte.

L'inserimento in questo gruppo rappresenta un meccanismo di protezione. Gli oggetti con orbite fortemente eccentriche^[1] rischiano di urtare Nettuno e di finire distrutti; quelli con un periodo risonante ripercorrono dopo due giri la stessa orbita e, se non urtano subito Nettuno intorno al perielio, si salvano per sempre. Tale classe di TNO prende il nome di *Plutini*, e Plutone ne rappresenta il membro più importante.

Un'ipotesi attendibile per l'origine del sistema Plutone–Caronte è che esso sia nato su un'orbita di bassa eccentricità, successivamente incrementata fino al valore odierno (0,2488) dalla progressiva migrazione di Nettuno verso l'esterno, operata dallo scambio di momento angolare^[2] tra

^[1] L'*eccentricità* di un'orbita ellittica, è già stata definita nel capitolo introduttivo di questo libro: dal punto di vista analitico essa può anche essere definita come il rapporto c/a , dove c è la distanza del Sole dal centro dell'ellisse (il Sole è sempre in uno dei fuochi, mai al centro!) e a rappresenta il semiasse maggiore dell'orbita, ovvero metà dell'asse maggiore dell'ellisse (dove si trovano i fuochi della curva).

^[2] *Momento angolare* è un anglicismo (ma ormai di uso comune) per l'italiano *momento della quantità di moto*. Si tratta di un vettore il cui modulo è dato dall'espressione $m \cdot v \cdot r \cdot \sin\theta$, dove m è la massa del corpo, v la sua velocità, r la sua posizione e θ l'angolo tra i vettori posizione e velocità. Per *momento angolare specifico* si intende invece il momento angolare per unità di massa, cioè il prodotto $v \cdot r \cdot \sin\theta$. Il momento angolare è una grandezza fisica fondamentale nello

questo pianeta e i progenitori dei TNO. L'intrappolamento della coppia Plutone–Caronte nella risonanza 3/2 ne ha garantito la sopravvivenza, e un destino simile è toccato anche al resto dei Plutini. L'entità numerica di questo gruppo è assai difficile da stabilire, perché il meccanismo di cattura in risonanza è assai difficile da analizzare matematicamente: comunque quasi tutti i Plutini hanno orbite con eccentricità abbastanza elevata, il che sembra confermare il modello descritto per l'origine di Plutone.

Ma perché l'orbita di Nettuno avrebbe dovuto allargarsi verso l'esterno?

Questo fatto, per nulla ovvio, non era stato previsto teoricamente, ma è comparso per la prima volta come risultato delle simulazioni numeriche e solo dopo un certo lavoro teorico è stato riconosciuto come attendibile e non un artefatto del lavoro al computer; la sua spiegazione merita di essere riportata come esempio tipico di ragionamento fisico (sia pure a posteriori).

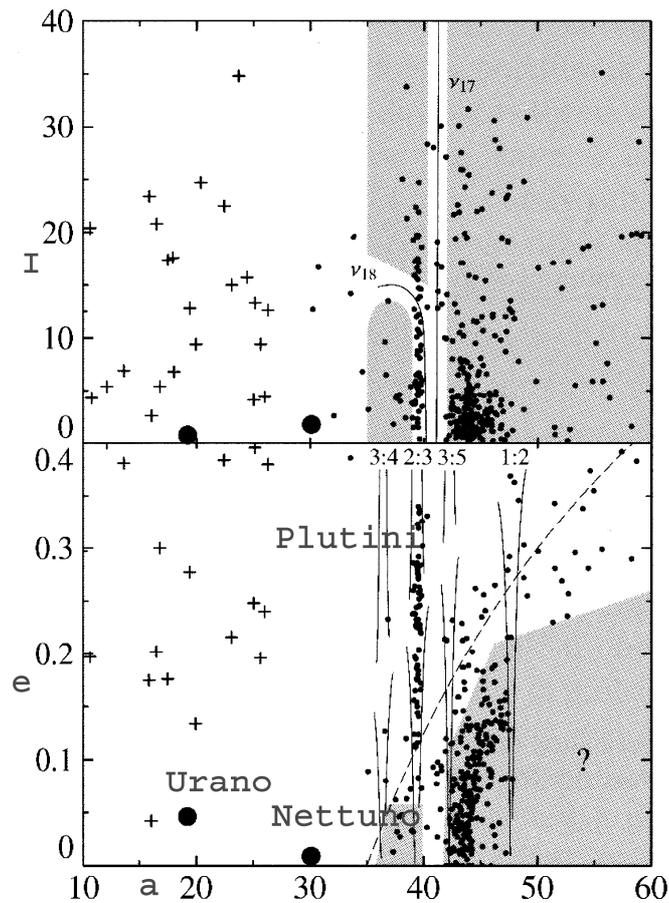


Fig. 6.6 – Distribuzione nello spazio degli elementi orbitali

Una comoda e ragionevole ipotesi di partenza è che il momento angolare specifico medio di Nettuno sia inizialmente dello stesso ordine di grandezza di quello dei TNO primitivi. Col passare del tempo si verifica un processo di accrescimento tra questi ultimi, simile a quello tra gli asteroidi

studio dei moti planetari (e in generale in molti ambiti della fisica). Per un oggetto in orbita circolare intorno al Sole aumenta con la distanza. Infatti per tali orbite la velocità è $v = \sqrt{\frac{2GM_s}{r}}$, dove M_s è la massa del Sole e r il raggio

dell'orbita. Allora è facile vedere che il momento angolare di un oggetto m è $m \cdot v \cdot r \cdot \sin\theta = m \sqrt{\frac{2GM_s}{r}} \cdot r \sin\theta = m \sin\theta \sqrt{2GM_s r}$ e il valore di questa espressione aumenta al crescere di r .

ma parecchio più lento (sia per le velocità più basse, sia per l'enorme spazio a disposizione). In media si ha lo stesso numero di TNO deviati verso l'interno o verso l'esterno del Sistema Solare, quindi il momento angolare complessivo dei TNO rimane più o meno lo stesso, e così anche quello di Nettuno (che quindi in questa fase non si sposta).

La simmetria si rompe quando andiamo a considerare il destino successivo dei frammenti deviati. I TNO diretti verso l'interno del Sistema Solare sono progressivamente convogliati nelle zone di influenza gravitazionale dapprima di Urano, poi di Saturno e infine di Giove; alcuni dei frammenti diretti all'esterno (quelli più veloci) diventano subito membri della nube di Oort, ma la grande maggioranza subisce nuovamente l'influenza gravitazionale di Nettuno che li devia sia verso l'esterno, sia ancora all'interno, dove si aggiungono a quelli già arrivati in precedenza. L'azione di Giove sui TNO è devastante: una piccola parte viene catturata, ma il resto è accelerato oltre il valore della velocità di fuga dal Sistema Solare e raggiunge progressivamente lo spazio interstellare.

Il processo descritto continua indisturbato per milioni di anni, con alcune conseguenze significative:

- a) Giove perde momento angolare a favore dei TNO che espelle dal Sistema Solare;
- b) la popolazione complessiva dei TNO diminuisce al passare del tempo;
- c) la popolazione residua dei TNO che interagiscono con Nettuno tende a diventare sempre più composta da corpi che hanno energia e momento angolare specifici maggiori di quello del pianeta. Nel reciproco scambio di momento angolare Nettuno tende a guadagnare quello che i TNO perdono e si sposta progressivamente verso l'esterno.

Il meccanismo che abbiamo descritto per Nettuno funziona anche per Urano e per Saturno: questi pianeti possono svolgere il ruolo di Nettuno – anche se con minore efficacia – perché più all'interno c'è Giove, ultimo pianeta gigante: quest'ultimo, col tempo, finisce per trasferire momento angolare a Saturno, Urano, Nettuno e ai TNO espulsi, pagando sempre di tasca sua.

Il risultato previsto dopo qualche miliardo di anni è lo spostamento di Nettuno verso l'esterno di circa 9 UA, molto meno per Urano e assai poco per Saturno (più interno e alquanto più massiccio degli altri due): l'orbita di Giove, che invece perde momento angolare, migra verso l'interno. Quest'ultimo spostamento è comunque assai piccolo, per via dell'enorme massa del pianeta.

Nel quadro che abbiamo appena descritto l'idea di una consistente perdita di massa dalla regione dei TNO è inevitabile, e questo è il motivo per cui si attribuisce alla massa iniziale un valore molto più alto delle stime attuali; naturalmente analisi quantitative di questo processo richiedono modelli al calcolatore estremamente raffinati (il cosiddetto problema a molti corpi), che non sono ancora disponibili.

6.4 – DAI CENTAURI ALLA NUBE DI OORT

6.4.1 – I Centauri

Come gli asteroidi della fascia principale, anche i TNO possiedono una sorta di "appendice" interna: il suo membro più conosciuto, 2060 Chirone, è stato dapprima classificato come asteroide (come testimonia il numero) e solo di recente le sue affinità con i nuclei cometari gli hanno guadagnato l'inserimento in un nuovo gruppo, quello dei *Centauri*.

La riclassificazione di Chirone si è resa necessaria dopo la scoperta di alcune anomalie orbitali che non erano riconducibili all'azione di corpi esterni vicini. Un accurato studio ha dimostrato che la causa era non-gravitazionale: Chirone è un corpo attivo, nel senso che dal suo interno fuoriescono dei gas, e il risultato è quello di dar luogo a un "effetto jet" che modifica la traiettoria

dell'oggetto. In questo aspetto Chirone è del tutto simile a un nucleo cometario, e probabilmente è stato una vera e propria cometa finché non ha cominciato ad esaurire le riserve interne di elementi volatili.

Benché interni all'orbita di Nettuno, i Centauri sono considerati parte dei TNO, perché ritenuti molto più simili ad essi che agli asteroidi della fascia principale dal punto di vista della composizione chimica: questa è ricca di elementi volatili, ossia "ghiaccio" di vari tipi (anche se il ghiaccio d'acqua è predominante), poi molti composti organici anche complessi, infine una parte di materiale roccioso e poco o niente elementi metallici. Questa composizione è caratteristica delle comete, che infatti hanno dei TNO come progenitori; tra gli asteroidi dominano invece le componenti "rocciose" come i silicati, e ne esiste una classe assai ricca in ferro e nichel.

6.4.2 – La fascia di Edgeworth–Kuiper e il disco diffuso

Queste due strutture si estendono appena oltre Nettuno (a circa 30 UA dal Sole) fino a 50 UA, anche se il limite esterno è ancora piuttosto incerto. Il primo membro della fascia è stato scoperto nel 1992 e oggi si conoscono più di 1000 oggetti, numero in costante aumento.

La popolazione dei corpi che popolano questa regione appare distribuita in modo irregolare. Un gruppo di oggetti dalle orbite inclinate e piuttosto eccentriche si estende fino alla distanza di 42 UA: oltre questo limite sono più frequenti orbite poco eccentriche e di bassa inclinazione.

Tale dicotomia ha fatto pensare ad una diversa origine: infatti, mentre le orbite quasi circolari dovrebbero appartenere a corpi nati nella stessa zona in cui si trovano attualmente (in pratica, i costituenti originali della fascia di Kuiper), quelle eccentriche ed inclinate sono state attribuite a corpi nati appena oltre l'orbita di Urano e successivamente espulsi oltre Nettuno dalle interazioni gravitazionali con esso. A quest'ultima classe di oggetti è stato dato il nome di *disco diffuso*: l'unico membro accertato del gruppo sembra essere l'oggetto 1996 TL66, la cui orbita dovrebbe avere un semiasse maggiore di 85 UA, con perielio a 35 UA, eccentricità 0,59 e inclinazione 24°. Questi dati orbitali (ancora da perfezionare) sono compatibili con l'ipotesi che il corpo abbia subito l'influsso gravitazionale destabilizzante di Nettuno.

Nel passato l'esistenza della fascia di Kuiper era stata ipotizzata come serbatoio per le comete a corto periodo (famiglia di Giove). Oggi si ritiene che questo ruolo potrebbe essere meglio svolto dalla popolazione del disco diffuso: dei candidati a far parte di questo gruppo, quattro su cinque hanno orbite con perielio compreso tra 32 e 36 UA.

6.4.3 – La nube di Oort

Tale struttura dovrebbe essere la più lontana dal Sole e conterrebbe la maggior parte della massa dei TNO: le stime sono ancora puramente teoriche e variano da una decina fino a un migliaio di masse terrestri (i valori più bassi sembrano i più attendibili).

Mentre il limite interno resta molto incerto, sembra che la nube giunga fino ai confini estremi del Sistema Solare, dove l'influenza gravitazionale del Sole cede il passo a quella di Alfa Centauri, la stella più vicina a noi.

La storia del popolamento della nube è ancora ignota. Sembra che la maggior parte dei corpi che la compongono sia nata molto più vicino a noi, alla distanza di Urano o Nettuno, e solo in seguito alle perturbazioni gravitazionali dei pianeti giganti (col meccanismo già descritto per Giove) sia stata espulsa nella zona più esterna, dove peraltro non si può certo escludere che esistesse già una popolazione primitiva.

Quasi tutti gli oggetti della nube restano stabili nelle loro lentissime orbite periferiche fin dal tempo della loro formazione o del loro arrivo; perturbazioni occasionali come "maree" gravitazionali galattiche o stelle nane rosse di passaggio possono però inviarli verso il Sistema Solare interno oppure strapparli all'influenza gravitazionale del Sole. Naturalmente è anche possibile che nel corso

dell'interazione alcuni corpi provenienti dall'esterno del Sistema Solare entrino a farne parte incrementando la massa della nube di Oort.

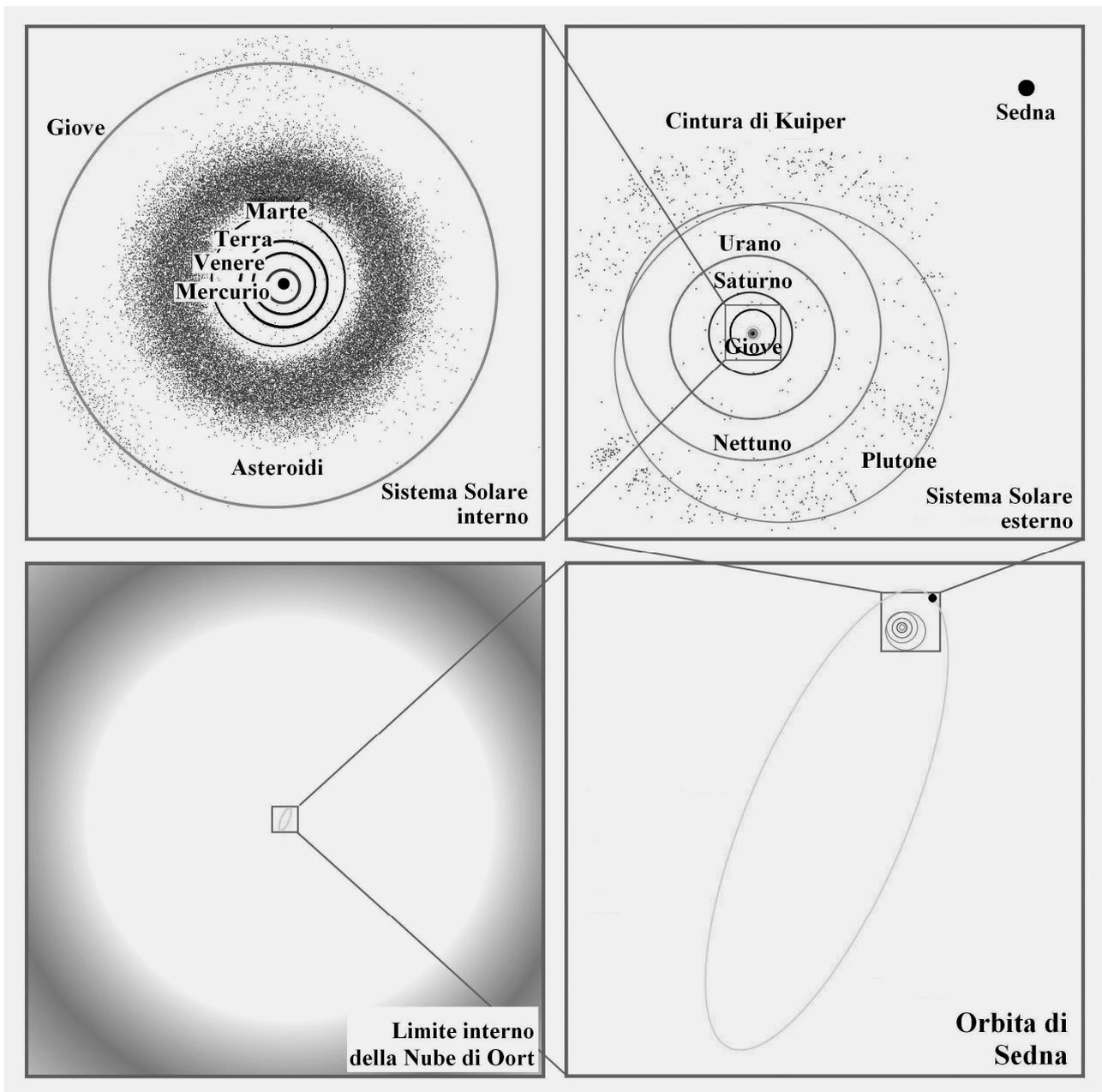


Fig. 6.7 – L'orbita di Sedna.

Se si esclude una parte delle comete che osserviamo – quelle di periodo più lungo – l'unico candidato individuato come possibile membro della nube è 2003 VB12, meglio noto come Sedna. La ragione per questa (provvisoria) attribuzione non è tanto la distanza all'afelio (480 UA), visto che esistono corpi della fascia di Kuiper di orbita eccentrica che raggiungono e superano tale distanza: è piuttosto il perielio a 75–80 UA a stupire, molto più distante del più lontano perielio osservato per un membro della fascia di Kuiper (46,6 UA per l'oggetto 1999 CL119). Potrebbe ancora trattarsi di un oggetto del disco diffuso, ma in questo caso l'orbita è stata modificata molto di più di quanto potrebbe fare un qualsiasi pianeta: appare allora inevitabile invocare l'azione di pianeti non ancora scoperti o quella di forze esterne al Sistema Solare. Piuttosto che dar credito a tali possibilità, oggi si preferisce assegnare Sedna alla zona più interna della nube di Oort, anche se è ovvio che a fronte di eventuali nuovi dati osservativi tale conclusione potrebbe essere smentita anche domani!

6.5 – I PROBLEMI ANCORA APERTI

Il lavoro che resta ancora da svolgere in questa regione del Sistema Solare è enorme, e non soltanto di natura osservativa. Riassumendo la situazione possiamo individuare alcuni punti fondamentali.

- 1) Occorre comprendere a fondo quali sono i limiti che l'insieme delle attuali conoscenze sui TNO pone per i modelli di formazione del Sistema Solare, soprattutto per i parametri fisici della nebulosa protosolare in prossimità del suo limite esterno. Inoltre sarebbe molto interessante fare dei confronti con i dischi circumstellari scoperti negli ultimi anni (per esempio quello della stella Beta Pictoris).
- 2) È di grande importanza classificare correttamente e nel modo più esaustivo possibile la popolazione della fascia di Kuiper e del disco diffuso. Il confronto numerico tra gli oggetti ad alti e bassi valori di eccentricità e inclinazione fornirebbe informazioni preziose sulla storia delle passate migrazioni delle orbite dei pianeti giganti.

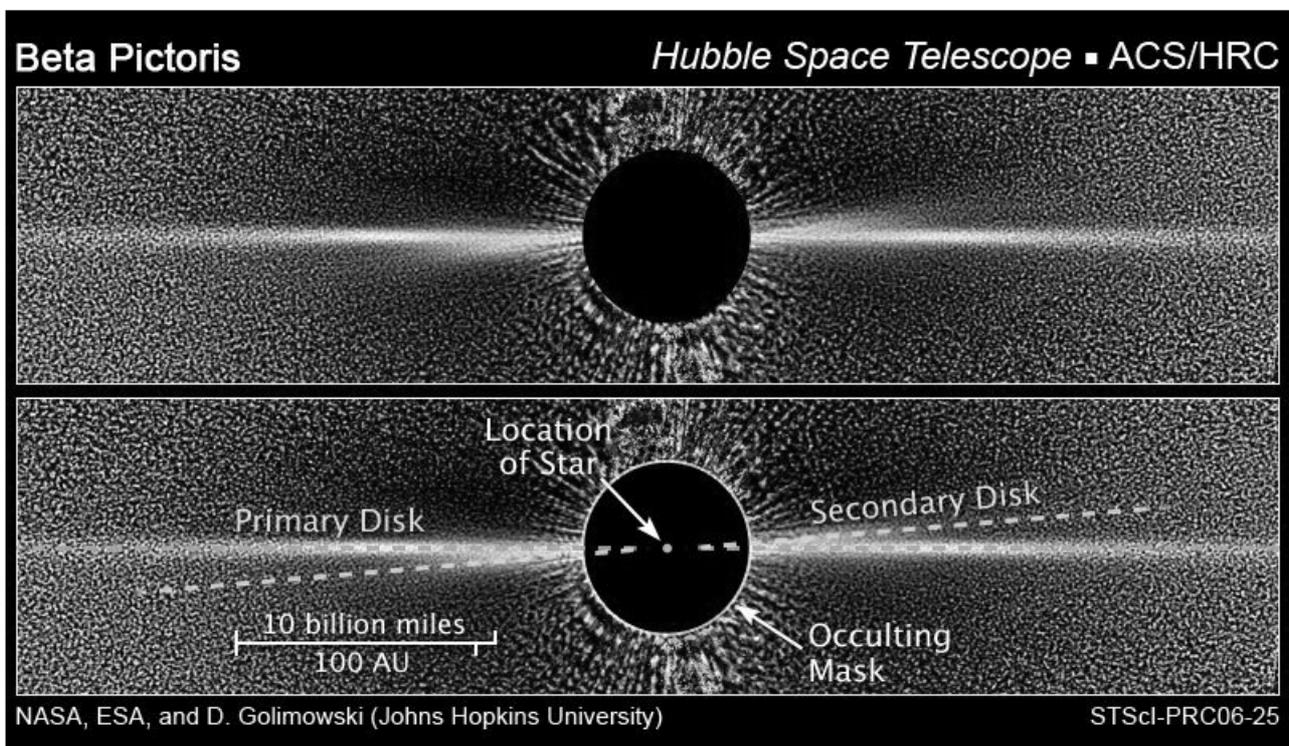


Fig. 6.8 – La stella Beta Pictoris ripresa dal Telescopio Spaziale Hubble.

- 3) Un obiettivo da raggiungere nei prossimi anni è quello di individuare esattamente la zona di origine delle comete a corto periodo e dei Centauri.
- 4) Per gli studiosi è essenziale determinare con una certa precisione la massa iniziale della fascia di Kuiper e, più in generale, di tutta la regione dei TNO (il secondo obiettivo appare oggi davvero ambizioso).
- 5) Mancano ancora informazioni sufficienti sui periodi e le velocità di rotazione dei TNO, che permetterebbero di ricostruire parte della loro evoluzione collisionale. Nello stesso campo di indagine, ci si attendono dati sulla frequenza dei sistemi binari (molto più comuni che tra gli asteroidi

della fascia principale, a quanto sembra) e sull'effettiva esistenza fra i TNO di "famiglie" dinamiche come quelle dei pianetini.

- 6) Per finire, occorre far luce sui legami tra le varie strutture presenti nella regione dei TNO, e in particolare quale sia la relazione tra i corpi della fascia di Kuiper e quelli della nube di Oort.

INCONTRI PERICOLOSI

7.1 – INTRODUZIONE

Come abbiamo detto in precedenza, l'impatto sulla Terra di un asteroide di considerevoli dimensioni può avere conseguenze drammatiche. Un macigno di 20 o 30 metri possiede un'energia dell'ordine del Megaton, paragonabile a una grossa bomba atomica. Gli effetti sono devastanti: la formazione di un cratere comporta la distruzione di tutto quello che c'era prima. Ma i danni possono anche non essere solo locali.

L'energia di un proiettile di un paio di chilometri, che è dell'ordine dei milioni di Megaton, non può essere assorbita solo localmente. Oltre al cratere si hanno fenomeni estesi (maremoti, sollevamento di polvere nell'atmosfera, alterazione del sistema climatico ed eolico ecc.): un evento di questo tipo ha conseguenze globali.



Fig. 7.1 – La distribuzione dei crateri di impatto (in [14])

Eventi di questo tipo sono rari, ma in media la probabilità che ciascuno di noi ha di morire per colpa di un meteorite è simile a quella legata ad un incidente aereo.



Fig. 7.2 – Il cratere Vredefort in Sud Africa, è il più grande che si conosca

I crateri creati dall'impatto dei meteoriti con il suolo terrestre con il passare del tempo e a causa dei mutamenti della stessa superficie, finiscono per apparire come dei normali avvallamenti del terreno: è quindi assai difficile individuarne la vera origine. Fino ad oggi sono stati riconosciuti circa 170 crateri da impatto, con diametri che vanno da circa 10 m fino ai 300 km del cratere Vredefort in Sud Africa.

Uno dei crateri più famosi è il Meteor Crater in Arizona: ha un diametro di circa 1300 m e una profondità di 200 m. Poiché nelle vicinanze sono stati rinvenuti alcuni frammenti meteoritici (di ferro, nichel, platino), si è supposto che questo cratere sia stato prodotto dalla caduta, risalente a circa 50 000 anni or sono, di un bolide di circa 40 m di diametro che nell'esplosione liberò un'energia equivalente a 20 Megaton (circa 1000 volte quella della bomba che distrusse Hiroshima).

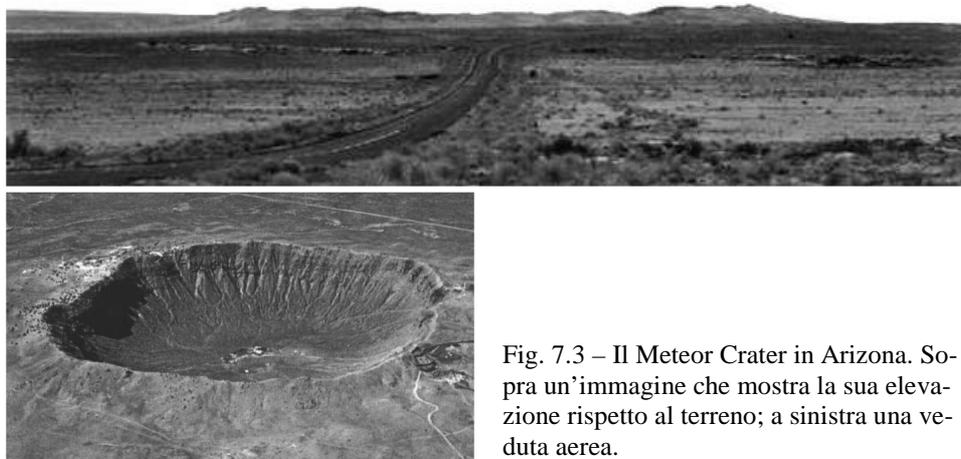


Fig. 7.3 – Il Meteor Crater in Arizona. Sopra un'immagine che mostra la sua elevazione rispetto al terreno; a sinistra una veduta aerea.

In un articolo pubblicato sul numero del 10 marzo 2005 della rivista “Nature”, H. Jay Melosh e Gareth Collins dell'Imperial College di Londra spiegano che il meteorite ferroso che ha scavato il cratere viaggiava molto più lentamente di quanto si ritenesse. Essi affermano che il Meteor Crater è stato il primo cratere terrestre identificato come prodotto dall'impatto di un meteorite, ed è probabilmente il cratere di questo tipo maggiormente studiato. In precedenza si ipotizzava che il meteorite avesse colpito la superficie con una velocità compresa fra 15 e 20 km/s. Melosh e Collins, utilizzando sofisticati modelli matematici, hanno dedotto che circa metà del corpo celeste originale (ben 300 mila tonnellate) si sarebbe frammentato prima di colpire il suolo. L'altra metà sarebbe rimasta intatta e avrebbe colpito il terreno a una velocità di circa 12 km al secondo, troppo bassa per fondere la quantità di roccia precedentemente ipotizzata.

Un altro impatto molto importante si pensa sia avvenuto circa 65 milioni di anni fa e avrebbe causato un'estinzione di massa^[63]. Il meteorite avrebbe colpito la penisola dello Yucatan, in Mes-

^[63] Un'estinzione di massa è un evento durante il quale un grande numero di specie viventi si estingue in un tempo “breve” dal punto di vista geologico. Il tasso normale di estinzione di una specie va da circa due a cinque famiglie biologiche ogni milione di anni. Da quando esiste la vita sulla Terra questo meccanismo è stato interrotto da almeno sei eventi maggiori chiamati appunto estinzioni di massa.

- Precambriano (circa 550 milioni di anni fa): una delle maggiori estinzioni di massa, forse la più grande, di cui abbiamo prove paleontologiche.
- Ordoviciano superiore (circa 444 milioni di anni fa): si stima che l'estinzione abbia riguardato circa l'85% delle specie.
- Tardo Devoniano (circa 375 milioni di anni fa): l'estinzione interessò circa l'82% delle specie viventi.

sico, e prodotto un cratere dal diametro di 300 km^[64], profondo 900 m, con epicentro localizzato approssimativamente sotto il villaggio di Puerto Chicxulub, presso Merida. Il diametro stimato del meteoroido è di circa 10 km (paragonabile per dimensioni a Deimos, uno dei satelliti di Marte): esso avrebbe prodotto una detonazione di una potenza esplosiva dell'ordine di 10^{23} J di energia^[65].

L'impatto provocò uno *tsunami* che si sparse a cerchi concentrici in tutte le direzioni. L'emissione di polvere e particelle provocò importanti cambiamenti climatici a livello planetario e probabilmente la superficie della Terra fu totalmente coperta da una nube di polvere per molti anni. La nube di polveri provocò quasi certamente una diminuzione dell'insolazione e quindi l'estinzione di diverse specie vegetali che, con l'interruzione della normale catena alimentare, portò alla sparizione di molte specie animali. Sopravvisse solo chi si seppe adattare alla nuova situazione.

La localizzazione del cratere fu resa possibile grazie all'analisi di immagini riprese dallo spazio. La sua esistenza concorda con la teoria proposta nel 1980 da Luis e Walter Alvarez (padre e figlio, fisico l'uno e geologo l'altro), secondo la quale l'estinzione dei dinosauri è contemporanea allo strato geologico noto come *K-T boundary*^[66], che poteva essere stato causato dall'impatto di un meteoroido di proporzioni quasi planetesimali.

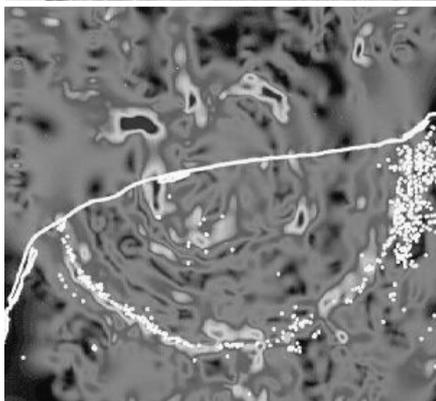


Fig. 7.4 – La penisola dello Yucatan: il cratere è in alto a sinistra.

Nell'immagine a sinistra i puntini bianchi sono "cenotes" (che in spagnolo significa pozzi) che formano un anello quasi perfetto di 180 km di diametro centrato sulla località di Chicxulub. (fonte NASA/JPL)

-
- Permiano–Triassico (circa 251 milioni di anni fa). Si tratta dell'estinzione di massa più catastrofica di tutti i tempi: circa il 96% delle specie animali marine si estinse e complessivamente scomparve il 50% delle Famiglie animali esistenti.
 - Triassico–Giurassico (circa 180 milioni di anni fa): si estinsero circa il 76% delle specie viventi.
 - Cretaceo–Terziario (circa 65 milioni di anni fa): è stimata l'estinzione di circa il 76% di tutte le specie viventi.

^[64] In effetti quello che si vede è un anello di 180 km di diametro, ma molti ritengono che sia la parete interna del cratere.

^[65] J sta per joule ed è una unità di misura dell'energia. Per comprendere meglio questo valore, si pensi che essa equivale a 100 000 Gigaton di TNT (centomila miliardi di tonnellate di tritolo). In confronto, l'ordigno esplosivo più potente della storia aveva soltanto un potenza esplosiva pari ad un ventesimo di Gigaton.

^[66] È un sottile strato di argilla che segna il confine tra il Cretaceo (K) e il terziario (T). Nel 1980, gli Alvarez analizzarono campioni presi nella Gola del Bottaccione a Gubbio e scoprirono un contenuto di Iridio molto superiore alla media; l'Iridio è molto diffuso nei meteoriti.

Il Cretaceo e il Terziario sono infatti caratterizzati da forme di vita molto diverse tra loro e i cambiamenti sembrano essere stati repentini. Specie animali e vegetali che vivevano abbondanti nel Cretaceo non ci sono più nel periodo successivo, e scompare più della metà dei generi: non vi è più traccia di ammoniti, rudiste, belemniti, ittiosauri, plesiosauri, dinosauri.

Attualmente questa teoria è ampiamente accettata dalla comunità scientifica, anche se non universalmente. Di recente una nuova datazione sulla formazione del cratere di Chicxulub ha stabilito che essa possa risalire anche a 300 000 anni prima della formazione del *K-T boundary*; quindi l'estinzione di massa di 65 milioni di anni fa sarebbe stata causata dall'accresciuta attività vulcanica seguita all'impatto (che tra l'altro sembra essere stato multiplo).

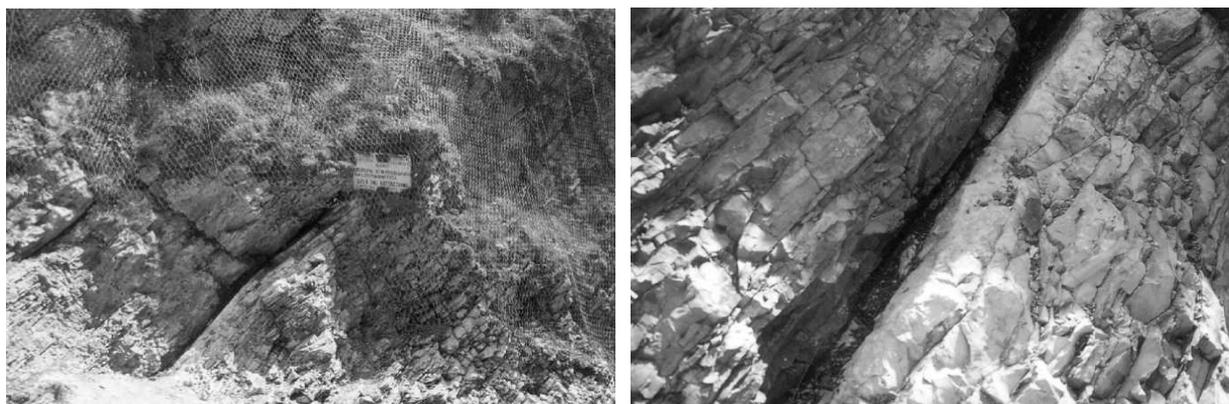


Fig. 7.5 – Il *K-T boundary* nella gola del Bottaccione vicino Gubbio. (Foto Fornaseri)

Un altro bolide, sulla cui natura ancora molti scienziati discutono, è caduto il 30 giugno 1908 lungo il corso del fiume Tunguska, in Siberia. La sua esplosione provocò un frastuono tale da essere udito a centinaia di chilometri e uno spostamento d'aria talmente violento da abbattere alberi a grande distanza. Vi furono due vittime. Non c'è però alcun cratere: la prima spedizione, capeggiata da Leonid Kulik nel 1927, credette di identificare il luogo dell'impatto in una foresta abbattuta presso il bacino del fiume Podkamennaja Tunguska.

Dopo decine di spedizioni, l'ipotesi più accreditata sulla causa del fenomeno è che ci sia stata l'esplosione di un asteroide sassoso di circa 30 m di diametro che si muoveva ad una velocità di almeno 15 km/s. La deflagrazione del corpo celeste sarebbe avvenuta ad una altezza di 8 km; la resistenza offerta dall'atmosfera può aver frantumato l'asteroide, la cui energia cinetica è stata convertita in energia termica. La conseguente vaporizzazione dell'oggetto roccioso ha causato un'immane onda d'urto che ha colpito il suolo.

Grazie ad una simulazione al computer alcuni scienziati della Nasa e dell'Università del Wisconsin, Christopher Chyba, Kevin Zahnle e Paul J. Thomas, escludono che l'asteroide fosse di natura ferrosa o carbonacea. Nel primo caso, il corpo celeste avrebbe raggiunto il suolo senza frantumarsi, mentre nel secondo la deflagrazione sarebbe avvenuta troppo in alto per devastare una zona così ampia di *taiga*. Per ragioni analoghe e per considerazioni sulla densità, i tre studiosi ritengono improbabile che l'evento di Tunguska sia stato generato da una cometa, come invece era stato ipotizzato dall'Accademia Sovietica delle Scienze nel 1960.

Gli eventi che possono avere conseguenze significative per la vita sulla Terra sono legati all'impatto di un grosso asteroide (10 km o più); come si è visto, ci sono stati e ci saranno impatti di questo tipo. Fortunatamente sono molto rari (circa ogni cento milioni di anni). Sono troppo grandi e al momento attuale non è possibile far nulla.

La caduta di un oggetto "tipo Tunguska" (50 – 100 m) è in grado di causare gli stessi danni di una grossa bomba atomica, ed è un evento non rarissimo (una volta ogni qualche millennio!). Sono corpi difficili da rilevare e al momento attuale non disponiamo di difese efficaci.

Gli eventi molto pericolosi sono quelli che coinvolgono oggetti di dimensioni intorno ad 1 km. Sono in grado di causare centinaia di milioni di vittime, non sono frequenti ma neppure inim-

maginabili (si stima un impatto ogni 100 000 o un milione di anni); per questi oggetti si potrebbe cominciare a far qualcosa.

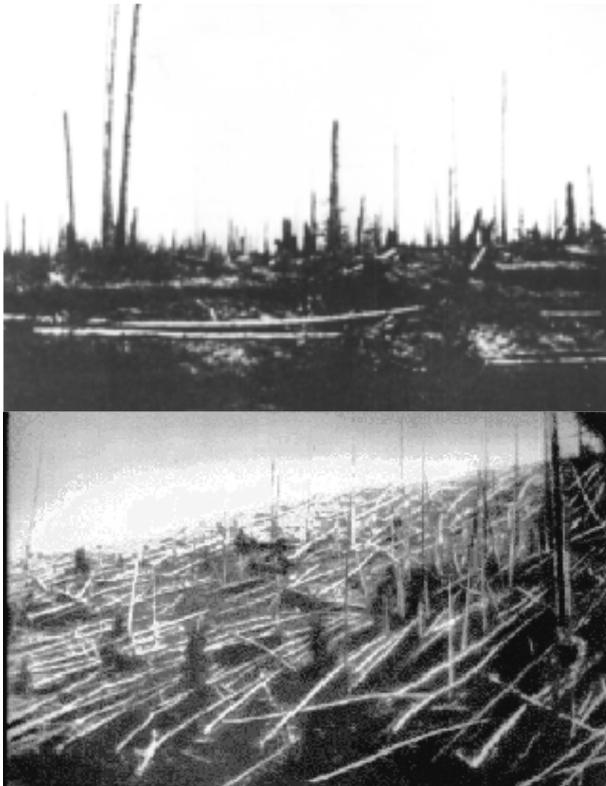


Fig. 7.6 – A sinistra un'immagine dell'epicentro, in basso due riprese degli alberi della foresta abbattuti. Le immagini sono del 1927.



7.2 – CHE COSA FARE?

Se un asteroide si avvia ad un impatto sulla Terra, possiamo pensare a diverse strategie di intervento:

- La distruzione totale dell'asteroide mediante esplosivi. Non funziona perché per la polverizzazione completa occorrerebbe un'energia enorme (migliaia o milioni di Megaton).
- Una possibile mitigazione legata alla frammentazione del corpo in più parti, sempre mediante esplosivi. È forse fattibile, ma non è detto che le conseguenze siano minori: quello che conta nell'impatto è l'energia totale in circolazione, e quella non cambia.
- Deviare l'asteroide, con varie possibili tecniche (esplosione a lato, o altro): questa potrebbe funzionare.

Per deviare un asteroide bisogna conoscere la sua natura. Non è lo stesso se è un corpo monolitico o un conglomerato; può essere utile sapere qual è la sua composizione chimica e le caratteristiche fisiche. Saranno quindi importanti studi spettroscopici e radar per ottenere la maggior quantità di dati possibile. Recenti missioni spaziali verso asteroidi hanno avuto anche lo scopo di valutare la possibilità di interagire con questi corpi.

È poi assolutamente indispensabile prevedere l'impatto con molto anticipo: almeno una decina di anni. Una deviazione è efficace se effettuata precocemente, altrimenti deve essere molto grande e questo richiede un'energia (di nuovo) enorme. Sono quindi due i problemi: 1) studiare sistematicamente le orbite per prevedere i possibili impatti e 2) scoprire tutti gli asteroidi potenzialmente pericolosi.

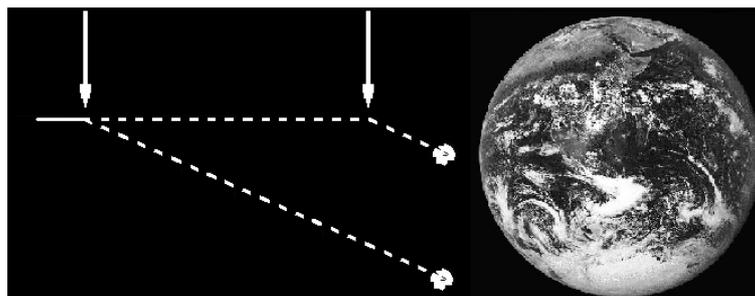


Fig. 7.7 – L'asteroide deve essere deviato quando si trova lontano dalla Terra

Il secondo problema è in realtà il più semplice. Una volta scoperto un asteroide si definisce un'orbita di prova, con un certo margine di incertezza. Sistemi automatizzati (come Neodyd, a Pisa) ne calcolano l'orbita tenendo conto anche dei possibili errori e assegnano una probabilità di impatto per un certo numero di anni. Se essa è diversa da zero si cercano in archivio vecchie osservazioni – o se ne programmano di nuove – per una migliore definizione dell'orbita.

Diametro del proiettile	Diametro del cratere	Energia (J)	Energia (TNT)	Intervallo medio degli impatti (anni)	Eventi Terrestri paragonabili ed eventuali effetti
2 m	35 m	21×10^{12}	0,5 kton	4	Piccoli terremoti
6 m	120 m	$8,3 \times 10^{13}$	20 kton	35	Hiroshima 1945 (Bomba atomica)
23 m	450 m	$4,2 \times 10^{15}$	1 Mton	370	Bomba all'Idrogeno
50 m	1 km	$4,6 \times 10^{16}$	11 Mton	1600	Wolf Creek Crater, Australia
55 m	1,1 km	$6,2 \times 10^{16}$	15 Mton	1900	Barringer Meteor Crater, Arizona Tunguska
90 m	1,8 km	$2,5 \times 10^{17}$	60 Mton	4400	Terremoto di S.Francisco (1906)
155 m	3,1 km	$1,3 \times 10^{18}$	310 Mton	12 000	Eruzione del St. Helens (1981)
350 m	6,9 km	$1,5 \times 10^{19}$	3,6 Gton	51 000	I più grandi terremoti
360 m	7,2 km	$1,7 \times 10^{19}$	3,7 Gton	55 000	Eruzione del Krakatoa (1883)
1 km	20 km	$3,7 \times 10^{20}$	87 Gton	350 000	Ries Crater (Germania)
2,5 km	50 km	$5,8 \times 10^{21}$	1300 Gton	4,5 Ma	Cratere Montagnais (Canada)
5 km	100 km	$4,6 \times 10^{22}$	11000 Gton	26 Ma	Cratere Popigai (Russia)
10 km	200 km	$3,7 \times 10^{23}$	87000 Gton	150 Ma	Chicxulub (Messico)

Tabella 7.1 – La tabella indica vari dati legati alle dimensioni di corpi che colpiscono la Terra (Bevan 1998) (kTon = chiloton, Mton = Megaton e Gton = Gigaton; Ma = milioni di anni)

Finora questi studi hanno sempre portato a sdrammatizzare gli allarmi: anche casi in cui la prima stima della probabilità di impatto era abbastanza alta sono stati superati da nuove osservazioni, o dall'utilizzo di vecchie osservazioni non conosciute.

Il problema è ancora quello di scoprire l'asteroide e anche di accorgersi di averlo scoperto o

ritrovato.

Motivati dalla valutazione del pericolo potenziale, anche organismi governativi e parlamentari (non italiani) hanno chiesto alla comunità scientifica di scoprire tutti i possibili oggetti pericolosi. Gli americani vorrebbero scoprire nel giro di pochi anni tutti o quasi quelli pericolosi da 1 km, con una campagna che è già molto avanti. Ma come si fa a sapere se li abbiamo scoperti tutti?

Per capire come si può fare utilizziamo un'analogia: se vogliamo sapere quanti pesci ci sono in un laghetto li possiamo pescare con un retino e, dopo averli contrassegnati con una croce, ributtarli in acqua. Continuando in questo modo, ad un certo punto inizieremo a ripescare pesci contrassegnati, che saranno tanti di più quante più volte effettuiamo la pesca. Un po' di matematica ci permetterà di stabilire quanti sono i pesci in tutto; all'aumentare del numero delle pescate, il numero di nuovi pesci diminuisce sempre più.

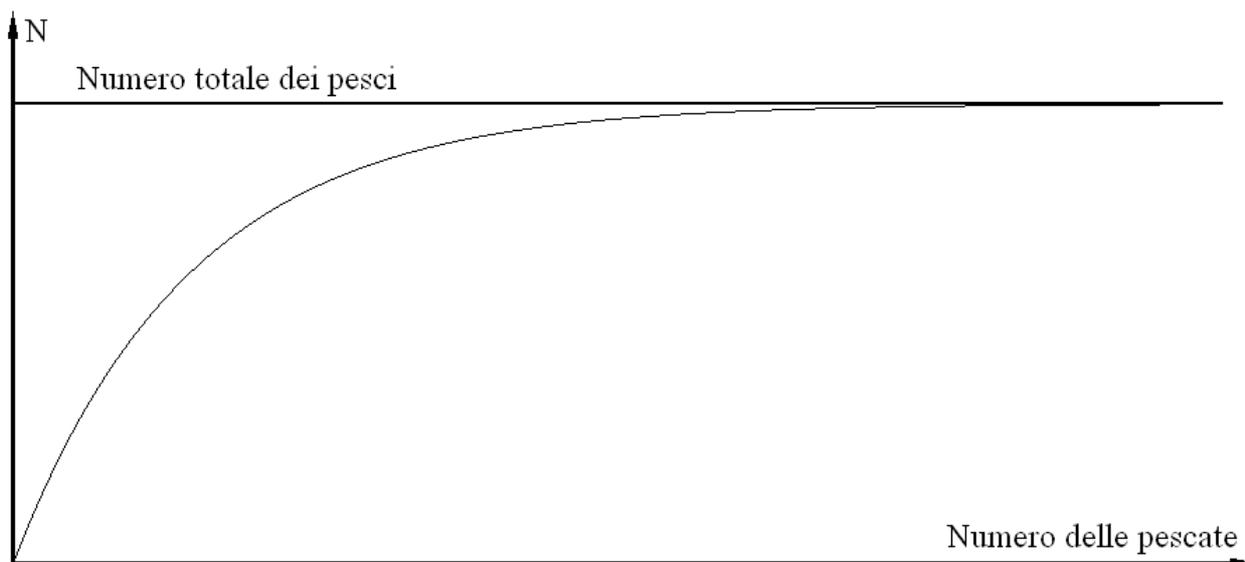


Fig. 7.8 – Grafico relativo al totale dei nuovi pesci trovati nel laghetto.

Per gli asteroidi ci sono anche problemi collaterali: per esempio, certi oggetti (come quelli più vicini al Sole) sono più difficili da scoprire. Il lavoro prosegue, ma per sapere quando siamo arrivati vicini al traguardo occorre riconoscere un asteroide già scoperto in precedenza. A differenza dei pesci, non ci possiamo fare una croce sopra. Per questo, come è stato detto nel capitolo introduttivo, agli asteroidi vengono associati i parametri orbitali che li identificano in maniera univoca. Il problema si pone quando le misure non sono molte: infatti può capitare che ci siano asteroidi con orbite compatibili. La figura 7.9 ci aiuta a capire.

Supponiamo di aver fatto due serie di osservazioni a distanza di tempo. In base ai calcoli le due serie di dati sono compatibili con una traiettoria: vengono quindi calcolati i parametri orbitali e l'asteroide è classificato. Dalla figura possiamo comprendere come si sia commesso un errore: in effetti le due serie di dati si riferivano a due asteroidi diversi e solo per caso i tratti delle orbite misurati sono compatibili con quella calcolata.

Questo può portare a grossi errori, ai quali si rimedia con lunghe osservazioni e con un monitoraggio continuo degli asteroidi noti.

Non si può comunque essere mai del tutto certi di aver individuato definitivamente un asteroide. A parte i più grandi, infatti, la loro orbita può essere analizzata solo per brevi periodi quando sono in prossimità dell'opposizione rispetto al Sole.

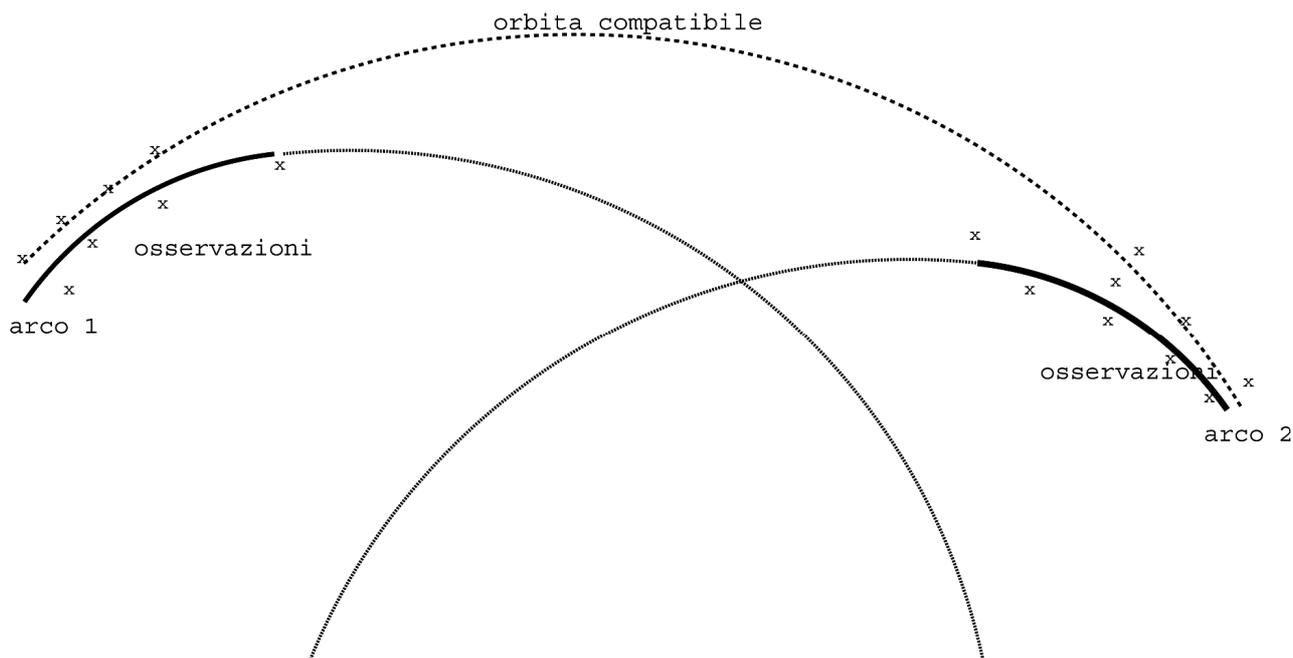


Figura 7.9 – Orbite compatibili.

7.3 – LA SCALA TORINO E LA SCALA PALERMO PER IL RISCHIO IMPATTO.

La Scala Torino è stata creata dal Professor Richard P. Binzel del Dipartimento di Scienze Planetarie del MIT (Massachusetts Institute of Technology). La prima versione, chiamata *Indice di pericolosità degli oggetti NEO*, è stata presentata nel corso di una conferenza alle Nazioni Unite nel 1995. Una versione modificata è stata poi presentata nel Giugno 1999 al simposio internazionale di Torino. I partecipanti hanno approvato la nuova versione, chiamandola *Scala Torino*. Nel 2005 è stata diffusa una versione parzialmente riscritta per permettere di comunicare meglio al grande pubblico il grado di rischio.

Al momento della scoperta di un nuovo oggetto è molto difficile prevedere dove potrà trovarsi nelle settimane o nei mesi successivi. Tale incertezza dipende dal fatto che i dati osservativi disponibili riguardano un tratto molto breve dell'orbita e ciò introduce dei limiti nella precisione dei calcoli. Nella maggior parte dei casi i dati a disposizione consentono fin dal primo momento di escludere, per almeno un centinaio d'anni nel futuro, che si possano verificare passaggi ravvicinati pericolosi per la Terra. Purtroppo, però, rimangono ancora dei casi per i quali il rischio di una collisione non può essere del tutto escluso e per questi viene indicato il grado di potenziale pericolosità.

La Scala Torino impiega dei numeri da 0 a 10: lo zero significa che un oggetto non ha probabilità di collidere con la Terra mentre il dieci indica la collisione certa. Vengono indicati con il grado zero anche i possibili impatti di oggetti troppo piccoli per riuscire a superare lo scudo dell'atmosfera terrestre.

Un evento viene classificato valutando due fattori: la probabilità che avvenga la collisione e l'energia cinetica posseduta dall'oggetto (ovvero la capacità di fare danni). Un oggetto in grado di avvicinarsi più volte alla Terra potrà avere distinti valori nella Scala, uno per ciascuno dei suoi passaggi ravvicinati.

È importante sottolineare che la classificazione di un evento non è mai un fatto stabilito una volta per tutte: la posizione assegnata ad un evento nella Scala è soggetta a mutare con il passare del tempo. Il cambiamento dipende dall'affinamento della nostra conoscenza dell'orbita: un maggior

numero di dati potrà confermare per l'oggetto un passaggio a distanza di sicurezza dalla Terra. Perciò, anche se inizialmente venisse inserito in una classe diversa da zero, alla fine scenderà al livello più basso. È quasi impossibile il contrario: un oggetto classificato fin dall'inizio di grado zero ben difficilmente potrà cambiare con il tempo questa sua collocazione.

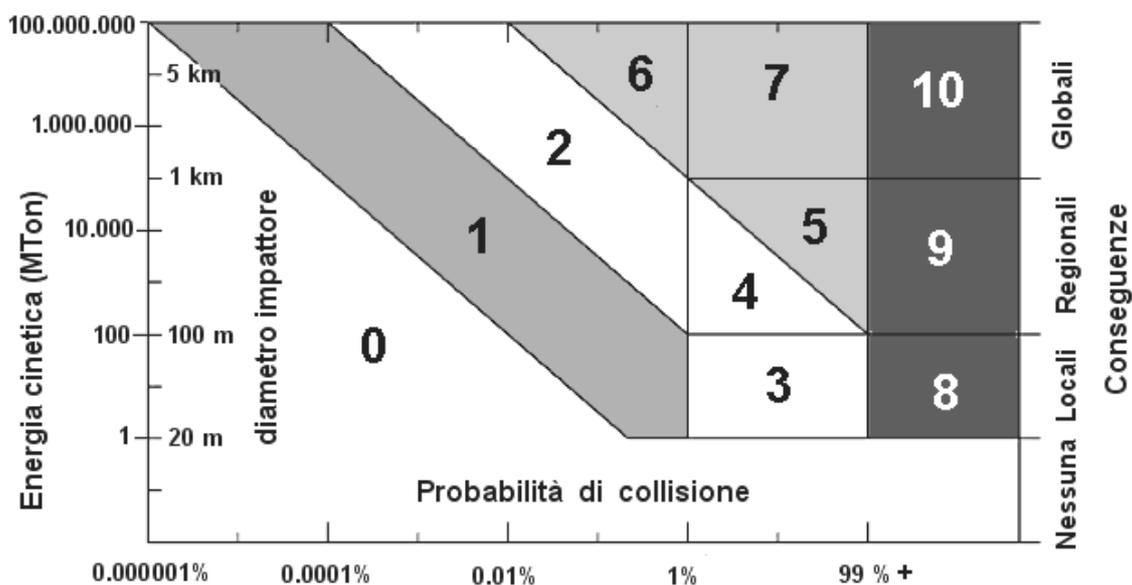


Fig. 7.10 – La Scala Torino

La Scala Torino codifica gli eventi non solo con i numeri, ma anche attraverso dei colori (bianco, verde, giallo, arancione e rosso), con i seguenti significati:

- Bianco: *eventi che non hanno alcuna conseguenza*. È da escludere che avvenga l'impatto oppure l'oggetto è talmente piccolo che è quasi certa la sua completa distruzione nell'atmosfera. Al bianco corrisponde la categoria 0.
- Verde: *eventi che meritano accurato monitoraggio*. Ci si riferisce ad oggetti che avranno incontri ravvicinati con probabilità di collisione molto bassa e perciò non preoccupante. Tuttavia la prudenza suggerisce di tenere sott'occhio le loro orbite in modo da rendere più accurato il calcolo delle probabilità d'impatto, con la speranza di riportare l'evento alla categoria zero. Al verde corrisponde la categoria 1.
- Giallo: *eventi che preoccupano*. Sono gli incontri ravvicinati con oggetti che hanno probabilità di collisione più alte di quelle che tipicamente può sperimentare la Terra su un arco temporale di alcuni decenni. Si tratta di oggetti per i quali è prioritaria l'accurata determinazione dell'orbita. Al giallo corrispondono le categorie 2, 3 e 4.
- Arancione: *eventi minacciosi*. Si codificano in questo modo gli incontri ravvicinati con oggetti in grado di causare devastazione regionale o globale per i quali la probabilità di impatto è maggiore di quella che tipicamente può sperimentare la Terra ogni secolo. È assolutamente prioritaria la determinazione accurata dell'orbita di questi oggetti. All'arancione corrispondono le categorie 5, 6 e 7.
- Rosso: *collisione certa*. Appartengono a questa classe gli oggetti che sono in rotta di sicura collisione con la Terra e dai quali l'atmosfera non ci può più proteggere. Si tratta di eventi in grado di provocare non solo danni locali o devastazioni su scala regionale, ma anche una catastrofe climatica globale. Al rosso corrispondono le categorie 8, 9 e 10.

L'attuale record per la più alta classificazione spetta a 99942 Apophis, un asteroide di 400 m, di massa $4,5 \cdot 10^{10}$ kg, che appartiene alla famiglia degli Aten. Ha un periodo orbitale di 323 giorni e 14 ore che lo porta ad intersecare l'orbita terrestre due volte l'anno.

Il 23 dicembre 2004 il programma NASA dedicato agli asteroidi pericolosi annunciò che Apophis (allora conosciuto solo col suo nome provvisorio 2004 MN4) era il primo oggetto a raggiungere il livello 2 sulla Scala Torino. Successivamente fu catalogato fino al livello 4, mentre oggi è ridisceso al livello 1. Si ritiene che il 13 aprile 2029 Apophis passerà ad una distanza di circa 37 000 km dal centro della Terra, tanto vicino da poter essere individuato a occhio nudo in una vasta zona che comprende Europa, Africa e Asia occidentale. Conseguenza di questo passaggio ravvicinato sarà un'alterazione dell'orbita (diventerà un oggetto della famiglia Apollo). Si ritiene che se nel passaggio ravvicinato del 2013 si potranno eseguire misure radar molto precise, allora sarà possibile predirne la posizione almeno fino al 2070. Per il momento il valore di 1 sulla scala Torino è applicato per i passaggi negli anni 2035 e 2036. Prima di Apophis, nessun NEO ha mai avuto un valore sulla scala Torino maggiore di 1.

La Scala Palermo (*Palermo Technical Impact Hazard Scale*) è uno strumento degli addetti ai lavori nel campo dei NEO. La sua introduzione si è resa necessaria per poter assegnare un grado di priorità agli eventi che nella Scala Torino erano classificati allo stesso livello. Essa esprime il rapporto tra la probabilità che avvenga un evento specifico e la probabilità media che un oggetto di uguali dimensioni possa colpire la Terra negli anni che ci separano dall'evento considerato. Questo rischio medio prende il nome di *background risk*.

Per convenienza si è scelto di costruire una scala logaritmica: questo significa che ad un indice -2 corrisponde un evento solamente l'1% più probabile di un impatto casuale della stessa gravità nel corso degli anni che ci separano da quell'evento. Viceversa, un indice $+2$ significa che quell'evento è 100 volte più probabile del *background risk*.

È attraverso la classificazione nella Scala Palermo che si decide con quale priorità procedere nell'osservazione e nell'analisi degli oggetti da monitorare. I valori della Scala Palermo non sono discreti come quelli della Scala Torino, ma continui (sono consentiti sia valori positivi che negativi), e inoltre dipendono dal numero di anni che ci separa dal potenziale impatto, nonché dall'energia ad esso associabile. Non è possibile una trasformazione diretta da una scala all'altra.

Il valore di un evento nella Scala Palermo (PS) è dato dall'espressione

$$PS = \log \frac{P_i}{f_b \cdot T},$$

dove P_i indica la probabilità di impatto dell'evento considerato e T è il tempo (in anni) che ci separa dal potenziale impatto (il logaritmo è in base 10). Con il termine f_b , infine, si indica la frequenza d'impatto di *background*. Quest'ultima grandezza esprime la probabilità che nell'anno si verifichi un impatto con energia E (espressa in Megaton) almeno equivalente a quella dell'evento considerato. Essa si calcola con la seguente relazione:

$$f_b = 0,03 \cdot E^{-\frac{4}{5}}.$$

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

A marzo 2006, il valore massimo sulla Scala Palermo era detenuto dall'asteroide (29075) 1950 DA con un valore di 0,17 per una possibile collisione nell'anno 2880; il secondo valore più alto in classifica è detenuto dall'asteroide 2004 VD17 con $-0,25$ per una possibile collisione nell'anno 2102. Per un breve periodo, nel dicembre 2004, l'asteroide 99942 Apophis detenne il record nella Scala Palermo, con un valore di 1,12 per una possibile collisione nell'anno 2029. Questo dato indicava che la probabilità di collisione con Apophis era considerata 12,6 volte maggiore del rischio di fondo: 1 su 37 invece che 1 su 472.

BIBLIOGRAFIA

- [1] FLAMMARION C., *Le Stelle e le curiosità del cielo*, Sonzogno, 1904
- [2] FLAMMARION C., *L'astronomia Popolare*, Sonzogno, 1938
- [3] TEMPESTI P.: *Parliamo di comete*, Edigrafital, 1973
- [4] FARINELLA P. – PAOLICCHI P. – ZAPPALA' V., *Gli Asteroidi*, Il Castello, 1983
- [5] MAFFEI P., *La cometa di Halley*, Mondatori, 1984
- [6] DE MEIS S. – MANARA A., *La cometa di Halley*, Il Castello, 1985
- [7] WHIPPLE F.L., *Il mistero delle comete*, Jaka Book, 1991
- [8] DELLA SETA E., *Messaggeri celesti*, Editori Riuniti, 1994
- [9] FAVERO G.: *Manuale di Osservazione cometaria*, Astronomia UAI n.1, 1995
- [10] TOLOMEO C., *Tetrabiblos*, Edizioni Arktos, 1996
- [11] RIGUTTI M., *Comete, Meteoriti e Stelle Cadenti*, Giunti, 1997
- [12] GRIBBIN J., *Enciclopedia di Astronomia e Cosmologia*, Garzanti, 1998
- [13] LODDERS K. and FEGLEY B. Jr., *The Planetary Scientist's Companion*, Oxford University Press, 1998
- [14] MILANI G. a cura di: *Osservare le comete*, i quaderni di l'Astronomia, 1999
- [15] AA.VV., *Avvistamenti e impatti di corpi celesti*, Regione del Veneto, 1999
- [16] BIANUCCI P. a cura di, *Le Meteoriti*, De Agostini, 1999
- [17] CARBOGNANI A. – FOSCHINI L.: *Meteore*, CLUEN, 1999
- [18] RICCOBONO N., *Tunguska*, Rizzoli, 2000
- [19] VILLA M. – MONTANARI E., *Meteore e Meteoriti*, i quaderni di l'Astronomia, 2001
- [20] CELLINO A. – ZAPPALA' V.; *Le famiglie di asteroidi*, Le Scienze – settembre 2001
- [21] AA. VV., *Il rischio Asteroidi*, Regione Piemonte, 2005
- [22] AA. VV.: *Il Sistema Solare: l'esplorazione dei pianeti nel terzo millennio*, Le Scienze, 2005
- [23] FOGLIA S., *Asteroidi*, I libri di Astronomia UAI, 2006
- [24] BIANCHI E. – CODEBÒ M. – VENEZIANO G.: *Ipotesi astronomica sulla "Stella di Betlemme" e sulle aspettative escatologiche coeve nel mondo mediterraneo*, in www.archaeoastronomy.it
- [25] SENECA L. A.: *Naturales Quaestiones*, traduzione in www.filosofico.net/senquestnat.htm

INDICE

Prefazione	Pag.	II
Locandine della varie edizioni della scuola	“	III
Presentazione	“	IV
Introduzione		
1.1 – Asteroidi	“	1
1.2 – Denominazione degli asteroidi e delle comete	“	4
Le comete nella storia		
2.1 – Dall’alba dell’umanità ad Aristotele	“	7
2.2 – Paura delle comete	“	9
2.3 – Le osservazioni scientifiche	“	13
2.4 – La stella dei Re Magi	“	29
Meteoroidi, meteore e meteoriti		
3.1 – Tra storia e leggenda	“	34
3.2 – Iniziano gli studi scientifici	“	36
3.3 – Le meteore oggi	“	39
3.4 – Gli sciami meteorici	“	40
3.5 – Classificazione dei meteoriti	“	46
La struttura delle comete		
4.1 – Introduzione	“	52
4.2 – La struttura di una cometa	“	53
4.3 – Proprietà fisiche del nucleo	“	55
Gli asteroidi della fascia principale		
5.1 – Collisioni nel Sistema Solare	“	61
5.2 – Fisica della collisione	“	62
5.3 – Collisioni catastrofiche	“	65
5.4 – La formazione di famiglie e il quadro teorico attuale	“	68
5.5 – Evoluzione dinamica degli asteroidi	“	70
Gli oggetti trans-nettuniani		
6.1 – Introduzione	“	74
6.2 – Cause di tardiva scoperta	“	76
6.3 – I Plutini	“	78
6.4 – Dai Centauri alla Nube di Oort	“	80
6.5 – I problemi ancora aperti	“	83
Incontri pericolosi		
7.1 – Introduzione	“	85
7.2 – Che cosa fare?	“	89
7.3 – La Scala Torino e la Scala Palermo per il rischio impatto	“	92
Bibliografia	“	95
Indice	“	96