Chapter 3

Il Sistema Solare.

3.1 Riconoscimento di un pianeta.

Due sono le differenze evidenti fra stelle e pianeti: questi ultimi, essendo enormemente più vicini, non sono talvolta assimilabili ad oggetti puntiformi, e possono essere parzialmente risolti. L'estensione apparente dell'immagine di un pianeta non è quindi solo dovuta alla diffrazione e, soprattutto, al *seeing*. A titolo di esempio, consideriamo il caso di Giove all'opposizione (v. la definizione nel seguito). Il diametro di Giove è dell'ordine di $10^5 km$; essendo la distanza dalla Terra di circa $6 \cdot 10^8 km$, Giove sottende un angolo $\alpha \simeq 1.5 \cdot 10^{-4} rad$ ossia circa 30" d'arco. Al telescopio Giove appare quindi come un oggetto esteso. Ad occhio nudo Giove appare sostanzialmente ancora come un punto, ma, essendo l'immagine ben piú grande del normale *seeing* l'effetto visibile di scintillazione è più ridotto: i pianeti maggiori (Venere, Marte, Giove, Saturno) sono riconoscibili ad occhio nudo dall'immagine **più ferma**. Il discorso non vale ovviamente per i corpi minori (satelliti, pianetini, comete lontane dal Sole), la cui estensione angolare torna sotto il secondo d'arco.

In secondo luogo il *moto proprio* e la *parallasse* dei corpi planetari sono enormemente piú grandi degli equivalenti stellari. Peraltro per i corpi del Sistema Solare questi concetti, pur tecnicamente corretti, non sono di solito neppure usati: il moto di un pianeta è la risultante dei moti della Terra e del pianeta stesso intorno al Sole, ed è l'effetto combinato ad essere studiato.

Per esempio, visto dal Sole, rispetto alle stelle Giove descrive (in un'orbita poco ellittica) un angolo giro in poco meno di 12 anni, ossia oltre 30^o all'anno, un grado ogni circa 10 giorni, o 15" all'ora. Enorme è quindi il suo *moto proprio*, che risulta ovviamente, essendo misurato dalla Terra, meno uniforme a causa del variare della distanza di osservazione (la distanza fra la Terra e Giove varia di circa il 50%, dal valore minimo relativo alla **opposizione**, che si ha quando Giove si trova dalla parte opposta del Sole, a quello relativo alla **congiunzione**). Il moto proprio di Giove è ovviamente rilevabile anche su scale di tempo molto inferiori all'anno. Per quanto riguarda la parallasse, essendo Giove a circa $5 u.a.$ dal Sole, si ha $\pi \simeq 12^o$. La parallasse risulta numericamente minore del moto proprio in virtù della definizione (che introduce un fattore 2π), pur essendo la velocità orbitale della Terra più che doppia di quello di Giove: ricordiamo che la velocità equivalente associata alla parallasse (si veda [5] è di circa $5 km/s$, molto inferiore ai $30 km/s$ con cui la Terra percorre la sua orbita. I due moti producono un effetto osservabile combinato.

Andando verso l'esterno del Sistema Solare il moto proprio decresce sia per la distanza sia per la minore velocità orbitale, mentre la parallasse diminuisce solo per la aumentata distanza. Di conseguenza l'effetto osservabile della parallasse diviene progressivamente dominante.

Nel caso di pianeti come Giove, l'effetto combinato dei due moti rende quello effettivamente osservato sulla sfera celeste abbastanza complesso (si veda la Fig.3.1). Il moto apparente è caratterizzato da sensibili disuniformità e perfino da una fase retrograda.

La natura planetaria di un corpo come Giove viene naturalmente dedotta dall'osservazione di simili moti, e potrebbe essere riconosciuta perfino da misure di *parallasse diurna* (qualche secondo d'arco). In pratica la scoperta di un **nuovo** corpo planetario (i pianeti maggiori sono stati identificati ormai da molto tempo) può avvenire semplicemente osservando una zona di cielo, o confrontando due immagini prese successivamente, con la stessa tecnica del **blinking** usata per le misure di parallasse - ma ora le due immagini possono –anzi debbono– essere prese a distanza di poche ore [5]. Ancora più semplicemente, una immagine di una porzione di sfera celeste ottenuta con una esposizione sufficientemente lunga rivela la presenza di un corpo planetario che non viene rappresentato da una immagine puntiforme, ma da una striscia corrispondente alle sue diverse posizioni durante la ripresa (Fig.3.2).

Mentre i pianeti maggiori erano noti fin dall'antichità, gli ultimi due secoli hanno permesso di scoprire un grande numero di corpi più piccoli, dalla scoperta (1/1/1801) del primo e più grande asteroide (*1 Ceres*) (oggi ne sono note e "numerate" diverse centinaia di migliaia, ed il numero cresce con rapidità quasi esponenziale), a quella di Plutone, vecchia di non molti decenni, e di innumerevoli comete e satelliti. Più recentemente anche i corpi della cosiddetta **Fascia di Kuiper–Edgeworth** si sono aggiunti all'inventario del Sistema Solare. Sia le campagne osservative da Terra sia le imprese spaziali hanno permesso di acquisire dati qualitativamente e quantitativamente incomparabili con quelli posseduti fino a qualche decennio or sono.

3.2 Luminosità di un pianeta; emissione nel visibile e nell'infrarosso.

A differenza delle stelle i pianeti non hanno sorgenti di energia propria (almeno in prima approssimazione), ma sono in gran parte riscaldati dal Sole. Dell'energia radiante che ricevono dal Sole parte viene riflessa, parte assorbita e –in condizioni di regime, quali le presenti– riemessa nell'infrarosso.

Se $L_{\lambda,\odot}$ è la luminosità monocromatica del Sole, un pianeta di raggio R_p a distanza $r_{p\odot}$ dal Sole riceve in quella lunghezza d'onda una energia:

$$\Lambda_{\lambda,p} = \frac{\pi L_{\lambda,\odot} R_p^2}{4\pi r_{p\odot}^2} = 0.25 L_{\lambda,\odot} R_p^2 / r_{p\odot}^2 \tag{3.1}$$

Ne riflette una percentuale A_λ; la sua luminosità monocromatica (relativamente, come è ovvio, all'emisfero illuminato) sarà quindi

$$L_{\lambda,p} = A_\lambda \Lambda_{\lambda,p} \tag{3.2}$$

Integrando su tutte le lunghezze d'onda del visibile, si ottiene:

$$L_p = \int_{vis} A_\lambda \Lambda_{\lambda,p}\, d\lambda \overset{def\ A}{=} A \int_{vis} \Lambda_{\lambda,p}\, d\lambda \tag{3.3}$$

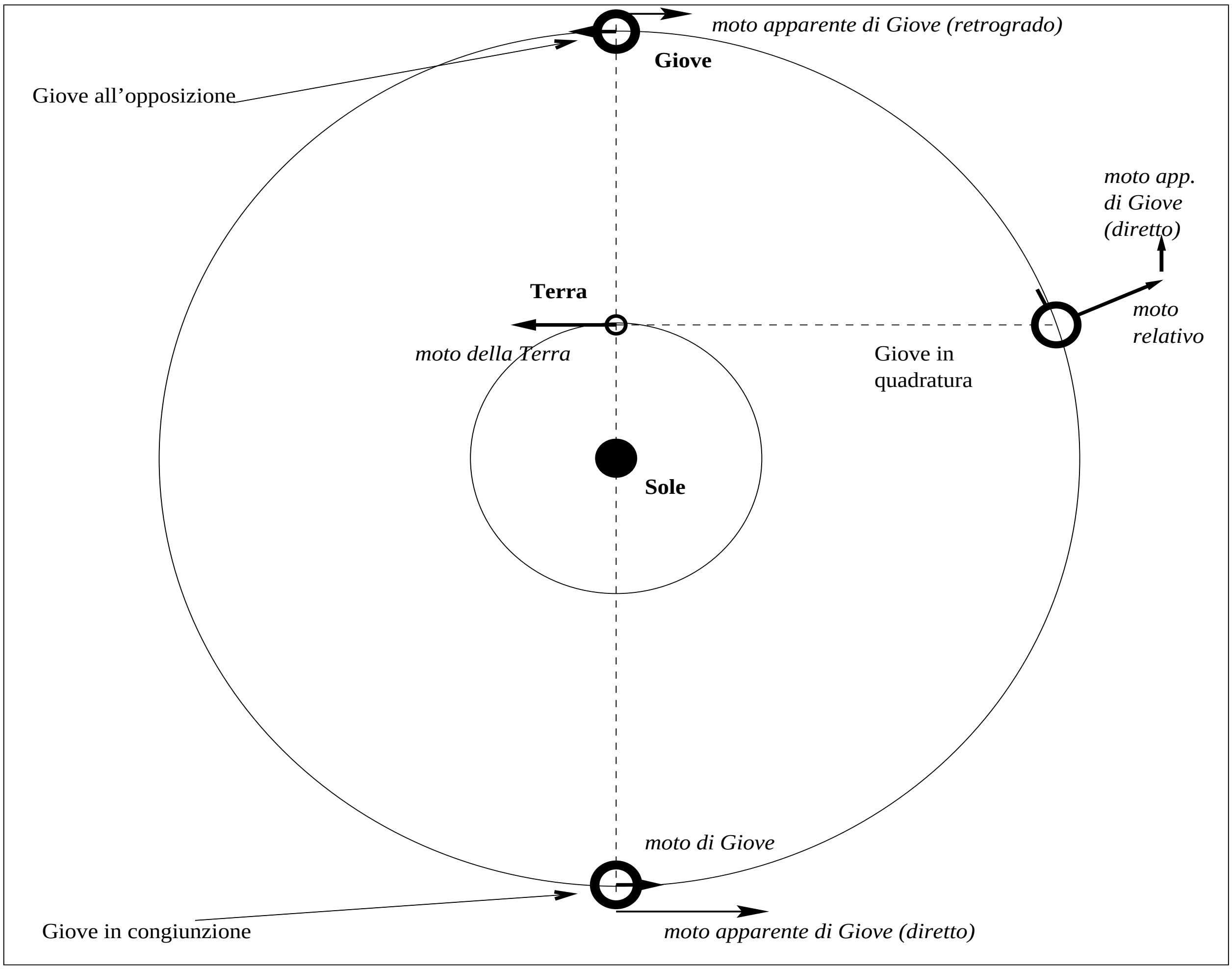

Figure 3.1: Posizioni e moto relativo del sistema Sole–Terra–Giove

dove A prende il nome di **albedo**.

Usando le definizioni date nel Corso di Astrofisica [5, Cap.3] si ottiene quindi, per esempio all'opposizione (concetto ovviamente usabile solo per i pianeti esterni alla Terra), quando vediamo l'intero emisfero illuminato:

$$I_V = \int \frac{S_V(\lambda) D_\lambda(\theta) L_{\lambda,p}}{4\pi r_{pT}^2}\, d\lambda = \int \frac{S_V(\lambda) D_\lambda(\theta) A_\lambda L_{\lambda,\odot} R_p^2}{16\pi r_{pT}^2 r_{p\odot}^2}\, d\lambda \tag{3.4}$$

dove r_{pT} è la distanza Terra–pianeta.

Fissate le unità di misura, è possibile trasformare la (3.4), con semplici passaggi:

$$\begin{aligned} m_V &= -2.5 \log I_V + cost. \\ &= -2.5 \log \left(\int S_V(\lambda) D_\lambda(\theta) A_\lambda L_{\lambda,\odot}\, d\lambda \right) - 5 \log R_p + 5 \log r_{pT} + 5 \log r_{p\odot} + C. \end{aligned} \tag{3.5}$$

Si può anche scrivere:

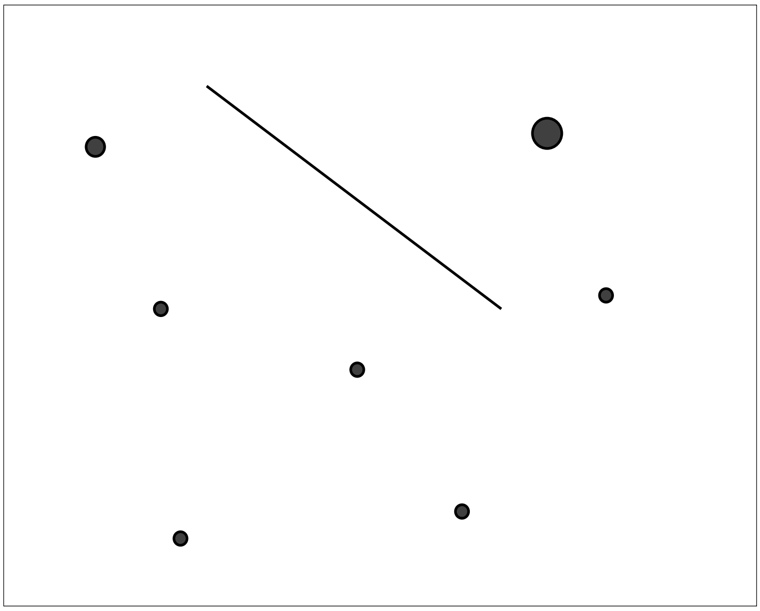

Figure 3.2: Un corpo planetario descrive su una immagine una striscia di lunghezza proporzionale alla sua velocità di spostamento sulla sfera celeste

$$\begin{aligned} m_V &= -2.5 \log I_V + cost. \\ &= -2.5 \log \left(\int S_V(\lambda) D_\lambda(\theta) L_{\lambda,\odot} \, d\lambda \right) - 5 \log \sqrt{A'} R_p + 5 \log r_{pT} + 5 \log r_{p\odot} + C. \end{aligned} \quad (3.6)$$

(con A' si indica il valor medio dell'albedo). Come si vede la magnitudine m_V è determinata essenzialmente da quattro diversi contributi: uno combina insieme luminosità solare e fattori filtro, il secondo è il raggio del pianeta scalato con un coefficiente che è sostanzialmente la radice quadrata dell'albedo (in altri termini abbiamo il **raggio efficace** del pianeta), il terzo e il quarto sono rispettivamente la distanza Terra–pianeta e la distanza pianeta–Sole. Se consideriamo la situazione all'opposizione di fase (il momento migliore per studiare un pianeta esterno alla Terra), quando $r_{pT} = r_{p\odot} - r_{T\odot}$, il terzo e quarto termine della (3.5) diventano:

$$5 \log r_{p\odot}(r_{p\odot} - r_{T\odot}) \quad (3.7)$$

Per un pianeta molto lontano dal Sole, per cui valga la relazione $r_{T\odot} \ll r_{p\odot}$, si ha approssimativamente:

$$m_V = m_{V_0} + 10 \log r_{pT} \quad (3.8)$$

in cui m_{V_0} non dipende dalla distanza e gioca quindi il ruolo della magnitudine assoluta. Si vede quindi che la luminosità di un pianeta decresce all'incirca con la quarta potenza della distanza. Questo spiega, tra l'altro, la lentezza con cui si sono susseguite le scoperte di corpi nel Sistema Solare esterno (Plutone stesso è stato scoperto nel XX secolo).

Abbiamo fin qui parlato della luce solare che viene riflessa, ed il cui spettro, se A_λ non dipende dalla lunghezza d'onda, coinciderà ovviamente con quello solare. In realtà questa ipotesi è abbastanza drastica, e le proprietà di riflessione rendono piuttosto diversi gli spettri dei corpi planetari (non a caso, per esempio, Marte è stato tradizionalmente chiamato "il pianeta rosso"). Parte della luce viene invece assorbita e riemessa. Possiamo ipotizzare una situazione *a regime*, in cui il pianeta non si scaldi o raffreddi in media nel tempo, per concludere che in media l'energia assorbita sarà uguale a quella successivamente riemessa. L'energia sarà però riemessa ad una diversa lunghezza d'onda, secondo uno spettro legato alla temperatura del pianeta. Tale temperatura resterà sempre molto inferiore a quella solare, e lo spettro in questione sarà centrato nel lontano infrarosso.

Un'analisi più dettagliata del problema del riscaldamento dei pianeti da parte del Sole, e la stima delle loro temperature superficiali, richiedono una discussione approfondita.

Per una comprensione di massima, possiamo immaginare alcuni casi limite. Nel primo l'energia ricevuta si distribuisce uniformemente su tutta la superficie del pianeta, che si assesta quindi ad una ben precisa temperatura. Possiamo in questo caso definire la *temperatura efficace* del pianeta, nella usuale ipotesi di corpo nero. Sarà:

$$4\pi R_p^2 \sigma T_{eff,p}^4 = (1-A)\frac{L_\odot R_p^2}{4r_{p\odot}^2} = (1-A)\frac{\pi R_\odot^2 \sigma T_{eff,\odot}^4}{r_{p\odot}^2} R_p^2 \qquad (3.9)$$

da cui:

$$T_{eff,p}^4 = 0.25(1-A)R_\odot^2 T_{eff,\odot}^4 / r_{p\odot}^2 \qquad (3.10)$$

ossia

$$T_{eff,p} = \left(\frac{1-A}{4}\right)^{1/4} \left(\frac{R_\odot}{r_{p\odot}}\right)^{1/2} T_{eff,\odot} \qquad (3.11)$$

Ovviamente la realtà è più complessa di questo modello schematico. Effetti diversi e complessi determinano la temperatura superficiale e lo spettro di emissione nell'infrarosso di un pianeta. La temperatura $T_{eff,p}$ così calcolata costituisce comunque una prima importante e significativa indicazione, ma, per come è stata calcolata, tende certamente a sottovalutare la reale temperatura superficiale, almeno delle zone illuminate dal Sole. Una prima correzione è legata all'ipotesi fatta di emissione di corpo nero. Essa è ovviamente in contraddizione con l'assunto precedente, per il quale parte dell'energia viene immediatamente riflessa (un **corpo nero** è tra l'altro un perfetto assorbitore). Una stima più realistica della temperatura può essere ottenuta con il modello di *corpo grigio* ammettendo una distribuzione uguale a quella di un corpo nero ma con una diversa normalizzazione, corretta per tener conto degli effetti di riflessione. In sostanza la temperatura ($T'_{eff,p}$) sarebbe la stessa calcolata in precedenza ma senza il coefficiente $(1-A)^{1/4}$.

Una stima ancora più accurata non può che tener conto delle differenze di temperatura fra regioni diverse del pianeta, illuminate o meno dal Sole. Diventa necessario definire un vero e proprio **modello termico** del pianeta. Intanto le zone polari sono sistematicamente meno illuminate e quindi restano più fredde (ciò almeno è vero per pianeti il cui asse di rotazione è quasi perpendicolare al piano dell'orbita; non vale, ad esempio, per Urano). Il problema più complesso è quello della escursione termica *diurna* nelle zone in cui si alternano le fasi di luce

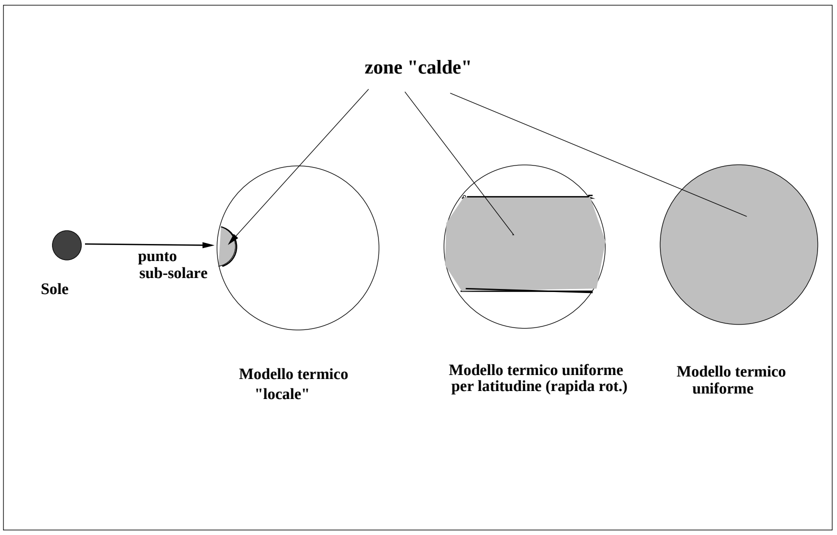

Figure 3.3: Schema dei modelli termici; a sinistra modello “a spot” in cui il riscaldamento solare resta confinato alla zona direttamente illuminata; al centro il caso (realistico per corpi rapidamente rotanti) in cui il calore solare si distribuisce uniformemente nelle zone di uguale latitudine; a destra il caso estremo di riscaldamento uniforme

e di ombra. Per corpi velocemente rotanti o in presenza di una atmosfera l'escursione termica può essere relativamente modesta (sulla Terra è di regola ben sotto al 10%). In caso contrario la zona illuminata può avere una temperatura molto più alta. Al limite si può pensare ad una temperatura legata ad un equilibrio termico **locale**. Ripercorrendo i calcoli discussi in precedenza, è possibile stimare allora una nuova temperatura, funzione della posizione. Nel *punto sub–solare*, vale a dire nel punto che vede il Sole allo zenit, si può allora ottenere una nuova stima della temperatura (T_{ss}) che può essere calcolata come $T'_{eff,p}$ ma togliendo il coefficiente iniziale $4^{-1/4}$:

$$T_{ss} = \left(\frac{R_\odot}{r_{p\odot}}\right)^{1/2} T_{eff,\odot} \tag{3.12}$$

Quest'ultima stima di temperatura costituisce un limite superiore per la temperatura all'esterno di un pianeta. Potrebbe al limite non essere ancora del tutto indicativa della temperatura superficiale, se siamo in presenza di una atmosfera sufficientemente spessa e di alta capacità termica. In tal caso la temperatura superficiale è determinata da un complesso equilibrio Sole–atmosfera planetaria–pianeta ed entrano in gioco effetti complessi (“Greenhouse”); si veda anche la discussione nel Cap.8. In generale la temperatura superficiale non è calcolabile con un modello elementare, e può essere anche più alta di quanto non ci si aspetti. Per molti pianeti, peraltro, dall'esterno si vede un mix dell'atmosfera in senso stretto e della superficie solida: si pensi anche alle immagini della Terra dallo spazio: in parte nubi, in parte continenti e mari.

3.3 I pianeti maggiori.

La definizione di pianeta contiene un margine intrinseco di ambiguità. Dal punto di vista dinamico infatti potremmo considerare pianeta qualunque corpo in orbita intorno al Sole. La distinzione fra pianeti e corpi minori è dinamicamente priva di senso, ed è basata tradizionalmente sulla differenza di dimensioni. Dopo una lunga storia di scoperte di nuovi pianeti fino a Plutone, la situazione si è complicata quando sono stati scoperti molti corpi in orbita nella zona transnettuniana, alcuni dei quali con orbite molto simili a quella di Plutone, e altri molto grandi. La situazione è precipitata con la scoperta che almeno uno di questi oggetti è probabilmente più grande di Plutone. Dopo lunghe discussioni, l'Unione Astronomica Internazionale (IAU) ha deliberato (non senza opposizioni) nell'estate del 2006 una nuova definizione di pianeta.

Un pianeta è un corpo celeste che:

- è in orbita attorno al Sole (o alla sua stella di riferimento, per un pianeta extrasolare);
- è abbastanza massiccio da essere dominato dalle forze gravitazionali ed ha quindi una forma vicina a quelle di equilibrio definite dall'idrostatica, sferiche o ellissoidali, a seconda dello stato rotazionale [5, Cap.1; si veda anche il Cap.6];
- Ha completamente –o quasi– "ripulito" la regione del Sistema intorno alla sua orbita (nella quale quindi non ci devono essere oggetti di dimensioni confrontabili, nè sistemi di oggetti la cui massa complessiva sia paragonabile a quella del pianeta).

Con questa definizione i pianeti maggiori si riducono al numero di otto.

Non è qui il caso di entrare nei dettagli relativamente alle caratteristiche dei singoli pianeti e dei loro satelliti, la conoscenza dei quali è stata enormemente arricchita dalle esplorazioni condotte, negli ultimi anni, dalle sonde planetarie. I pianeti sono ovviamente i corpi più interessanti del Sistema Solare. Nondimeno il loro modesto numero non permette di compiere un vero e proprio studio comparativo e di classificarli, a parte la banale e nota divisione in *pianeti terrestri* (da Mercurio a Marte) ed *esterni* (da Giove in poi). Alcune proprietà generali saranno discusse nel contesto delle teorie di formazione del Sistema Solare. Ci limitiamo a riprodurre nelle tabelle alcuni dati relativi alle loro caratteristiche generali.

Per immagini dei pianeti maggiori, ottenute dallo spazio, si consulti per esempio l'indirizzo http://photojournal.jpl.nasa.gov/ da cui è tratta, a titolo di esempio, la Figura 3.4, rappresentante un fotomosaico di Mercurio.

Per i commenti sui dati elencati nelle tabelle, si veda anche [1,cap.14]; si notino in particolare:

- La distribuzione dei semiassi maggiori ("legge di Titius–Bode"; v.cap.6 per l'interpretazione fisica): i semiassi maggiori delle orbite planetarie sono disposti in una approssimativa progressione geometrica; le deviazioni dalla progressione sono legate alla massa, nel senso che i pianeti piú massicci hanno una distanza maggiore dai loro "vicini".
- In generale le eccentricità e le inclinazioni sono piuttosto modeste; l'unico pianeta con eccentricità superiore a 0.1 è Mercurio (fino a qualche anno fa si ricordava anche Plutone, che però oggi non è più classificato come pianeta). Si noti anche che le proprietà orbitali attuali dei pianeti potrebbero essere diversa da quelle che avevano all'atto della loro formazione; in particolare si pensa che un processo di "migrazione" abbia spostato verso l'interno l'orbita di Giove e verso l'esterno quelle degli altri pianeti esterni.

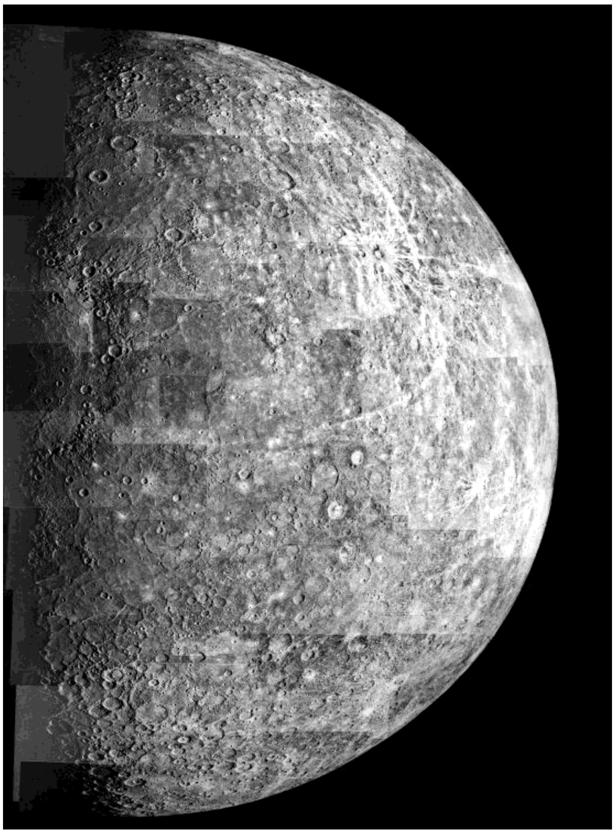

Figure 3.4: Fotomosaico parziale di Mercurio (dall'archivio immagini della NASA)

Pianeta	$r_{p\odot}/10^8 km$	$R_p/10^3 km$	e	$i(deg)$	A	$T'_{eff,p}$	$P_{rot}(d)$	ϵ	m_V	H
Mercurio	0.58	2.44	0.21	7	0.11	447	58	0.1	—	-0.42
Venere	1.08	6.05	0.007	3.4	0.65	328	243	177	—	-4.40
Terra	1.50	6.38	0.017	0.	0.37	278	0.99	23	—	-3.86
Marte	2.28	3.40	0.093	1.85	0.15	226	1.02	25	-2.01	-1.52
Giove	7.78	71.5	0.048	1.30	0.52	122	0.41	3	-2.70	-9.4
Saturno	14.3	60.0	0.056	2.49	0.47	90	0.44	26.7	+0.67	-8.88
Urano	28.7	25.6	0.046	0.77	0.51	64	0.71	98	+5.52	-7.19
Nettuno	45	24.8	0.009	1.77	0.41	51	0.67	29	+7.84	-6.87

Table 3.1: I pianeti maggiori. Oltre ai dati relativi agli elementi orbitali, alle dimensioni e all'albedo, è riportata la una delle stime di temperatura superficiale discusse nel testo (quella "di corpo grigio"). Si hanno inoltre, ovviamente per i soli pianeti esterni, la magnitudine all'opposizione e H, che per i corpi planetari svolge il ruolo di magnitudine assoluta, essendo calcolata eliminando la dipendenza dalla distanza (è tipicamente la magnitudine all'opposizione –per i pianeti esterni alla Terra– a distanza di 1 U.A.). Vengono infine riportati periodo di rotazione ed inclinazione dell'asse di rotazione rispetto all'orbita.

Pianeta	massa (g)	densità g/cm^3	costituenti dell'atmosfera
Mercurio	$3\ 10^{26}$	5.4	O_2, Na
Venere	$5\ 10^{27}$	5.2	CO_2
Terra	$6\ 10^{27}$	5.5	N_2, O_2
Marte	$6\ 10^{26}$	3.9	CO_2
Giove	$2\ 10^{30}$	1.3	H_2, He
Saturno	$6\ 10^{29}$	0.7	H_2, He
Urano	$9\ 10^{28}$	1.3	H_2, He, CH_4
Nettuno	$1\ 10^{29}$	1.6	H_2, He, CH_4

Table 3.2: I pianeti maggiori. Si riportano stime della massa, della densità media e l'elenco dei principali costituenti dell'atmosfera (dati ripresi da [1,cap.7]).

- Le proprietà rotazionali (periodo e inclinazione dell'asse di spin) sono piuttosto variegate. Tutti i pianeti, a eccezione dei due più interni, ruotano con un periodo dell'ordine del giorno. Il periodo di rotazione di Mercurio e di Venere è invece molto lungo, e sicuramente legato da qualche complesso accoppiamento dinamico con i periodi orbitali (quello di Mercurio è di circa 2/3 del periodo orbitale; quello di Venere è leggermente maggiore del periodo orbitale e la rotazione avviene in modo *retrogrado*. Gli altri pianeti girano di moto progrado (cioè nello stesso senso del moto di rivoluzione) a eccezione di Urano che ha un asse quasi perpendicolare al piano dell'orbita. Il fatto che il verso di rotazione dei pianeti sia di norma lo stesso del moto orbitale è probabilmente una conseguenza dei processi di formazione, ma non lo è in modo banale: un modello semplice di accumulazione planetaria porterebbe naturalmente a una rotazione prograda ma con un periodo dello stesso ordine del periodo di rivoluzione. L'orientazione degli assi dipende in anche da eventi collisionali stocastici nelle ultime fasi del processo di formazione (v. cap.6). Non va però sottovalutata l'importanza di complessi effetti dinamici (interazioni spin orbita, con eventuali casi risonanti); questi sono stati certamente decisivi non solo per Venere, ma per tutti e quattro i pianeti interni (. Cap.4).

Per esempio, l'asse di rotazione di Marte ha attualmente una inclinazione quasi uguale a quella terrestre. Nondimeno è stato dimostrato che l'asse di Marte può, su una scala temporale dell'ordine del milione di anni, oscillare da 0^0 a 60^0, con evidenti conseguenze sull'assetto climatico (si pensa che in alcune fasi evolutive sulla superficie di Marte ci sia stata acqua allo stato liquido, come sembra dimostrato anche da alcune evidenze geologiche). L'oscillazione dell'asse terrestre è invece molto minore, a causa dell'effetto frenante della **Luna**. Ciò ha un effetto di grande stabilizzazione del clima. Secondo alcuni Autori, anzi, la presenza di un grosso satellite come la Luna è un requisito essenziale per lo sviluppo della vita nelle sue forme avanzate (v. Cap.8, la ipotesi della "Rare Earth").

- Sono ovvie le differenze chimico–fisiche fra i quattro pianeti interni e quelli esterni (anche nella densità media), anche se i dettagli richiedono una più approfondita discussione (si veda il cap.6).

- Per i pianeti interni (e anche per la Luna) vale una sistematica correlazione fra massa e densità (con l'eccezione di Mercurio, che risulta troppo denso).

3.3.1 Struttura dei pianeti

- Mercurio

  Temperature da 100 a 700K $t_{rot} = 2/3t_{orb}$ visto dal sole, in un sistema corotante $t_{rot} = 2t_{orb}$. Composizione 70% metallico 30% silicati, densità $\rho > 5g/cm^3$.

  Il core occupa 42% del volume, molto ferro; mantello di silicati; crosta 100-300 km.

  Le caratteristiche sono compatibili con una "giant impact hypothesis".

- Venere

  Temperatura media alla superficie 460K; atmosfera al 96% CO2 poi azoto; molti vulcani.

  Core (fuso) mantello e crosta come la Terra

- Terra

  Crosta (silicati ignei, come il basalto, granito) 35km; mantello altamente viscoso di silicati con ferro e magnesio.

  Core liquido. Core interno solido? Ferro nickel molto abbondanti al centro.

- Marte

  Atmosfera tenue 96% CO2. Core (forse liquido?) di 1700km, composto da ferro, nickel e zolfo; mantello di silicati; crosta di 50-100km.

- Giove

  Atmosfera idrogeno/elio proporzioni solari; ma la metallicità Z all'interno è stimata intorno al 5%.

Produzione energia interna circa uguale a quella ricevuta dal Sole.

Core intorno al 10% con composizione mista (ex core roccioso poi mescolato?). Mantello idrogeno liquido, poi una profonda atmosfera.

- Saturno

  Core :ferro, nickel, rocce 25000 km; mantello idrogeno liquido; strato di idrogeno/elio liquido; atmosfera gassosa (prev. idrogeno e elio).

- Urano

  Atmosfera di idrogeno ed elio ma anche acqua, ammoniaca, metano (da qui il colore azzurrino).

  Densità media $\rho = 1.27 g/cm^3$: poco denso (solo Saturno lo è meno). All'interno 10% o anche meno di idrogeno e elio, una simile percentuale di materiale roccioso e il resto di ghiacci.

  Core:silicati, ferro, nickel roccioso, poco massiccio; mantello ghiacciato (acqua, ammoniaca, metano); esterno gassoso.

- Nettuno

  Atmosfera di idrogeno elio con azoto e idrocarburi, acqua, ammoniaca e metano; appare azzurro brillante; core e mantello simili a quelli di Urano

3.3.2 Pianeti e pianeti nani

Nella assemblea dell'IAU che ha approvato la nuova definizione di pianeta è stata anche decisa la introduzione di una nuova classe di oggetti, i "pianeti nani", che sono essenzialmente quelli che non rispettano il terzo requisito per essere definiti pianeti. Al momento la lista comprende Cerere, Plutone (che ha un satellite importante, Caronte – v. nel paragrafo seguente), il corpo inizialmente indicato con la sigla 2003UB313 (quello che ha provocato la messa in discussione del ruolo planetario di Plutone, essendo leggermente più grande di quest'ultimo) e che ha poi ottenuto la denominazione definitiva di Eris (Erinni: nella mitologia la dea della discordia), con il numero d'ordine 136199. Eris ha anche un satellite. Infine gli ultimi aggiunti sono il corpo, senza satelliti, scoperto nel 2005, e denominato Makemake (dal nome della divinità adorata a *Rapa Nui* - Isola di Pasqua) e Haumea (scoperto nel 2003, ha un nome dedicato alla dea Hawaiiana della nascita e delle fertilità). Quest'ultimo si caratterizza per una forma estremamente allungata e per un brevissimo periodo di rotazione (meno di 4 ore); la sua forma potrebbe essere una diretta conseguenza della sua rapida rotazione ed essere in sostanza una forma di equilibrio. Si ritiene che la sua struttura sia differenziata (un interno roccioso e una crosta ghiacciata). Haumea ha anche due satelliti.

Questa lista, è probabilmente destinata ad allungarsi sensibilmente in tempi brevi. Secondo alcuni studiosi del settore ci sono alcune decine di candidati che rispondono ai requisiti richiesti. Alcuni di questi oggetti sono probabilmente più grandi di Cerere.

Recentemente la IAU ha anche introdotto la denominazione di "Plutoide" riservata ai pianeti nani in orbita oltre Nettuno. Al momento solo Cerere è catalogato come pianeta nano e non come Plutoide.

Nome	$r_{p\odot}/10^8 km$	$R_p/10^3 km$	e	$i(deg)$	A	massa (g)	$P_{rot}(d)$	ϵ	m_V	H
Cerere	4.13	0.45	0.1	10	0.1	$9\ 10^{23}$	0.37	10	7.2	3.34
Plutone	59	1.2	0.25	17	0.55	$1.3\ 10^{25}$	6.38	122	15.12	-0.81
Eris	101.5	1.3	0.44	44	0.86	$1.7\ 10^{25}$			18.7	-1.12
Makemake	68.5	0.75	0.16	29	0.78	$4\ 10^{24}$			16.7	-0.48
Haumea	65.0	1.25[!]	0.19	23			0.16			

Table 3.3: Le caratteristiche (in qualche caso i dati sono preliminari o incompleti) dei pianeti nani. [!]Le dimensioni di Haumea sono quelle dell'asse maggiore: questo oggetto è piuttosto allungato, presumibilmente a causa della sua veloce rotazione. Ciò permetterebbe anche di stimarne la densità, dall'ipotesi che sia una forma di equilibrio.

3.4 Corpi minori del sistema solare: i satelliti.

Prendono il nome di *corpi minori* tutti quegli oggetti che non rientrano tra i pianeti veri e propri, indipendentemente dalle loro dimensioni (alcuni corpi minori sono più grandi di alcuni dei pianeti). La classificazione *per esclusione* mette insieme oggetti molto diversi fra di loro, quali i **satelliti**, che differiscono dai pianeti dal punto di vista dinamico, essendo vincolati ad orbitare intorno ad un pianeta (per estensione, possono essere inclusi nella categoria anche gli anelli planetari, presenti intorno a tutti i maggiori pianeti esterni, da Giove a Nettuno) e diversi gruppi di oggetti che sono da un punto di vista dinamico pianeti a tutti gli effetti, ma che non rientrano in questa categoria per ragioni di dimensioni e, in qualche misura, per convenzione. Tra questi gruppi segnaliamo gli **asteroidi**, le **comete**, gli oggetti detti **TNO** ("transnettuniani") o anche della **fascia di Kuiper-Edgeworth**. Dinamicamente rientrerebbero tra i corpi minori anche le **meteoriti** e gran parte delle **polveri interplanetarie**. Questi ultimi oggetti non sono però di diretto interesse astrofisico, in quanto non vengono di solito osservati da distanza, come succede per tutti gli astri, ma rivelati mediante misure *in situ* (nell'ambito di missioni spaziali) o raccolti e studiati quando cadono sulla Terra (come succede per le meteoriti).

Da un punto di vista scientifico l'importanza dei corpi minori è molto grande. Da un lato essi forniscono informazioni essenziali sui processi di formazione (anche se sarebbe semplicistico vederli come quello che resta dei "mattoni" originari); dall'altro il loro grande numero permette un approccio di tipo sistematico e statistico, che non è possibile per i pianeti, dominati dalle specifiche peculiarità. Sempre per lo stesso motivo (il grande numero) lo studio dei corpi minori permette di affrontare con abbondanza di dati e in tutta generalità le principali problematiche che riguardano **l'evoluzione** del Sistema Solare, vale a dire i processi collisionali e dinamici.

3.4.1 I satelliti; presentazione generale

I sistemi satellitari corrispondenti ai vari pianeti hanno caratteristiche abbastanza diverse, in parte accidentali e in parte conseguenti direttamente dalle caratteristiche dei pianeti e dalla loro collocazione nel Sistema Solare.

Per i pianeti interni è in linea di massima più difficile avere satelliti. Il processo di accrescimento che ha caratterizzato la loro formazione ha lasciato dietro poca materia circumplanetaria da cui formare dei satelliti. Inoltre la lentissima rotazione di Mercurio e Venere renderebbe dei satelliti instabili per evoluzione mareale, conducendoli a collassare verso il pianeta e a distruggersi (v. nel seguito per la discussione del processo fisico). Di fatto Mercurio e Venere non hanno satelliti, Marte ne ha due (Phobos e Deimos) piuttosto piccoli. La presenza della Luna, satellite di grosse dimensioni intorno alla Terra, è una anomalia, che infatti richiede una spiegazione *ad hoc*. Di solito le dimensioni di un satellite vengono valutate in unità della massa del pianeta, e la loro distanza in unità di raggi planetari. In questo senso la Luna è molto massiccia (oltre l'1% della massa terrestre) e piuttosto distante (circa 60 raggi terrestri). Satelliti di queste dimensioni orbitano intorno ai pianeti giganti (che però sono ben più massicci) ma sono di norma molto più vicini (in unità di raggi planetari). La Luna è quindi un oggetto particolare, con una peculiare storia di formazione. Anche se siamo in presenza di un dibattito ancora aperto, è ragionevole supporre che la Luna si sia formata a causa di un evento collisionale che avrebbe coinvolto la Terra nei primi tempi dopo la sua formazione. Un proiettile, non molto più piccolo della Terra (si stima una massa simile a quella di Marte), avrebbe colpito il nostro pianeta, proiettando nello spazio una grossa quantità di materia e dando così origine a un disco in orbita intorno alla Terra (si veda il cap.5, sulle collisioni, per capire come una collisione di queste proporzioni non comporti una completa distruzione della Terra, nonostante le speventose energie in gioco – milioni di miliardi di **megaton**). In parte la materia espulsa dalla Terra è ricaduta sulla Terra, in parte invece ha dato vita ad un satellite, inizialmente in un'orbita piuttosto stretta. Successivamente gli effetti mareali hanno causato il progressivo allontanamento della Luna, che continua anche oggi ($3.8cm/y$). Si noti che, se si fosse allontanata dalla Terra sempre con il ritmo attuale, la Luna risulterebbe ad una distanza circa dimezzata all'epoca presunta della sua formazione (4 miliardi di anni fa). In realtà, poichè gli effetti mareali, che causano questo allontanamento, dipendono fortemente dalla distanza, in passato il processo dovrebbe essere stato più rapido. Sulla base di un modello realistico di evoluzione mareale, basato sulla costanza dei parametri fisici connessi al fenomeno mareale, la Luna, addirittura, non potrebbe avere più di due miliardi di anni. Ciò non è probabile; è probabile invece che ci siano state in passato condizioni fisiche leggermente diverse, in particolare per quanto riguarda la struttura della parte superficiale della Terra (distribuzione di mari e continenti, ecc.).

A differenza dei pianeti interni, quelli esterni hanno invece tutti un grosso sistema di satelliti. Il numero dei satelliti scoperti aumenta progressivamente (soprattutto per merito delle missioni spaziali), ma probabilmente il numero di quelli con raggio superiore a $100km$ è ormai definito (5 per Giove e Urano, 9 per Saturno, 4 per Nettuno). Tra i pianeti nani è particolarmente interessante il satellite di Plutone (Caronte), piuttosto grosso, al punto che la coppia Plutone–Caronte, prima della recente ridefinizione, era stata definita come un "pianeta doppio". Il sistema Plutone–Caronte rappresenta un caso di completa sincronizzazione mareale (v. nel seguito per la discussione del processo fisico).

La struttura dei sistemi di satelliti dei pianeti maggiori presenta alcune caratteristiche comuni, legate alla comunanza di processi fisici di base. Discuteremo in questo capitolo della sincronizzazione mareale e introdurremo il cosiddetto "Limite di Roche", che identifica la zona in cui possono esistere satelliti autogravitanti. Questo limite spiega anche la collocazione dei sistemi di anelli all'interno dei sistemi di satelliti (v. nel seguito). Un altro processo spesso importante per i sistemi di satelliti sono le "risonanze", di cui parleremo anche nel Cap. 4. Le risonanze sono legate a commensurabilità fra i periodi caratteristici dei moti orbitali; le risonanze più semplici, quelle di **moto medio**, sono presenti quando due periodi orbitali stanno in un rapporto dato da una numero razionale, esprimibile quindi con una frazione. Più numeratore e denominatore della frazione sono piccoli più la risonanza ha effetti dinamici importanti.

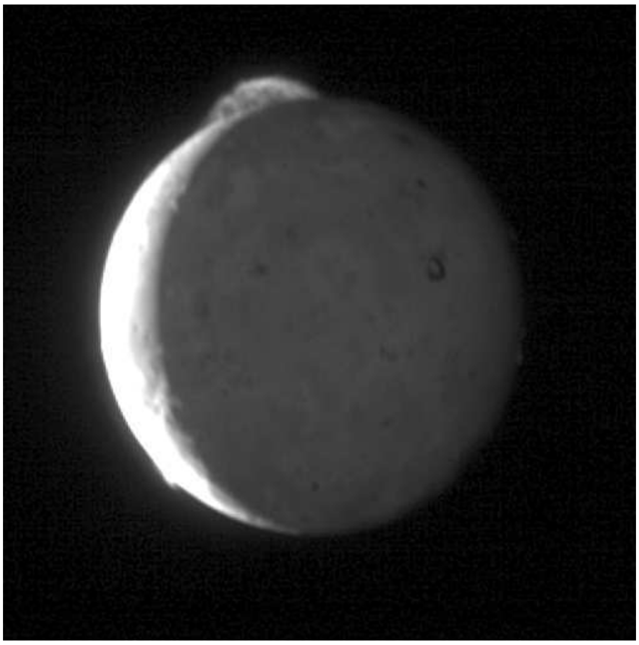

Figure 3.5: Io con la “plume” del vulcano Tvashtar (courtesy NASA/Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory/Southwest Research Institute).

Questi effetti possono, a seconda dei casi, stabilizzare o destabilizzare le orbite. Nel caso dei satelliti vediamo spesso coppie o gruppi di satelliti con orbite risonanti: un meccanismo che quindi, in questi casi, stabilizza e protegge dinamicamente le orbite.

Tra i satelliti di Giove (63 in tutto, alla data del 2009) i più rilevanti sono certamente i “Satelliti Medicei” scoperti da Galileo nel 1610. Quattro giganti (Ganimede è il più grande di tutti i satelliti, con un raggio di $2600 km$, più di Mercurio e non tanto meno di Marte), caratterizzati da interessanti peculiarità superficiali. Su Io (il più interno dei quattro, 1800 km di raggio) è stata osservata la prima eruzione vulcanica extraterrestre in atto.

Europa potrebbe avere un oceano sotterraneo di acqua, e non essere quindi incompatibile con la formazione o la sopravvivenza di forme elementari di vita. Da notare una sistematica tendenza ad aumentare la presenza di ghiacci all’aumentare della distanza da Giove. Il motivo è, in misura ridotta, analogo a quello che causa la diversa composizione chimica dei pianeti. Anche se Giove non ha una emissione di energia paragonabile a quella solare, i suoi effetti sono stati sufficienti a causare una differenziazione “termica” dello spazio circostante.

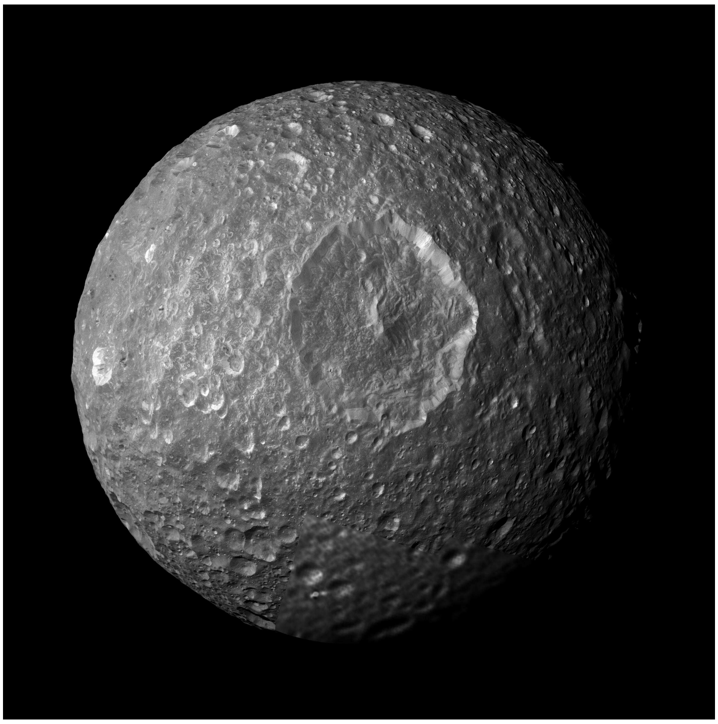

Figure 3.6: Mimas e il suo cratere gigante (courtesy NASA/JPL - Cassini Team).

Nel sistema di Giove è rilevante la risonanza tripla fra Io, Europa e Ganimede, che coinvolge sia i periodi orbitali sia il moto del pericentro; si ha in particolare per i moti medi:

$$n_I - 3n_E + 2n_G = 0 \tag{3.13}$$

Si pensa che Io ed Europa siano entrati in risonanza per primi, e siano poi evoluti fino a coinvolgere anche Ganimede nella risonanza.

Il sistema satellitare di Saturno (al momento 48 sono i satelliti catalogati, nove tra i quali con raggio maggiore di $100km$) presenta diversi una struttura non meno complessa (caratterizzata anche da diverse risonanze; si ricordi fra tutte la risonanza di moto medio 4/3 fra Titano e Iperione) e diversi oggetti interessanti.

Il più interno dei satelliti maggiori, Mimas, è notevole per la presenza sulla sua superficie, di un cratere molto grande, che ne domina un emisfero; un cratere che ricorda l'importanza dei processi collisionali e la possibilità di urti con proiettili in gradi di alterare significativamente il bersaglio, quando non di distruggerlo (si veda il Cap. 5).

Interessante è anche il più esterno dei satelliti maggiori, Phoebe, che si muove su una orbita

Figure 3.7: Un lago (di etano/metano liquido) di Titano a confronto con il Lago Superiore del Nord America (courtesy NASA/JPL).

molto larga (quasi $1.3\,10^7 km$ di semiasse maggiore) e retrograda, probabile testimonianza di un antico processo di cattura.

Tra i satelliti di Saturno spicca per dimensioni e interesse scientifico Titano, recentemente studiato dal lander "Huygens" della missione ESA-NASA "Cassini". Sotto una spessa atmosfera la superficie di Titano sembra essere parzialmente ricoperta da laghi di idrocarburi (prevalentemente etano). È molto interessante anche il suo vicino Iperione, oggetto dalla forma e dalle proprietà rotazionali irregolari, che probabilmente registra nella sua storia "recente" (in senso astronomico) un evento collisionale distruttivo. I frammenti del proto–Iperione sarebbero in gran parte caduti su Titano, anche a causa delle caratteristiche particolari del sistema, in risonanza, invece di ricadere –come sarebbe stato normale– prevalentemente su Iperione, che non ha potuto così recuperare una forma più regolare; a livello di ipotesi, questa pioggia di frammenti, ricaduti nel giro di un migliaio di anni, potrebbe avere anche a che fare con le caratteristiche peculiari dell'atmosfera di Titano.

Interessante anche Giapeto per le proprietà superficiali (due emisferi completamente diversi).

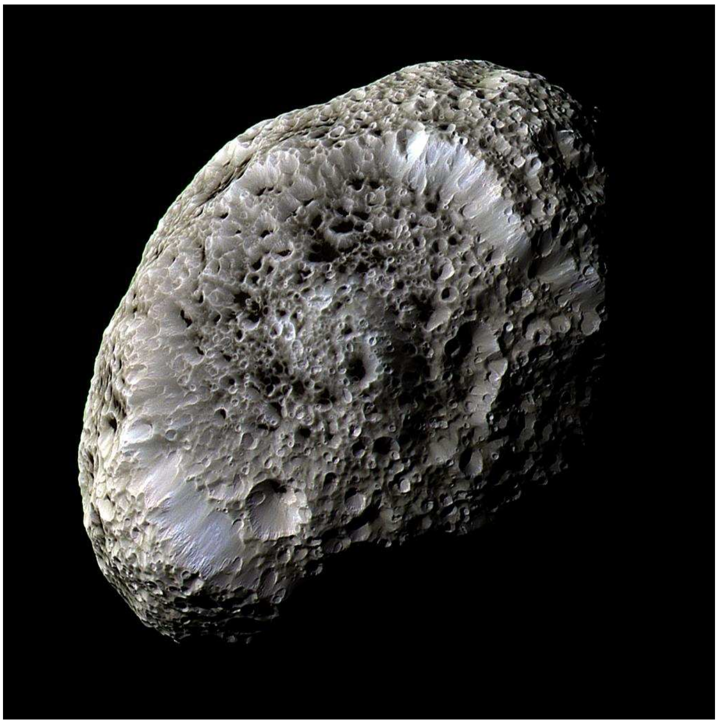

Figure 3.8: Iperione (courtesy NASA/JPL - Cassini Team).

Tra i satelliti dei due pianeti esterni il più grande è nettamente il satellite nettuniano Tritone, le cui caratteristiche orbitali suggeriscono una storia di formazione peculiare (potrebbe essere stato "catturato").

Tutti questi corpi (con l'eccezione dei satelliti gioviani più interni) sono dominati composizionalmente da ghiacci (non solo d'acqua).

Tra i processi fisici importanti per la loro formazione ed evoluzione dobbiamo citare gli effetti mareali, discussi nei due paragrafi seguenti. Un altro interessante aspetto è la notevole frequenza di orbite "risonanti" (v. cap. 4 per la discussione teorica); i tre satelliti medicei più interni, e diversi satelliti di Saturno e Urano, sono coinvolti in risonanze di moto medio o più complesse. Si ritiene che l'abbondanza di queste situazioni risonanti testimoni una passata evoluzione orbitale.

3.4.2 Processi fisici rilevanti per i satelliti: la corotazione

Alcune proprietà generali dei satelliti possono essere capite mediante modelli relativamente semplici. Discuteremo di seguito perchè le forze mareali tendano a creare una condizione di corotazione di corpi interagenti, e perchè non possano esistere satelliti autogravitanti troppo vicini al loro pianeta.

Prendiamo in esame un sistema a due corpi. In presenza di forze mareali [v.1,2] tra corpi in rotazione generica, si attivano processi dissipativi nei due corpi (che possono quindi cambiare l'energia totale del sistema) dovuti agli attriti. Si pensi al caso Terra–Luna: l'onda di marea, essendo il periodo orbitale della Luna molto diverso da quello di rotazione della Terra, si muove sulla superficie terrestre, causando il sollevamento o l'abbassamento –soprattutto– del mare. Il processo è naturalmente dissipativo. Inoltre le forze mareali generano dei momenti di forza che permettono di trasferire momento angolare. Dimostriamo che, a momento angolare totale fissato, l'energia di un sistema a due corpi estesi è minima per la corotazione. L'energia totale di un sistema di due corpi in interazione gravitazionale, uno dei quali ruota con velocità angolare ω, e l'altro con velocità ω_1 sarà:

$$E = \frac{I\omega^2}{2} + \frac{I_1\omega_1^2}{2} - \frac{GM\mu}{2a} \tag{3.14}$$

mentre il suo momento angolare totale, somma del momento di spin del corpo maggiore e del momento orbitale, sarà:

$$L = I\omega + I_1\omega_1 + \mu\sqrt{GMa} \tag{3.15}$$

Per calcolare il minimo dell'energia (in funzione di a, ω e ω_1 sotto il vincolo della conservazione del momento angolare ($L = L_0$) si può usare il metodo dei moltiplicatori di Lagrange, cercando i punti stazionari della funzione:

$$f(\omega, \omega_1, a, \lambda) = \frac{I\omega^2}{2} - \frac{GM\mu}{2a} + \frac{I_1\omega_1^2}{2} + \lambda(I\omega + I_1\omega_1 + \mu\sqrt{GMa} - L_0) \tag{3.16}$$

Le quattro derivate danno:

$$\frac{\partial f}{\partial \omega} = I\omega + \lambda I = 0 \tag{3.17}$$

$$\frac{\partial f}{\partial \omega_1} = I\omega_1 + \lambda I = 0 \tag{3.18}$$

$$\frac{\partial f}{\partial a} = \frac{GM\mu}{2a^2} + \frac{\lambda\mu\sqrt{GM}}{2\sqrt{a}} = 0 \tag{3.19}$$

mentre la quarta $\partial f/\partial\lambda = 0$ riporta alla condizione vincolare $L = L_0$. Dalle prime due equazioni si ottiene $\lambda = -\omega = -\omega_1$ che, inserita nella 3.18 dà come condizione di azzeramento:

$$\omega^2 a^3 = GM \tag{3.20}$$

che coincide con la III legge di Keplero se $\omega = \omega_1$ è ora non più la velocità angolare di spin dei due corpi ma quella del moto orbitale. Ne consegue che i punti stazionari dell'energia richiedono la corotazione.

Sempre nell'ambito dello stesso modello, cerchiamo di capire quando questi punti stazionari corrispondano a dei minimi, e quindi a delle configurazioni stabili. A tale scopo possiamo calcolare la dipendenza del momento angolare totale L dal semiasse maggiore a **sotto l'ipotesi della corotazione**. Con semplici sviluppi si ha:

$$L = (I+I_1)\omega + \mu\sqrt{GMa} = (I+I_1)\sqrt{GM}a^{-3/2} + \mu\sqrt{GMa} = \sqrt{GM}[(I+I_1)a^{-3/2} + \mu\sqrt{a}] \tag{3.21}$$

che ha un unico punto stazionario per $a = \sqrt{\frac{3(I+I_1)}{\mu}}$; il punto è di minimo, come si dimostra calcolando la derivata seconda, e corrisponde a un momento angolare totale L_0 . Per $L < L_0$ non abbiamo soluzioni, e quindi non è possibile nessuna configurazione corotante. Se invece $L > L_0$ si hanno, per un dato momento angolare, due soluzioni corotanti, corrispondenti a due diversi valori del semiasse maggiore. Si può dimostrare che quella corrispondente al valore minore di a (*corotazione interna*) corrisponde a un massimo dell'energia e quindi a una situazione instabile, mentre quella esterna corrisponde a un minimo. Se il sistema è inizialmente più stretto della corotazione interna evolverà verso un collasso del satellite sul pianeta, se è tra le due corotazioni evolverà verso la corotazione esterna, mediante un progressivo aumento del semiasse maggiore dell'orbita, se è ancora più largo l'evoluzione sarà verso l'interno. I tempi richiesti, legati all'efficienza dei processi dissipativi indotti dalle forze mareali, possono essere anche proibitivamente lunghi, specialmente se le distanze sono grandi. Nel caso Terra–Luna si è raggiunta la sincronizzazione del moto di spin della Luna e di quello orbitale. La sincronizzazione spin della Terra – moto orbitale della Luna richiederebbe tempi molto lunghi, anche confrontati con la vita del Sistema Solare, anche se l'effetto di trasferimento di momento angolare è effettivamente misurabile. Nel caso del sistema Plutone–Caronte, invece, la sincronizzazione è stata raggiunta.

3.4.3 Processi fisici rilevanti per i satelliti: il limite di Roche

Il modo più semplice per capire perchè un satellite autogravitante non possa orbitare troppo vicino al suo pianeta è la discussione del "limite di Roche".

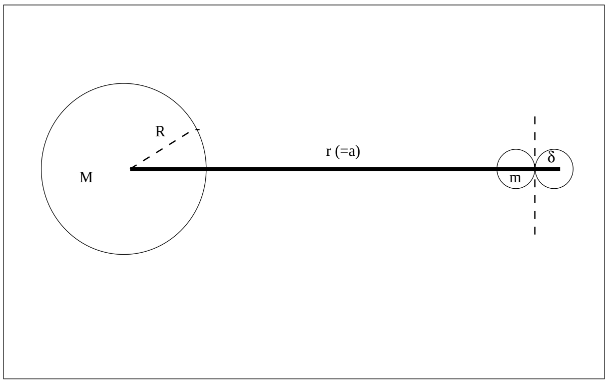

Figure 3.9: Schematizzazione per il calcolo del limite di Roche.

Il limite di Roche può essere qualitativamente dedotto studiando le equazioni del moto di due sferette di massa m in orbita a distanza $r-\delta$ e $r+\delta$ da un centro di massa M. Esse possono orbitare di conserva se la mutua gravitazione è sufficientemente grande.

La condizione di equilibrio per le due componenti sarà:

$$-\frac{GM}{r^2\left(1-\frac{\delta}{r}\right)^2}+\omega^2(r-\delta)+\frac{Gm}{4\delta^2}=0=-\frac{GM}{r^2\left(1+\frac{\delta}{r}\right)^2}+\omega^2(r+\delta)-\frac{Gm}{4\delta^2} \tag{3.22}$$

da cui, sommando le due equazioni, si ottiene:

$$\omega^2 r=\frac{GM}{2r^2}[1/(1+\delta/r)^2+1/(1-\delta/r)^2] \tag{3.23}$$

che, se $\delta/r \ll 1$, permette di ritrovare al primo ordine la terza legge di Keplero per il centro di massa:

$$\omega^2=GM/r^3 \tag{3.24}$$

Nella stessa approssimazione, calcolando la differenza fra le due equazioni relative all'equilibrio delle singole componenti, si ottiene:

$$\frac{Gm}{2\delta^2}=-\frac{GM}{r^2}\left[\frac{1}{1+\frac{2\delta}{r}}-\frac{1}{1-\frac{2\delta}{r}}\right]+\omega^2\Big[(r+\delta)-(r-\delta)\Big]= \tag{3.25}$$

$$=-\frac{GM}{r^2}\left[1-\frac{2\delta}{r}-1-\frac{2\delta}{r}\right]+2\omega^2\delta=\frac{GM}{r^3}4\delta+2\omega^2\delta \tag{3.26}$$

ed essendo $\omega^2 \sim \frac{GM}{r^3}$ l'espressione a secondo membro è $\sim 6\frac{GM}{r^3}\delta$.

Si ottiene infine:

$$\frac{m}{M}\geq 12\left(\frac{\delta}{r}\right)^3 \tag{3.27}$$

Se definiamo (nel caso di un pianeta e del suo satellite):

$$M=\rho_p\frac{4}{3}\pi R_p^3 \tag{3.28}$$

e

$$m = \frac{4}{3}\pi\rho_s\delta^3 \tag{3.29}$$

la condizione precedente diventa equivalente a porre

$$\frac{\rho_s\delta^3}{\rho_p R_p^3} \geq 12\frac{\delta^3}{r^3} \tag{3.30}$$

ossia

$$r \geq R_p(12\rho_p/\rho_s)^{1/3} \tag{3.31}$$

Facendo i calcoli con un modello più accurato si ottiene invece

$$r \geq 1.44R_p(\rho_p/\rho_s)^{1/3} \tag{3.32}$$

In sostanza $r = a$ (semiasse maggiore), e quindi l'equazione precedente limita inferiormente il valore di a per un satellite autogravitante. Ovviamente satelliti tenuti insieme da altre forze di coesione (per esempio quelli artificiali) possono sopravvivere anche a distanze minori. Un altro modo per ottenere il limite di Roche è quello di rispondere alla domanda: quando un satellite di raggio R sta dentro il proprio lobo di Roche? Dalle relazioni del cap.2 si ottiene sostanzialmente lo stesso risultato discusso qui sopra.

3.5 Gli anelli planetari

Galileo (1610) aveva riscontrato qualcosa di anomalo nella forma di Saturno. Quarantasei anni dopo Huygens interpretò le osservazioni in termini della presenza, intorno a Saturno, di un anello di materia, in grado di riflettere la luce solare. Ulteriori studi portarono alla scoperta delle "Divisioni di Cassini". Fino al 1977 solo Saturno aveva gli anelli. Successivamente sono stati scoperti gli anelli di Urano (fortuitamente, durante lo studio di una occultazione stellare, finalizzato ad una migliore stima delle dimensioni del pianeta), e poi, nel corso delle missioni spaziali, quelli di Giove (molto tenui e probabilmente effimeri) e quelli di Nettuno. I quattro pianeti maggiori hanno quindi tutti un sistema di anelli. I sistemi sono molto diversi tra di loro per caratteristiche e per struttura, ma alcune proprietà sono comuni: i sistemi, costituiti da un gran numero di particelle, per lo più di piccole dimensioni, sono di solito piuttosto sottili, e sono collocati a una piccola distanza dal pianeta. Questa seconda proprietà può essere interpretata in termini del limite di Roche (v. par. precedente), che in pratica pone un confine tra la zona degli anelli e quella dei satelliti (almeno di quelli grandi, e quindi autogravitanti; i ragionamenti fatti sopra non si applicano a corpi tenuti insieme da forze diverse da quella gravitazionale). La piattezza invece si spiega in base alle considerazioni discusse nel paragrafo successivo.

È anche interessante discutere brevemente le differenze. Gli anelli di Saturno sono piuttosto larghi, anche se le osservazioni spaziali hanno recentemente messo in evidenza l'esistenza di sottostrutture interne. L'esistenza di un anello largo è coerente con le idee fisiche generali discusse nel prosieguo, e va di pari passo con la "piattezza". Purtroppo gli altri anelli planetari sono diversi, e presentano strutture molto sottili. Questo fatto può essere interpretato in termini di processi dinamici più complessi, di cui parleremo. Un ulteriore problema riguarda la evoluzione temporale degli anelli. È probabile che gli anelli subiscano nel tempo un processo di impoverimento, ma che siano anche in parallelo arricchiti da materiale proveniente da altri corpi (satelliti) del sistema. L'esistenza oggi di un sistema di anelli sembra essere intimamente collegata alla compresenza di satelliti.

3.5.1 Processi fisici rilevanti per gli anelli: allargamento dissipativo e tempi scala

Un anello è composto da un enorme numero di particelle (per lo più di piccole dimensioni). Tra le particelle le collisioni sono ovviamente frequenti. I tempi collisionali possono essere facilmente stimati. Un anello fatto di grani di polvere o corpi macroscopici ha profondità ottica (che può essere stimata dalle osservazioni):

$$\tau = n_p \sigma H \tag{3.33}$$

dove n_p è la densità numerica delle particelle, σ la sezione d'urto geometrica e H lo spessore dell'anello. Si noti che la sezione d'urto dipende dal quadrato delle dimensioni tipiche delle particelle mentre la densità numerica, fissata la densità di materia, dipende dalla massa (e quindi dal volume)delle particelle: quindi, a parità di densità di materia, la profondità ottica è maggiore se le particelle sono piccole; a parità di profondità ottica, la densità di materia, e quindi la massa dell'anello, aumenta, ed è anzi proporzionale al raggio della particelle. Particelle grandi assicurano una adeguata profondità ottica solo se la massa totale è grande, e viceversa.

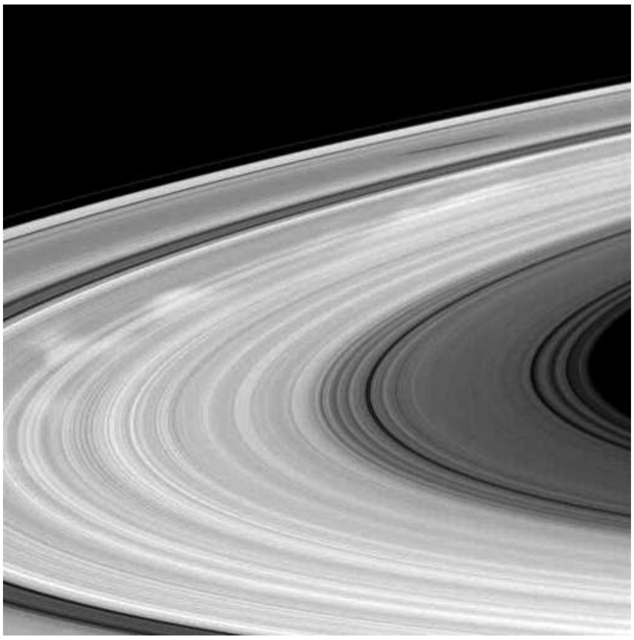

Figure 3.10: Gli anelli di Saturno (courtesy NASA/JPL - Cassini Team). Nella figura si possono anche notare regioni più luminose, e, in alto, si intravede anche l'ombra di un satellite (Mimas) sugli anelli.

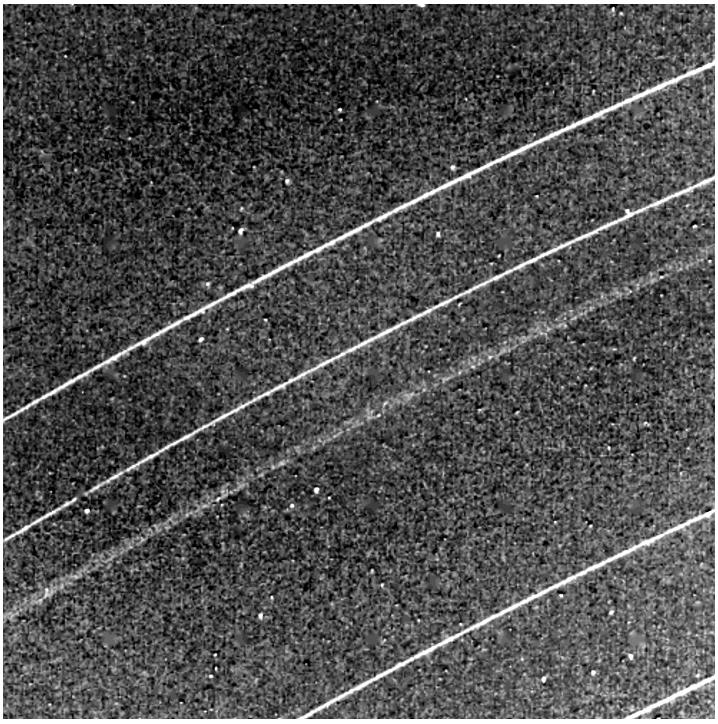

Figure 3.11: Gli anelli di Urano, dal Voyager (courtesy NASA/JPL).

Per lo più sappiamo che le particelle che compongono gli anelli planetari sono piccole, e quindi gli anelli hanno una massa non troppo grande.

Nel sistema la frequenza di collisione è:

$$\nu_c = n_p \sigma v_{rel} \tag{3.34}$$

dove la velocità relativa di collisione v_{rel} può essere stimata in termini della velocità angolare ωr (non usiamo qui la notazione n per evitare ambiguità nei simboli) e delle inclinazioni tipiche delle orbite (ammettiamo che le orbite siano circolari o che comunque l'effetto delle eccentricità non sia dominante) I^*:

$$v_{rel} \simeq \omega r I^* \simeq \omega H \tag{3.35}$$

da cui

$$\nu_c \simeq \omega \tau. \tag{3.36}$$

Se la profondità ottica non è molto diversa dall'unità i tempi scala collisionali sono dell'ordine di grandezza del tempo scala orbitale delle particelle dell'anello. Il sistema subisce quindi una rapida evoluzione collisionale e i processi dissipativi **non** possono essere troppo lenti (le collisioni non potranno mai essere perfettamente elastiche!).

La scala temporale così breve qui sopra stimata vale soprattutto per quanto riguarda lo schiacciamento dell'anello. Anelli non molto sottili sono quindi o estremamente giovani o dominati da effetti dinamici particolari o molto poco densi, cosicchè la evoluzione collisionale non è più un processo dominante. Quando l'anello è diventato molto sottile continuano ad avvenire collisioni, anche se a velocità più ridotta, che portano all'allargamento dell'anello, con una scala temporale maggiore di quella relativa allo schiacciamento, ma in ogni caso breve in confronto con l'età del Sistema Solare. Quindi un anello evolve rapidamente verso stati di minore energia.

Si può capire quello che succede mediante un modello semplice di disco "freddo" e sottile, in cui tutte le particelle percorrono orbite kepleriane, applicando le leggi di conservazione dell'energia E e del momento angolare L.

Si vuole studiare l'evoluzione di un anello a distanza minima r_0 dal pianeta e largo δr (che si assume relativamente piccolo, in modo da rendere ragionevoli degli sviluppi in serie e l'ipotesi di densità costante nella zona).

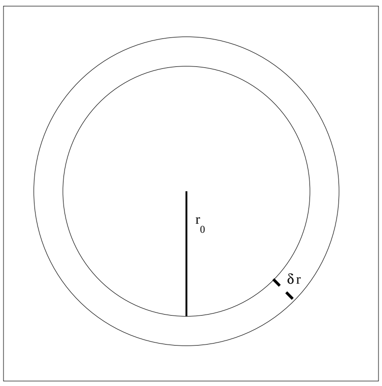

Figure 3.12: Modello di anello

Tale anello ha massa

$$m_r = 2\pi\rho H\delta r(r_0 + \delta r/2) \tag{3.37}$$

mentre ovviamente $dm = 2\pi\rho Hrdr$.

$$L = \int \sqrt{GM_p}r^{1/2}dm = \sqrt{GM_p}2\pi\rho H \int r^{3/2}dr \tag{3.38}$$

$$E = -1/2GM_p \int \frac{dm}{r} = -1/2GM_p 2\pi\rho H\delta r \tag{3.39}$$

Se volessimo concentrare tutta la materia ad una distanza data, la conservazione di L e E ci darebbe

$$L = \int \sqrt{GM_p}r^{1/2}dm = R_L^{1/2}\sqrt{GM_p}m_r \tag{3.40}$$

$$E = -\frac{1}{2}GM_p \int \frac{dm}{r} = -\frac{1}{2}\frac{GM_p}{R_E}m_r \tag{3.41}$$

Sviluppando i calcoli precedenti, e limitandoci al secondo ordine in $\delta r/r$, si ha:

$$R_L^{1/2} = r_0^{1/2}[1 + 3/4(\delta r/r_0) + 1/8(\delta r/r_0)^2]/[1 + (\delta r/2r_0)] = r_0^{1/2}[1 + 1/4(\delta r/r_0)] \tag{3.42}$$

da cui:

$$R_L = r_0[1 + 1/2(\delta r/r_0) + 1/16(\delta r/r_0)^2] \tag{3.43}$$

mentre

$$R_E = r_0[1 + (\delta r/2r_0)] \tag{3.44}$$

Ora

$$R_L = R_E + r_0(\delta r/4r_0)^2, \tag{3.45}$$

ossia

$$\frac{R_L}{R_E} \sim 1 + \left(\frac{\delta r}{4r}\right)^2 \tag{3.46}$$

Questo fa sì che la condensazione porti a dover superare un gap di energia

$$\Delta E \sim -\frac{GM_p m_r}{r}\left[\left(\frac{\delta r}{4r}\right)_f^2 - \left(\frac{\delta r}{4r}\right)_{in}^2\right] \sim \frac{GM_p m_r}{r}\left(\frac{\delta r}{4r}\right)_{in}^2 \tag{3.47}$$

In generale stringere un anello porta ad un livello di energia più alto. In linea di principio l'energia si può recuperare con quella gravitazionale dovuta alla cambiata struttura dell'anello):

$$\Delta E_{grav} \sim \frac{Gm_r^2}{r} \tag{3.48}$$

Ciò resta vero, almeno come ordine di grandezza, anche per anelli sufficientemente stretti e sottili, pur di non avvicinarsi troppo ai casi singolari (l'energia di legame di un anello infinitamente sottile diverge).

Perchè sia possibile stringere l'anello deve essere

$$\Delta E_{grav} \geq \Delta E \tag{3.49}$$

cioè

$$\frac{Gm_r^2}{r} \geq \frac{GM_p m_r}{r}\left(\frac{\delta r}{4r}\right)^2 \tag{3.50}$$

ossia

$$\frac{m_r}{M_p} \geq \left(\frac{\delta r}{4r}\right)^2 \tag{3.51}$$

Se un anello non è abbastanza massiccio (e quelli planetari non lo sono mai) qualunque processo dissipativo porta ad allargarlo nel tempo. Un anello stretto o è giovane o è molto massiccio o è tenuto stretto da qualche altro effetto.

3.5.2 Altri processi fisici rilevanti per gli anelli

Tra i processi fisici rilevanti per l'evoluzione dinamica degli anelli ci sono anche quelli legati all'interazione con la radiazione, come l'effetto **Poynting Robertson**, di cui parleremo più in dettaglio nel Cap.4. Tale effetto, insieme con altri, compresa la collisione con micrometeoriti, determina una progressiva erosione del materiale degli anelli, almeno per quanto riguarda le particelle più piccole; probabilmente però, come già detto, ci sono anche paralleli processi di rifornimento, causati da collisioni di micrometeoriti con satelliti vicini o con componenti più massicce dell'anello (piccoli satelliti dentro l'anello); il tutto fa sì che le caratteristiche degli anelli possano avere una dipendenza temporale e che quelli che osserviamo ora non siano costituiti dal materiale originario. Per maggiori dettagli si veda. [1,cap.14].

Un tipo di processi fisici rilevanti riguarda anche l'interazione dinamica fra satelliti e anelli. Vanno qui anticipate alcune idee che saranno riprese nella descrizione della dinamica del Sistema Solare (Cap.4) e nei modelli di formazione (migrazione planetaria; si vedano i Cap. 6 e 7). Come già detto e come discuteremo in dettaglio nel Cap. 4, effetti dinamici particolarmente intensi si hanno nei casi di risonanza. Le risonanze sono importanti, oltre che per quanto riguarda i sistemi di satelliti e anelli, anche per le fasce degli asteroidi e dei Transnettuniani (come discuteremo più oltre).

Nell'interazione anelli–satelliti giocano anche risonanze un pò più complesse, di cui daremo qui una rapida presentazione, e che avranno un ruolo importante anche nei problemi di formazione planetaria.

L'argomento in generale è questo. Come sappiamo (si veda il Cap.1) solo un moto esattamente kepleriano produce orbite chiuse. In presenza di perturbazioni il moto orbitale sarà più complesso. In prima approssimazione, e nell'ottica di una trattazione perturbativa (si veda il Cap.4), un moto orbitale può essere descritto in termini di un triplo moto periodico intorno ad una orbita circolare su un piano di riferimento, lungo l'orbita (con frequenza n), radiale o **epiciclico**, con frequenza

$$\kappa^2 = 2n/r \frac{d}{dr}(r^2 n) = 4n^2 + 2rn\frac{dn}{dr} \tag{3.52}$$

e perpendicolare all'orbita o **verticale** (con frequenza ν). Anche un moto kepleriano, come visto nel Cap.1, può essere descritto in questo modo, ma allora (si risolva la 3.52 nel caso kepleriano, ponendo $GM = 1$) le tre frequenze sono le stesse (per la precisione in quel caso il moto verticale può essere eliminato ponendoci nel piano dell'orbita). In presenza di perturbazioni, dovute alla presenza di altri corpi o di effetti di multipolo, le tre frequenze saranno in generale diverse. Nella descrizione della interazione fra un satellite e una particella facente parte dell'anello si dovranno quindi definire le terne caratteristiche del satellite (n', κ', ν') e quelle proprie della particella $(n.\kappa, \nu)$. Il potenziale perturbatore del satellite può essere rappresentato da una serie di Fourier con argomenti che definiscono una frequenza:

$$m\Omega_p = mn' + k\kappa' + p\nu' \tag{3.53}$$

dove $m \geq 0$ e k, p sono interi arbitrari.

Le risonanze si hanno quando alcuni argomenti sono stazionari, e permettono una accumulazione progressiva dell'effetto col tempo. I casi più interessanti sono:

- Corotazione con $m(n - \Omega_p) = 0$
- Risonanze di Lindblad –interna ed esterna– con $m(n - \Omega_p) = +/-\kappa$
- Risonanze verticali –interna ed esterna– con $m(n - \Omega_p) = +/-\nu$

La presenza di queste risonanze è cruciale per mantenere certe caratteristiche degli anelli. Per esempio il bordo esterno dell'anello B di Saturno coincide con una risonanza di Lindblad con Mimas. Le risonanze possono quindi aprire delle divisioni negli anelli, controbilanciando la naturale tendenza all'allargamento, discussa in precedenza. Possono anche eccitare onde di densità, che si osservano come variazioni a spirale della densità all'interno di un anello. Queste a loro volta esercitano un momento sui satelliti, causandone un progressivo allontanamento. Un effetto simile può spiegare la sopravvivenza di anelli stretti come quelli di Urano con l'esistenza dei cosiddetti "sheperd's dogs" (o "carabinieri") ossia dell'esistenza di piccoli satelliti, uno all'esterno uno all'interno dell'anello, che lo mantengono stretto mediante la loro forza gravitazionale. Si noti che le risonanze di Lindblad e verticali possono essere anche formulate in termini della combinazione delle frequenze orbitali e delle frequenze di circolazione di alcuni degli angoli che caratterizzano gli elementi orbitali.

Si veda per maggiori dettagli su questo e sui punti precedenti [1, cap.12,14].

3.6 Gli asteroidi

3.6.1 Introduzione

Vengono denominati asteroidi i corpi minori, non di tipo cometario (v. nel seguito) in orbita planetaria interna con semiasse maggiore minore o uguale a quello di Giove. Gli asteroidi hanno orbite per lo più comprese fra quella di Marte e quella di Giove (**Fascia Principale**). Date le loro dimensioni (il più grande, 1 Ceres, da poco riclassificato come pianeta nano, ha un diametro di circa 1000 km) essi vengono visti da terra come sorgenti puntiformi, anche se studi di fenomeni di occultazione di stelle o particolari tecniche di osservazione *(speckle interferometry, ottiche adattive)* consentono talora stime dirette delle loro dimensioni e delle principali caratteristiche superficiali di massima. La conoscenza è ovviamente enormemente migliore per i pochi asteroidi ($\simeq 10$) che sono stati avvicinati da sonde planetarie (per lo più durante il volo di avvicinamento ad uno dei pianeti esterni.

Lo spettro di riflessione (prevalentemente nel visibile) degli asteroidi risulta abbastanza diverso tra i vari oggetti e le sue caratteristiche sono,in linea di principio, utilizzabili per ottenere informazioni sulle caratteristiche fisiche e chimiche della superficie (anche se l'interpretazione dei dati non sempre risulta agevole). Ulteriori informazioni possono anche venire dallo studio dello spettro nell'infrarosso vicino. Date le modeste dimensioni di gran parte degli asteroidi (e la conseguente limitata luminosità) questi ultimi studi richiedono però l'uso di telescopi e strumenti avanzati, e sono quindi limitati a un numero ristretto di oggetti.

Gli studi fotometrici invece, di più facile conduzione, riescono a dare informazioni sulle proprietà rotazionali e –meno immediatamente– sulla forma degli asteroidi, che sono spesso abbastanza piccoli da non avere le forme regolari degli oggetti puramente autogravitanti.

Poichè gli asteroidi sono anche la principale sorgente delle meteoriti, si cerca anche di stabilire una correlazione tra le caratteristiche spettroscopiche degli uni e delle altre.

3.6.2 Classificazione delle orbite

Le caratteristiche dinamiche della fascia asteroidale sono abbastanza complesse, anche se –si ritiene– per lo più abbastanza ben comprese. In gran parte gli asteroidi, come detto, hanno orbite comprese tra quella di Marte e quella di Giove. Sono inclusi nel catalogo anche gli oggetti che si muovono su orbite più interne, incrociando o passando vicino all'orbita della Terra, e che prendono il nome di **NEO** (Near Earth Objects) o **NEA** (...asteroids), e costituiscono un importante oggetto di ricerca, per diversi motivi che saranno meglio discussi in seguito. Gli oggetti che invece incrociano l'orbita di Marte prendono il nome di **Mars Crossers**. Un altro gruppo interessante è costutuito dai cosiddetti **Troiani**, oggetti collocati nei punti lagrangiani L4 e L5 del sistema Sole–Giove (v. Cap.2).

Su tutta la fascia agisce in misura dominante la perturbazione di Giove, mentre gli effetti di Marte sono abbastanza localizzati alla regione più interna. Per i NEO ovviamente sono rilevanti anche gli effetti perturbativi della Terra e di Venere. Non trascurabili sono anche, in generale, gli effetti perturbativi di Saturno. Le perturbazioni di Giove e Saturno causano delle fluttuazioni a medio periodo (millenni) su eccentricità e inclinazione (effetti dell'ordine di, rispettivamente, 0.1 in eccentricità e 5–10 gradi in inclinazione; in alcuni casi gli effetti possono essere anche maggiori). L'eliminazione di questi effetti permette la definizione di quelli che vengono chiamati *elementi propri* (si veda il Cap.4) e che sono meglio rappresentativi delle proprietà dinamiche di quanto non siano gli *elementi osculanti*, che dipendono criticamente dal tempo in cui vengono calcolati dalle osservazioni.

Anche la distribuzione orbitale degli asteroidi nella Fascia Principale è più chiara se si lavora sugli elementi propri, e può essere rappresentata tenendo conto degli elementi a, e, I, mediante proiezioni bidimensionali nei piani $a - e, a - sinI$ (si usa questo più spesso dell'angolo I).

Appaiono alcune caratteristiche generali abbastanza evidenti.

- Gli asteroidi occupano regolarmente una fascia che si estende fino a valori $\simeq 0.3$ in $e, sinI$. Esistono oggetti più eccentrici e più inclinati (questi ultimi più numerosi) di questi valori, ma sono comunque una stretta minoranza.
- All'interno della distribuzione si notano alcune regioni quasi completamente vuote ("Gaps di Kirkwood") che sono associate a risonanze con Giove (v. nel seguito).
- Anche nelle zone non risonanti la popolazione non è omogenea, ma si distinguono numerose regioni di forte sovrappopolazione (le cosiddette "famiglie dinamiche"; v. nel seguito).
- La zona interna, più vicina a Marte, è quasi completamente spopolata. Nella zona esterna la popolazione collassa verso le 3.3 UA (in vicinanza della risonanza 2:1 con Giove) e per semiassi maggiori più alti esistono solo alcune regioni moderatamente popolate. La popolazione si tronca completamente molto prima di raggiungere il lobo di Roche di Giove.

I valori abbastanza elevati delle eccentricità e delle inclinazioni, a differenza di quanto avviene per i pianeti principali, e anche la mancanza di oggetti nella zona esterna della Fascia Principale, sono collegati a una sorta di "riscaldamento dinamico" probabilmente avvenuto nelle fasi finali del processo di formazione. Non si ha una teoria del tutto univoca, ma gli effetti che sembrano aver giocato sono

- lo "spazzamento delle risonanze", collegato con la probabile migrazione all'interno di Giove, avvenuta in queste fasi primordiali (v. cap. 6);
- lo scattering dovuto a planetesimi residui, legato alla presenza di nuclei protoplanetari residuati dal processo di formazione e selezione da cui sono nati i pianeti, e alla loro iniezione nella Fascia asteroidale dovuta alle interazioni con Giove, dove avrebbero alterato i valori dinamici medi, oltre a causare distruzione e alterazioni fisiche nell'ambito di eventi collisionali.

3.6.3 Risonanze

La teoria generale delle risonanze sarà discussa nel Cap.4. Le risonanze più semplici sono quelle "di moto medio". Per gli asteroidi il corpo esterno con cui si ha la risonanza è soprattutto Giove, e le risonanze di moto medio più importanti sono quelle caratterizzate da rapporti semplici, come 3/1, 5/2, 7/3 o 2/1 (si usa spesso anche la notazione n:m); il ruolo dinamico delle risonanze con rapporti diversi (per es. 27:11, che sta tra la 3:1 e la 5:2) è decisamente minore, anche se probabilmente non sempre trascurabile, specialmente se si vuole analizzare l'evoluzione dinamica su tempi molto lunghi, dell'ordine dell'età del Sistema Solare. L'effetto dinamico delle risonanze è complesso, ma, almeno nella fascia asteroidale, ha spesso come risultato finale lo spopolamento della zona risonante e la creazione della corrispondente "Lacuna" (o "Gap"). Sono importanti anche alcune "risonanze secolari" (v. Cap.4), come quelle chiamate ν_6 e ν_5. La ν_6, in particolare, è responsabile del bordo interno della Fascia Principale a inclinazioni diverse da zero, e gioca un ruolo essenziale nei meccanismi dinamici che portano all'immissione di asteroidi nella zona di transizione verso orbite tipo NEO (v. seguito).

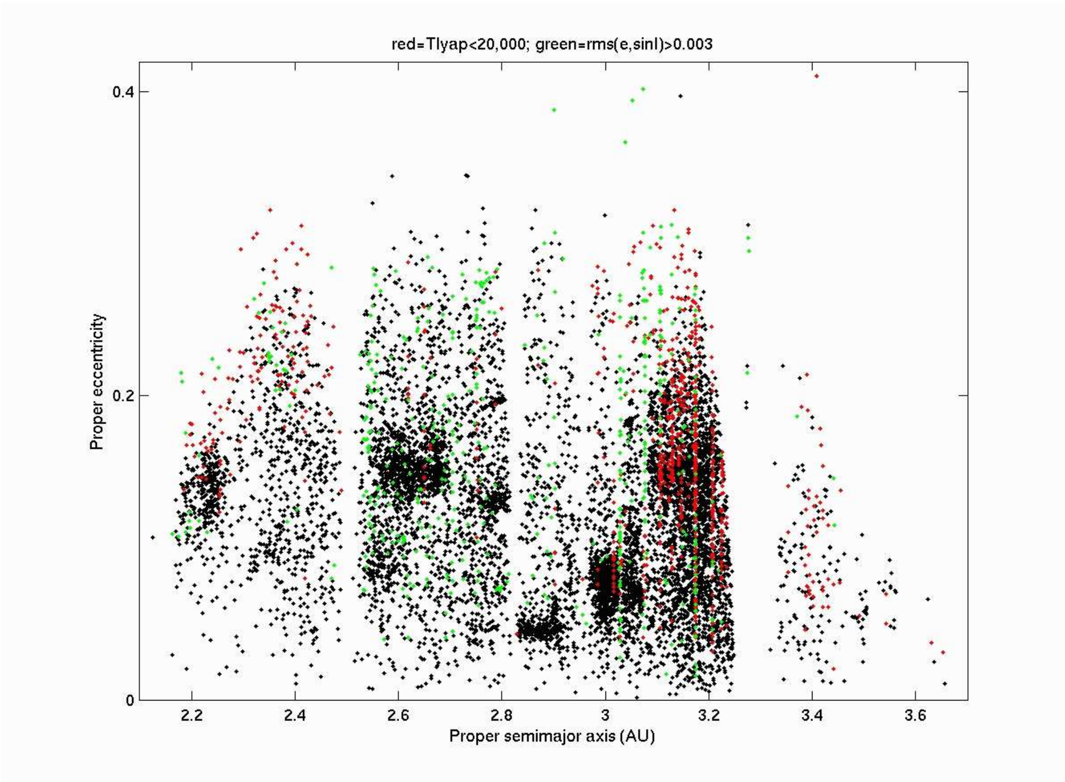

Figure 3.13: Distribuzione degli elementi propri nel piano a–e; gli elementi indicati in rosso o in verde corrispondono a oggetti meno stabili (rosso= tempo di Lyapounov piccolo, verde: rilevanti fluttuazioni in e, I; v. Cap.4)– dal sito Astdys.

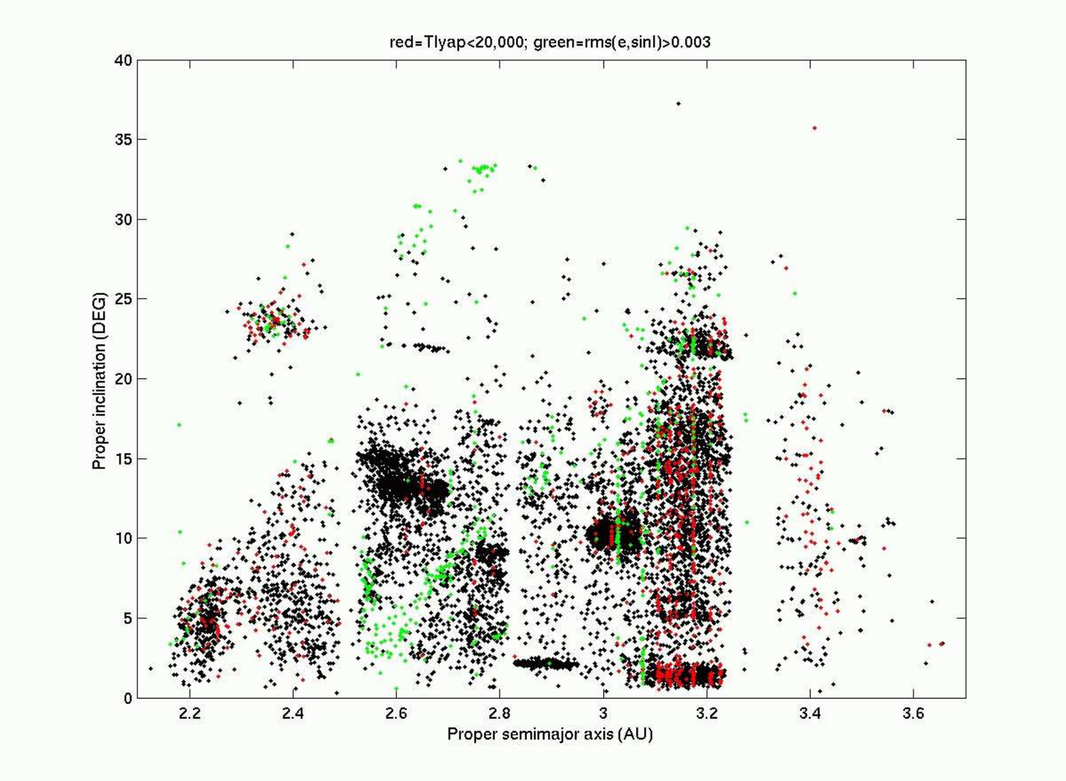

Figure 3.14: Distribuzione degli elementi propri nel piano a–sinI; gli elementi indicati in rosso o in verde corrispondono a oggetti meno stabili (rosso= tempo di Lyapounov piccolo, verde: rilevanti fluttuazioni in e, I; v. Cap.4)– dal sito Astdys.

3.6.4 Famiglie dinamiche

Nel secondo decennio del secolo scorso Hirayama osservò la presenza di addensamenti significativi nella distribuzione degli elementi orbitali (a, e, i). Questi addensamenti diventavano ancora più evidenti passando ai cosiddetti "elementi propri". Hirayama notò cinque di questi addensamenti, e dette loro il nome di "famiglie". Successivamente il database degli asteroidi è cresciuto di molto, e anche le tecniche di analisi si sono fatte più sofisticate. Sono state identificate diverse altre famiglie , e si sono anche viste delle "sottostrutture" all'interno delle famiglie più grandi. In alcuni casi questo ha portato a rivedere la classificazione, in altri a riconoscere la possibilità di una struttura gerarchica, teoricamente spiegabile.

La definizione e classificazione delle famiglie è, in prima istanza, indipendente dal modello fisico sottostante. In pratica si definisce una metrica, in uno spazio astratto a,e,i, e quindi si possono definire sia la distanza sia l'elemento di volume dV, e si stima la densità di oggetti $\rho^*(a, e, i) = dN/dV$, ottenuta in realtà da un insieme discreto di punti, e quindi computabile in elementi di volume finiti. In una distribuzione casuale degli elementi orbitali $\rho^*(a, e, i)$ mostrerebbe delle fluttuazioni statistiche intorno al valore medio. Se si confronta questa distribuzione stocastica con quella reale si vede che un certo numero di addensamenti sono ben al disopra del livello di fluttuazione random, sono statisticamente significativi e hanno quindi un preciso interesse fisico.

La definizione di metrica nello spazio degli elementi propri è però meno arbitraria se si comincia a dare una interpretazione fisica alle famiglie. C'è oggi un ampio consenso sulla origine collisionale delle famiglie, o almeno di gran parte di esse: alcune delle famiglie originali, come quella di Flora –il nome è quello dell'asteroide della famiglia più importante: meglio osservato, e quindi spesso anche il più grande – potrebbero essere dei "clan" con una origine più legata a processi dinamici tipici della loro regione di spazio. Le vere e proprie famiglie sono invece il prodotto di una collisione catastrofica che ha causato la distruzione (parziale o completa) dei due corpi collidenti, con la creazione di un insieme di frammenti espulsi a diverse velocità. In parte i frammenti si riaccumulano per effetto della mutua gravitazione, ma restano alla fine numerosi oggetti indipendenti, immessi su orbite diverse. Per la teoria delle collisioni e altri dettagli (p.es. la possibile formazione collisionale di sistemi binari o multipli) si veda il Cap.5. Nel Cap. 4 verrà invece dimostrato come oggetti partenti da uno stesso punto con diverse velocità relative, piccole rispetto alle velocità orbitali, si collochino su orbite i cui elementi "osculanti" (ossia calcolati al momento della formazione dei frammenti) a,e,i differiscono per una combinazione lineare delle componenti delle velocità. Le differenze fra elementi orbitali osculanti al momento della formazione producono, al primo ordine, identiche differenze fra gli elementi propri. Diventa quindi naturale definire una metrica nello spazio a,e,i che associ la "distanza" fra due orbite ad una stima della velocità relativa necessaria a produrle. In questo modo è possibile introdurre degli opportuni algoritmi di clustering (per esempio quelli "ad albero" che usano una tecnica non troppo dissimile da quella di percolazione), mettendo in un unico gruppo le coppie o le n–uple di oggetti aventi fra di loro distanze minori di un certo valore, e continuando con la crescita del cluster fino al livello delle fluttuazioni casuali. In questo modo è possibile identificare, con alta affidabilità statistica, alcune decine di famiglie nella Fascia Principale. Famiglie si possono poi trovare anche tra gli asteroidi "Troiani" o nell'altra importante fascia di corpi minori, quella dei Transnettuniani (v. nel seguito).

In realtà la attuale struttura delle famiglie nello spazio degli elementi orbitali è probabilmente il risultato del processo di formazione ma anche di una evoluzione dinamica successiva. Mentre gli elementi propri sono –o dovrebbero– essere costanti nel tempo a fronte delle interazioni gravitazionali con i pianeti maggiori, essi non tengono ovviamente conto di effetti non gravitazionali, come potrebbero essere ulteriori collisioni minori interne o esterne alla famiglia, e soprattutto effetti dovuti all'interazione con la radiazione solare, come l'effetto Yarkovsky (v. Cap.4). Questi effetti hanno come risultato complessivo quello di allargare la famiglia nello spazio degli elementi orbitali. Nel Cap. 5 il problema verrà discusso in dettaglio.

Le collisioni successive alla formazione possono anche, in alcuni casi, formare una mini-famiglia all'interno di quella originaria. È questo il caso della famiglia di Karin, inglobata nella famiglia –una di quelle di Hirayama– di Koronis, e che però si riesce a distinguere. Alcune proprietà della famiglia fanno propendere per una sua formazione recente (pochi milioni di anni fa). Le famiglie più grandi sono invece molto più antiche, con età che vanno da $10^8 y$ a tempi non molto inferiori all'età del Sistema Solare. Il problema della stima delle età delle famiglie è però ancora parzialmente aperto.

Le famiglie sono la più forte prova della evoluzione collisionale della fascia asteroidale. Altre prove sono l'esistenza di asteroidi doppi, la presenza di rotatori veloci tra i più grossi, e alcune caratteristiche della distribuzione delle proprietà rotazionali (v. seguito e Cap.5). L'evoluzione collisionale condiziona anche la distribuzione di massa degli asteroidi.

3.6.5 La distribuzione di massa degli asteroidi

La distribuzione di massa degli asteroidi dipende ovviamente da due fattori: la distribuzione di massa **originaria** con cui essi si sono formati, e le caratteristiche dei processi evolutivi che possano averla alterata nel tempo. La distribuzione iniziale di massa solo parzialmente può essere dedotta dalle osservazioni, fatte oggi, o dai modelli teorici di formazione del Sistema Solare. L'evoluzione successiva dipende essenzialmente dalle collisioni. Come vedremo nel Cap. 5, le collisioni possono avere conseguenze diverse: *erodere* il bersaglio, quando viene urtato da particelle molto piccole, formare *crateri da impatto*, o distruggere parzialmente o completamente il bersaglio. Si ritiene che queste ultime collisioni, dette **catastrofiche** siano quelle più importanti nell'influenzare la evoluzione nel tempo della distribuzione di massa.

Separare le caratteristiche originarie e quelle indotte dall'evoluzione collisionale è assai difficile e controverse sono le proposte presenti in letteratura. I casi limite sono quelli più semplici: se l'evoluzione collisionale non conta, la distribuzione osservata è quella originaria; se invece l'evoluzione collisionale domina le caratteristiche attuali, la distribuzione che noi osserviamo oggi ci dà soprattutto informazioni sulla fisica dei processi collisionali. In questo contesto si sviluppa l'idea della **collisional cascade**, modello sviluppato negli anni '70 da Donhanyi, e poi ripreso da molti altri autori.

Un modello supersemplificato può anche qui aiutarci. Dividiamo tutti gli asteroidi di Fascia Principale (anche "Main Belt", con abbreviazione **MB**) in due gruppi, i "grandi" e i "piccoli", con popolazioni rispettivamente N_1, N_2 e masse m_1, m_2, con $m_2 << m_1$. Gli asteroidi grandi NON vengono ripopolati e vengono invece progressivamente spopolati dalle mutue collisioni (si fa l'ipotesi che le collisioni dei piccoli sui grandi non abbiano effetti significativi):

$$\frac{dN_1}{dt} = -\alpha\sigma_1 N_1^2 \tag{3.54}$$

dove α è un coefficiente che dipende dal volume della fascia asteroidale e dalla velocità relativa di collisione (che in prima approssimazione non dipenderanno dalle dimensioni dei corpi coinvolti). Si noti che a secondo membro ci dovrebbe essere un coefficiente 1/2 per non contare due volte ogni collisione ma che questo coefficiente si semplifica con il coefficiente 2 conseguente dal fatto che in ogni collisione sono due i corpi facenti parte del campione a essere distrutti.

Gli asteroidi piccoli vengono spopolati dalle mutue collisioni (quelle con i grandi sono rare, se questi sono molto meno numerosi, come ci immaginiamo) e anche da un processo dinamico con vita media τ, e vengono ripopolati dai frammenti creati dalle collisioni dei grandi. Per ogni asteroide che viene distrutto si formano (m_1/m_2) frammenti della popolazione dei piccoli. In sintesi:

$$\frac{dN_2}{dt} = -\frac{N_2}{\tau} - \alpha\sigma_2 N_2^2 + (m_1/m_2)\alpha\sigma_1 N_1^2 \tag{3.55}$$

Se non teniamo conto del processo dinamico l'equazione si può riscrivere senza il primo termine a secondo membro. Cerchiamo ora, in queste ipotesi, uno stato stazionario per il quale il rapporto N_1/N_2 sia costante. Sarà:

$$d/dt(N_1/N_2) = 0 \rightarrow 1/N1(dN1/dt) = 1/N2(dN2/dt) \tag{3.56}$$

ossia:

$$-\alpha\sigma_1 N_1 = -\alpha\sigma_2 N_2 + m_1/m_2\alpha\sigma_1 N_1^2/N_2 \tag{3.57}$$

Definendo $N_1 = \gamma N2$ e riarrangiando si ha una equazione di secondo grado in γ:

$$\gamma^2 + (m_2/m_1)\gamma - m_2\sigma_2/(m_1\sigma_1) = 0 \tag{3.58}$$

Se le sezioni d'urto sono proporzionali a quelle geometriche, ossia alle rispettive masse elevate a 2/3 si ha $\sigma_1 = \sigma_2(m_1/m_2)^{2/3}$.

In termini di $q = m_2/M_1 << 1$ le soluzioni dell'equazione sono:

$$\gamma = -q/2(+/-)\sqrt{(q/2)^2 + q^{5/3}} \tag{3.59}$$

L'unica soluzione interessante è quella positiva. Inoltre, essendo $q << 1$ il termine con esponente più basso domina completamente, e si ottiene alla fine:

$$N_2 = (m_1/m_2)^{5/6} N_1 \tag{3.60}$$

Le popolazioni qui definite sono *cumulative* ossia riferite a diversi range di masse. Il range relativo alle masse grandi sarà naturalmente più grande, in ragione del rapporto di massa, di quello delle piccole. Si otterrà così la legge di potenza "alla Donhanyi" per la popolazione *differenziale*:

$$n(m) \propto m^{-11/6} \tag{3.61}$$

che esprime la stazionarietà di una popolazione con evoluzione collisionale in cui i processi collisionali scalino con la massa e la sezione d'urto con il raggio al quadrato.

Ovviamente, se invece $\tau \simeq 0$, N_2 diventa molto piccolo. La realtà sarà, come sempre, intermedia tra i due casi estremi.

Il modello qui descritto è molto rozzo, ma i suoi risultati sono uguali a quelli ottenuti con approcci più sofisticati. Una analisi più raffinata metterebbe però in evidenza quella che è l'ipotesi di fondo del modello, cioè lo "scaling" ideale: in altri termini, l'effetto di una collisione dipende **dal rapporto di massa** dei corpi collidenti: il rapporto minimo di massa necessario per una collisione catastrofica è indipendente dai valori assoluti delle due masse; naturalmente anche le masse dei prodotti di collisione scalano di conseguenza. Sotto questa ipotesi la legge di potenza alla Donhanyi rappresenta la condizione stazionaria, di evoluzione collisionale arrivata a regime.

La popolazione osservata non obbedisce ad una unica legge di potenza, ma l'esponente locale oscilla non lontano dai valori di Donhanyi. Da notare che il valore dell'esponente $q = 2$ divide i casi in cui la massa è prevalentemente ripartita fra i corpi piccoli e il caso opposto.

Infatti se si calcola la massa compresa in un certo range (M_{min}, M_{max}) si ha, per $q = 2$:

$$\int n(m)dm = \int m^{1-q}dm = log(M_{max}/M_{min}) \tag{3.62}$$

che diverge se la massa massima è infinita o se la massa minima è zero. Per valori sopra o sotto 2 si ottiene la differenza fra le due masse limite elevata ad una potenza positiva se $q < 2$ e negativa altrimenti. Se si divide il campione in bin di massa, per esempio ciascuno comprendente masse tra un certo valore e il suo doppio (o comunque un fattore costante) si vede facilmente che per $q < 2$ il bin corrispondente alle masse più alte contiene la parte più grossa della massa totale del sistema: il contrario succede per $q > 2$.

La distribuzione di massa degli asteroidi ha sicuramente un valore medio di $q < 2$, tanto è vero che la massa complessiva contenuta nel MB sembra essere solo due o tre volte la massa dell'asteroide più grande, Cerere (che è poco più di un decimillesimo di quella della Terra).

Le osservazioni ci dicono però che la distribuzione non è ben rappresentata da una legge di potenza. Si ha sicuramente un cambio di pendenza intorno a dimensioni di $\simeq 100km$ corrispondente a un eccesso di oggetti (**bump**) di questa taglia. Andando a dimensioni più piccole si entra ovviamente in un range nel quale non è lecito asserire di aver scoperto e osservato tutti gli asteroidi (siamo insomma al disotto del **diametro di completezza** –quantità di non facile stima, ma oggi probabilmente non lontana dalla decina di chilometri); la distribuzione ha di conseguenza un andamento più incerto, anche se alcuni Autori propongono l'esistenza di un secondo "bump" per diametri di pochi chilometri.

L'origine di queste caratteristiche sembra essere dovuta ad alcune cause principali:

1. La distribuzione di massa non è completamente a regime; solo gli oggetti più piccoli di una certa dimensione di soglia –che potrebbe essere intorno a $100 - -120km$ hanno raggiunto lo stato stazionario. Gli oggetti più grandi rappresentano la popolazione iniziale, solo parzialmente evoluta.

2. Non vale lo scaling: per oggetti più grandi le conseguenze di un impatto sono legate prevalentemente alla gravità, che può causare una totale o parziale riaccumulazione dei prodotti di collisione; inoltre corpi di dimensioni diverse possono avere una diversa resistenza alla frammentazione. Discuteremo questi problemi, e le incertezze che sussistono al momento, nel Cap.5. La transizione fra oggetti grandi –dominati dalla gravitazione–

e oggetti piccoli potrebbe essere la causa o del bump a $100km$ oppure del bump a $3km$; quello a $100km$ sarebbe invece conseguenza della transizione tra oggetti primordiali e popolazione evoluta, di cui sopra.

3. Processi di depopolazione selettiva. Vedremo nel Cap.4 che oggetti di piccole o medie dimensioni sono rimossi dal MB per effetti di vario tipo, dal *Poynting Robertson* (valido per corpi di dimensioni microscopiche) all'*effetto Yarkovsky*. Questo potrebbe causare delle diminuzioni della popolazione in certi range di dimensioni, con una ridotta evoluzione collisionale degli asteroidi che tali oggetti potrebbero distruggere...e così via: si può instaurare un meccanismo che provoca la propagazione di una sorta di "onda" sulla distribuzione di massa; un bump a piccole masse ne potrebbe successivamente causare uno a masse maggiori ecc.; la lunghezza d'onda sarebbe legata al rapporto di massa sufficiente per una collisione distruttiva.

Nel complesso sull'argomento ci sono ancora parecchi problemi aperti, che certamente potranno essere chiariti dal progresso delle osservazioni –soprattutto dall'inventario degli oggetti piccoli– e dei modelli teorici.

3.6.6 I NEO

Un gruppo di asteroidi molto importante e' quello dei cosiddetti NEO (Near Earth Objects) o NEA; divisi in diversi sottogruppi, sono sostanzialmente l'insieme dei corpi minori la cui orbita avvicina o incrocia quella terrestre.

L'importanza dei NEO è data da diversi aspetti:

- Passano vicini alla Terra, e possono anche urtarla. Ovviamente lo stesso può avvenire da parte di frammenti, da essi staccatisi; le meteoriti sono sostanzialmente dei (per fortuna piccoli) NEO caduti a terra. Si stabilisce quindi diretto legame fra NEO e meteoriti, che dovrebbero differire solo per il modo e il momento in cui si osservano –nello spazio o a terra, con l'ovvio effetto di selezione per cui oggetti troppo piccoli non si riescono a vedere mentre sono in volo.

- A causa del loro passaggio anche a distanza molto piccola dalla Terra possono consentire osservazioni molto sofisticate da terra o dallo spazio, anche con tecniche particolari; es. radar. Sono al momento l'unico modo per estendere la conoscenza degli asteroidi sotto il chilometro di diametro.

- I NEO non sono originari della parte del Sistema Solare in cui li osserviamo. Anche se il problema non è completamente chiarito, una parte molto grande proviene dalla fascia principale degli asteroidi. Gli altri hanno un'origine diversa, anche da comete estinte ecc.

- L'origine asteroidale di molti NEO permette un confronto fra questi e gli asteroidi della fascia principale, e anche un confronto a tre fra asteroidi, NEO e meteoriti (si veda nel seguito per la discussione di questo importante aspetto).

- I meccanismi di trasferimento dalla Fascia Principale alla zona dei NEO implicano interessanti processi fisici (risonanze, effetto Yarkovsky, collisioni). Del pari è molto interessante capire l'evoluzione successiva dei NEO, spesso destinati a cadere sul Sole, e analizzare i tempi scala coinvolti nei vari processi (v. paragrafo seguente).

- *Last not least*, anche grossi o medio grossi NEO possono cadere sulla Terra, causando catastrofi potenzialmente distruttive della civiltà. Prevederle e –se possibili– mitigarne gli effetti è un obbiettivo rilevante, che ha motivato la definizione di campagne osservative sistematiche di scoperta e follow–up, con l'obbiettivo di coprire interamente –o almeno quasi totalmente– i possibili rischi d'impatto per un futuro prevedibile (decenni, un secolo...). Le campagne si propongono di scoprire e studiare il moto di almeno il 90% dei NEO più grandi di un chilometro, e sono destinate progressivamente a coprire anche eventi meno drammatici. Si veda il cap.5 per la discussione delle collisioni con la Terra e dei rischi relativi.

3.6.7 Trasferimento di asteroidi dalla Fascia Principale ai NEO

Sulla base di studi fisici e dinamici sembra di poter dire che gran parte dei NEO ($80 - 90\%$) è originaria della fascia asteroidale. Inoltre i NEO hanno una vita media non troppo lunga, dell'ordine dei $10My$; su una scala temporale di questo tipo i più cadono sul Sole, altri sui pianeti; qualcuno invece, dopo una complessa evoluzione orbitale, viene espulso dalla regione. Anche in base a evidenze (per esempio lunari) su un flusso di meteoriti non troppo dipendente dal tempo –almeno negli ultimi $3Gy$ e più (oltre che in base a considerazioni quasi epistemologiche) sembra di dover concludere che i NEO non sono una popolazione eccezionale, presente oggi ma non in passato, ma una realtà costante del Sistema Solare. Diventa quindi necessario trovare un meccanismo di continuo rifornimento. In base a studi dinamici, sembra di poter concludere che i NEO arrivano soprattutto dalle regioni risonanti del Main Belt (si veda il Cap. 4 per la discussione del processo), e in particolare dalle due risonanze note come ν_6 e $3:1$ e, in misura minore, dalla zona interna del Belt, tramite incontri ravvicinati con Marte.

Le zone risonanti, però, sono troppo spopolate per produrre il flusso richiesto, a meno che non vengano a loro volta rifornite regolarmente dal resto della Fascia Principale, per mezzo di processi collisionali e dinamici non gravitazionali, come l'effetto Yarkovsky. Discuteremo questi processi nel Capitoli 4 e 5. Al momento, presentiamo un modello supersemplificato, per capire alcuni aspetti di quello che vediamo. Definiamo tre popolazioni, N_{Neo}, N_{ris}, N_{MB} e facciamo l'ipotesi che la popolazione dei NEO diminuisca progressivamente, con tempo scala τ_{Neo} e venga ripopolata da oggetti provenienti dalle risonanze (una frazione α di quelli persi dalle risonanze); trascuriamo per semplicità di discorso l'apporto della regione Mars Crossing. A loro volta le risonanze si spopolano in un tempo scala τ_{res} e ricevono una frazione β del materiale perso dal Main Belt, con un tempo scala τ_{MB}. Anche qui stiamo semplificando il discorso: come si vedrà tra poco, le collisioni causano sia distruzione di corpi sia creazione di corpi più piccoli; la presente discussione potrebbe essere resa più articolata e complessa, ma le conclusioni qualitative che qui presentiamo non cambierebbero. Le equazioni sono:

$$\frac{dN_{Neo}}{dt} = -\frac{N_{Neo}}{\tau_{Neo}} + \alpha\frac{N_{res}}{\tau_{res}} \tag{3.63}$$

$$\frac{dN_{res}}{dt} = -\frac{N_{res}}{\tau_{res}} + \beta\frac{N_{MB}}{\tau_{MB}} \tag{3.64}$$

$$\frac{dN_{MB}}{dt} = -\frac{N_{MB}}{\tau_{MB}} \tag{3.65}$$

Se imponiamo che le popolazioni dei NEO e delle risonanze siano stazionarie, e uguagliamo a zero le prime due equazioni, otteniamo:

$$N_{res} = \beta N_{MB} \frac{\tau_{res}}{\tau_{MB}} \tag{3.66}$$

$$N_{Neo} = \alpha N_{res} \frac{\tau_{Neo}}{\tau_{res}} = \alpha\beta N_{MB} \frac{\tau_{Neo}}{\tau_{MB}} \tag{3.67}$$

e anche:

$$\frac{N_{res}}{N_{Neo}} = \frac{\tau_{res}}{\alpha \tau_{Neo}} \tag{3.68}$$

I calcoli dinamici ci dicono che la vita media di un NEO è molto minore di quella di un MB, ma che è grande rispetto al tempo medio di permanenza in una regione risonante (spesso anche molto minore di $1My$). Ne consegue che la popolazione di NEO è solo una piccola parte di quella della Fascia Principale, e che le zone di risonanza sono naturalmente spopolate (facciamo l'ipotesi, anch'essa supportata da considerazioni dinamiche, che α non sia troppo piccolo). La presenza delle "gap di Kirkwood" discende quindi da principi elementari, anche se la dinamica delle risonanze è estremamente complessa.

3.6.8 Caratteristiche fisiche e classificazione degli asteroidi

Sulla base dell'analisi delle caratteristiche spettrali, o più semplicemente utilizzando degli indici di colore ottenibili da una fotometria multibanda (a sette o otto colori) è possibile distinguere vari gruppi; diverse classificazioni sono state fatte, e sono stati identificate 14 classi diverse. Ma forse è più interessante ragionare in termini di "complessi": il **C** (originariamente da *condriti carbonacee*: meteoriti con caratteristiche spettrali analoghe): sono asteroidi scuri (= bassa albedo, dell'ordine di 0.05), dominanti nella parte esterna della Fascia Principale); il complesso **S** (*stony* ossia pietre, ma anche "silicati", dominanti nella parte interna della fascia; si rilevano nello spettro bande di assorbimento di alcuni silicati, come olivina o pirossene); l'albedo è nettamente più alta; questo fatto, combinato con la diversa collocazione nella fascia, crea un evidente **effetto di selezione** che ne rende più facile la scoperta e l'osservazione. Si tratta di un complesso in realtà molto articolato, e la cui controparte meteoritica non è del tutto chiara, anche se recentemente si è rafforzata la interpretazione per cui molti S sono simili alle condriti ordinarie, con in più un arrossamento spettrale dovuto allo **space weathering** (v. qui sotto); il complesso **X**. Tra i gruppi più piccoli interessanti sono i **D**, scuri (=bassa albedo) e simili a molti corpi minori del Sistema Solare esterno, gli **M** (*metallici*, spesso oggetti grandi) che potrebbero essere nuclei esposti di corpi grossi e differenziati, parzialmente distrutti da collisioni nei primi tempi dopo la formazione, e i **Q**, un sottogruppo del complesso S che contiene i pochi oggetti spettroscopicamente simili alle condriti ordinarie: si pensa a un gruppo di oggetti con una superficie "giovane" (cioè senza rilevante space weathering) o per età o per l'effetto di ringiovanimento indotto dalle maree sollevate da passaggi planetari ravvicinati.

Lo studio delle caratteristiche superficiali degli asteroidi avviene mediante osservazioni spettroscopiche sia nel visibile sia nell'infrarosso.

Le caratteristiche più rilevanti degli spettri nel visibile sono legati al confronto con quello solare, e si riferiscono all'andamento della riflettività in funzione della lunghezza d'onda. Questo andamento permette di definire lo "slope", ossia la pendenza media della riflettività in funzione di λ. Lo slope è in media abbastanza piatto per i gruppi C e X, mentre ha una pendenza significativa per gli asteroidi del complesso S. Lo slope è collegato con la composizione chimica, ma anche con altri effetti, come diremo di seguito. Altri aspetti interessanti dello spettro sono legati alla presenza, in particolare a lunghezze d'onda al limite del visibile o nell'infrarosso vicino, di bande di assorbimento, che possono identificare la presenza non solo di componenti rocciose, come i silicati sopra citati, ma anche di acqua.

Un problema molto interessante da analizzare è il cambiamento delle proprietà spettroscopiche col tempo, dovuto all'esposizione del corpo al bombardamento di micrometeoriti, alla radiazione e al vento solare: questo cambiamento, identificato per la prima volta sulla Luna, viene, come già detto, chiamato "space weathering". Sugli asteroidi lo space weathering induce prevalentemente un arrossamento, ossia un aumento dello slope. Tale effetto è piccolo per gli asteroidi dei complessi C e X, mentre è più rilevante (e indiscutibile) per gli asteroidi del complesso S. Secondo alcuni Autori l'effetto, dovuto prevalentemente alla implantazione di ioni nello strato superficiale (microscopico) dell'asteroide, consente una alterazione significativa dello slope di asteroidi del complesso S, in un tempo dell'ordine del milione di anni. L'effetto renderebbe così difficile il confronto spettroscopico fra asteroidi e meteoriti: lo space weathering potrebbe così risolvere il cosiddetto "paradosso delle condriti ordinarie" (ossia la mancanza di asteroidi ad esse spettroscopicamente simili, a parte qualche raro Q), e potrebbe fornire informazioni preziose in merito a diversi processi fisici (collisioni, incontri ravvicinati per i NEO ecc.).

I problemi relativi alla modellizzazione dello space weathering sono però complessi e in parte irrisolti. L'evidenza osservativa fornisce una ben chiara correlazione fra lo slope medio e l'**esposizione** solare degli asteroidi (non solo di MB); l'esposizione corrisponde ovviamente all'età per un coefficiente che dipende dalla distanza dal Sole. Un buon fit si ha con una relazione logaritmica fra slope ed esposizione (o età); tale relazione conferma il rapido arrossamento nelle prime fasi ma implica anche che il processo continui su tempi molto lunghi, dell'ordine anche di $10^9 y$.

Secondo alcuni Autori questo implica che il tempo scala effettivo per lo space weathering dovrebbe essere molto più lungo, e l'effetto fisico dominante sarebbe allora il bombardamento micrometeoritico. Nella problematica, tuttora completamente aperta, gioca sicuramente un ruolo fondamentale il ringiovanimento delle superfici asteoridali dovuto alle collisioni e al conseguente rimescolamento degli strati superficiali ("gardening").

3.6.9 Proprietà rotazionali e caratteristiche fotometriche

La luminosità di un asteroide, legata nel visibile alla luce solare riflessa, dipende in modo complesso dalla posizione e dall'orientamento rispetto al Sole ed alla Terra. La posizione rispetto alla congiungente Terra-Sole, detta **fase**, fa variare la percentuale di superficie illuminata visibile da terra, ed anche l'angolo di incidenza e riflessione della luce solare che arriva all'osservatore. E' evidente come l'opposizione di fase, cioè il momento in cui il pianetino si trova allineato

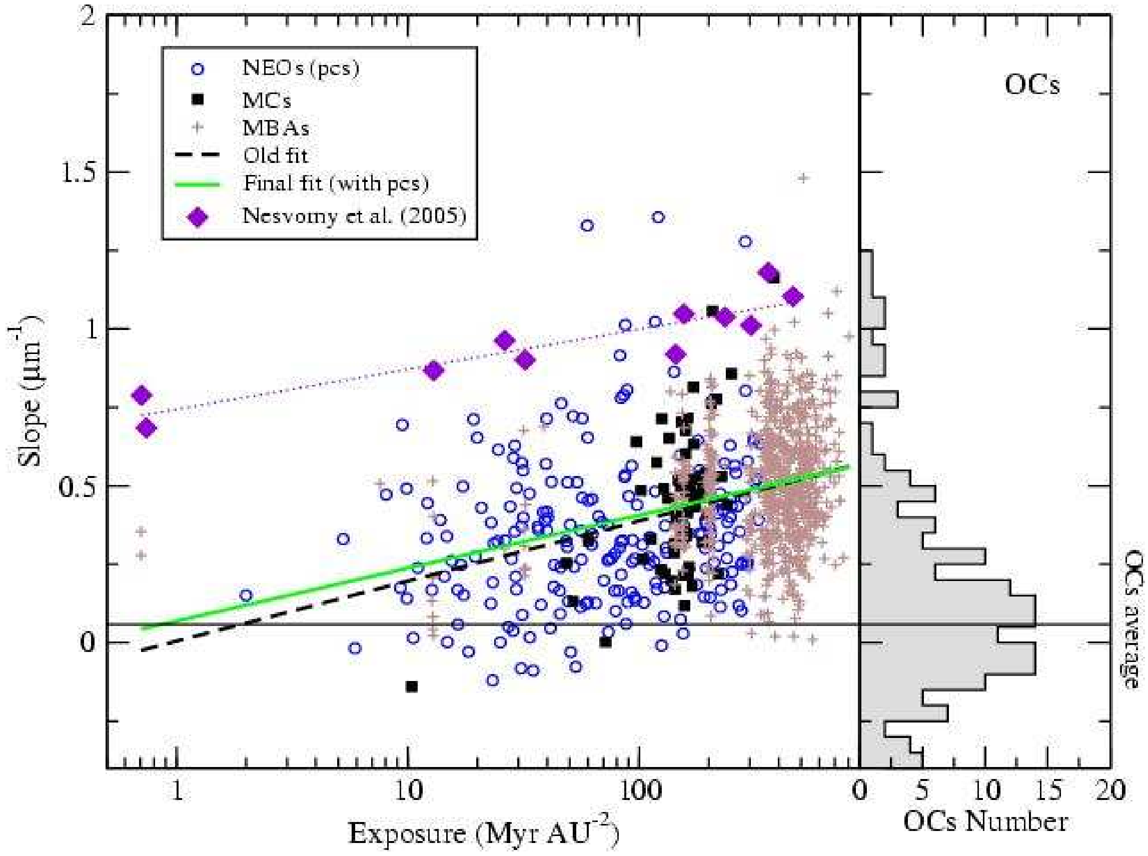

Figure 3.15: Dipendenza dello slope spettrale degli asteroidi S dalla esposizione e confronto con le proprietà delle condriti ordinarie (pannello di destra); da Astronomy and Astrophysics, 464,1139, 2007.

(o quasi) alla detta congiungente, dalla parte opposta del Sole rispetto alla Terra, è quello in cui viene raggiunta la massima luminosità. Il modo in cui questa luminosità diminuisce allontanandosi dall'opposizione dipende non solo dal variare della superficie illuminata visibile, ma anche dalle proprietà di scattering della superficie: la distribuzione della luce riflessa nelle varie direzioni dipende anche dalla struttura fine della superficie, liscia, o rugosa, o ricoperta di polvere o frammenti ("regolith"). Si definisce la **curva di fase** come la funzione $m_v(\theta)$ (θ è l'angolo di fase), ed essa ci fornisce informazioni anche sulle caratteristiche della superficie.

Ma la luminosità del pianetino varia, di solito, anche su un periodo diverso (e generalmente molto più breve, a volte anche di poche ore). Come è noto, la forma di un corpo celeste di grandi dimensioni, e dominato completamente dalla autogravitazione, è definita una volta definite la sua densità e le sue proprietà rotazionali (si vedano i richiami nel Cap.6): la forma "di equilibrio" è sostanzialmente data dalla condizione che la superficie sia, nel sistema solidale con il corpo –e quindi con esso corotante– una superficie equipotenziale. Gli asteroidi, però, sono corpi per lo più piccoli, e non possono essere correttamente approssimati da una forma di equilibrio che vale per una struttura fluida. Hanno spesso forma irregolare, e sono caratterizzati anche da macchie di albedo; di conseguenza la loro luminosità varia anche a causa della rotazione intorno al proprio asse che, data l'irregolarità della forma e dell'albedo, fa variare la quantità di luce riflessa sulla Terra. E' possibile quindi studiare la **curva di luce** fotometrica di un asteroide, e dedurne in primo luogo il periodo di rotazione, un dato di estrema importanza per la comprensione dei processi evolutivi, ed in particolare dell'evoluzione collisionale; le informazioni sull'ampiezza, prese a fasi e ad "aspetti" diversi (ricordiamo che di solito l'orbita dell'asteroide non giacerà sul piano dell'eclittica, ed avremo quindi la possibilità di vedere parti diverse dell'asteroide in vari momenti), permettono di tentare ricostruzioni della forma e delle eventuali macchie di albedo (albedo localmente diversa da quella media sulla superficie), e anche di identificare (spesso con soluzioni multiple) la direzione del vettore di spin (una informazione diventata molto interessante alla luce dei progressi teorici degli ultimi anni). Le eventuali irregolarità di forma e di albedo influiscono in modo simile sulla curva di luce, e non è facile discriminarle in modo del tutto convincente. Ciò nonostante, le osservazioni forniscono una discreta evidenza sull'esistenza di macchie di albedo e sul fatto che gran parte degli asteroidi, esclusi al limite i piú grandi, sono caratterizzati da una forma abbastanza irregolare; le recentissime immagini di alcuni asteroidi, prese dallo spazio, ed alcune ricostruzioni di forma fatte con tecniche radar, confermano queste valutazioni generali almeno in alcuni casi specifici. Nella morfogenesi hanno sicuramente un ruolo determinante i processi collisionali, e la formazione di grossi crateri da impatto. Non è invece del tutto chiaro se e in che misura la loro forma irregolare dimostri che sono fisicamente dominati dalle forza di stato solido e non da quelle gravitazionali. È molto accreditato da diversi anni il modello detto delle **rubble piles** secondo il quale quasi tutti gli asteroidi (esclusi forse solo quelli più piccoli di $\simeq 200m$) sarebbero costituiti da agglomerati di frammenti solidi più piccoli, tenuti insieme dalla gravitazione. In questa ottica gli asteroidi sarebbero corpi solidi ma non coesi, e la loro forma potrebbe tendere verso una forma di equilibrio. Le cose non sono però così semplici: un insieme di frammenti è in grado di assestarsi in una struttura non di equilibrio, stabilizzata dagli attriti interni fra le componenti. Per fare un esempio banale, un cumulo di sabbia o di sassi, se si comportasse come un fluido, evolverebbe in uno straterello sottile sul suolo. Non è così se le pareti non sono troppo ripide, a causa appunto degli attriti interni. La trattazione teorica del problema è abbastanza complessa, ma è incentrata intorno alla definizione dell'**angolo di riposo** che limita la capacità delle componenti solide di stare in equilibrio in una configurazione che non corrisponde a una superfice equipotenziale. Anche in presenza di collisioni o altri processi dissipativi la forma evolve verso una forma di equilibrio ma può non arrivarci, assestandosi in uno stato che potremmo forse definire metastabile. Questo tipo di idee, sviluppate negli ultimi anni, sembrano poter spiegare in buona parte i risultati delle osservazioni. Le figure mostrano due asteroidi osservati direttamente dallo spazio.

Asteroidi molto grandi, come **1Cerere**, tendono invece ad essere più regolari, e ad avvicinarsi alle forme di equilibrio previste dalla teoria per i corpi autogravitanti.

Una delle motivazioni più forti per le idee teoriche oggi più diffuse, e basate sul già citato modello delle "rubble piles", è data dalla distribuzione del periodo di rotazione (o meglio di $\omega = 2\pi/T$). Un modello di "termalizzazione" collisionale porterebbe a prevedere una distribuzione maxwelliana, centrata intorno a un valore medio –nel caso, dell'ordine della decina di ore. In effetti la distribuzione non è maxwelliana: ci sono eccessi sia di rotatori lenti che di veloci, specie fra i corpi più piccoli, che potrebbero forse essere spiegati con l'effetto YORP (cap.4). Ma l'aspetto più eclatante è la mancanza, fra gli asteroidi più grandi di un centinaio di metri o poco più, di rotatori più veloci di circa due ore. Questo fatto é stato interpretato come una prova della loro natura composita. In generale un corpo può ruotare ad una velocità angolare che può essere stimata confrontando la velocità equatoriale con la radice quadrata di una densità di energia di legame:

$$v_{eq} = \omega_{crit} r \simeq \sqrt{\epsilon} \tag{3.69}$$

Per un corpo tenuto insieme da forze di stato solido $\epsilon \simeq const$, e quindi

$$\omega_{crit} = const/r. \tag{3.70}$$

L'andamento della velocità angolare dovrebbe quindi prevedere rotazioni sempre più rapide al diminuire delle dimensioni, e realisticamente permetterebbe la rotazione di oggetti di scala chilometrica o di centinaia di metri in pochi minuti.

La mancanza di simili rotatori, almeno fino a una soglia di poche centinaia di metri, indica una realtà diversa: se un corpo è tenuto insieme dalla gravitazione, essendo costituito non da un monolite ma da una miriade di frammenti rocciosi non legati fra di loro da forze significative di tipo elettrostatico, la condizione critica per la rotazione diventa

$$T = 2\pi/\omega \leq t_{ff} \tag{3.71}$$

e, per densità poco superiori a quella dell'acqua, implica un periodo limite dell'ordine di un paio d'ore. Anche questa conclusione deve, comunque, tener conto della maggiore complessità del caso reale, in cui non si hanno dei corpi fluidi ma dei conglomerati, con le problematiche sopra accennate.

È interessante anche analizzare la distribuzione dei **vettori** di spin degli asteroidi. I dati non sono molto numerosi ($\simeq$ 100 oggetti) e per lo più relativi a corpi piuttosto grandi. In linea di principio ci si aspetterebbe una distribuzione casuale delle orientazioni, a eccezione dei pochi oggetti grandi che potrebbero mantenere le proprietà rotazionali primordiali. Non è così: nella distribuzione si nota una netta carenza di assi vicini al piano orbitale e una prevalenza, almeno nel Main Belt, di spin *progradi* ossia con una componente parallela al momento angolare

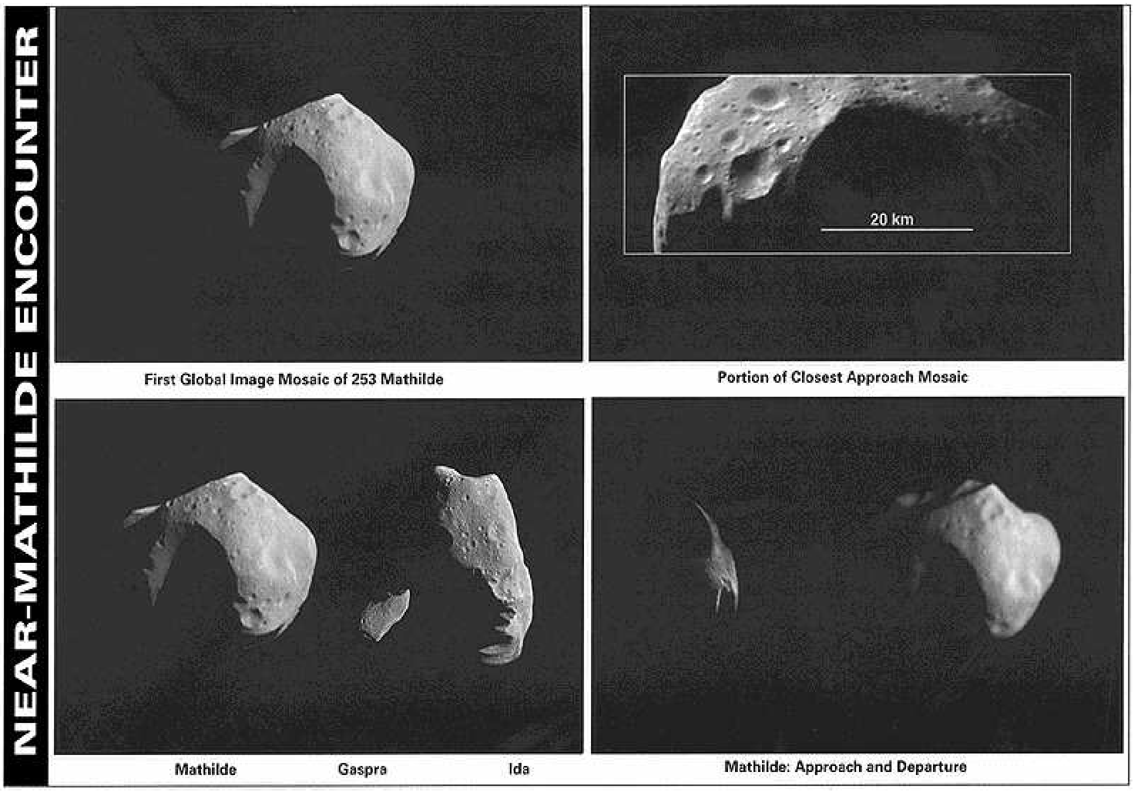

Figure 3.16: 243 Mathilde (dall'archivio immagini della NASA)

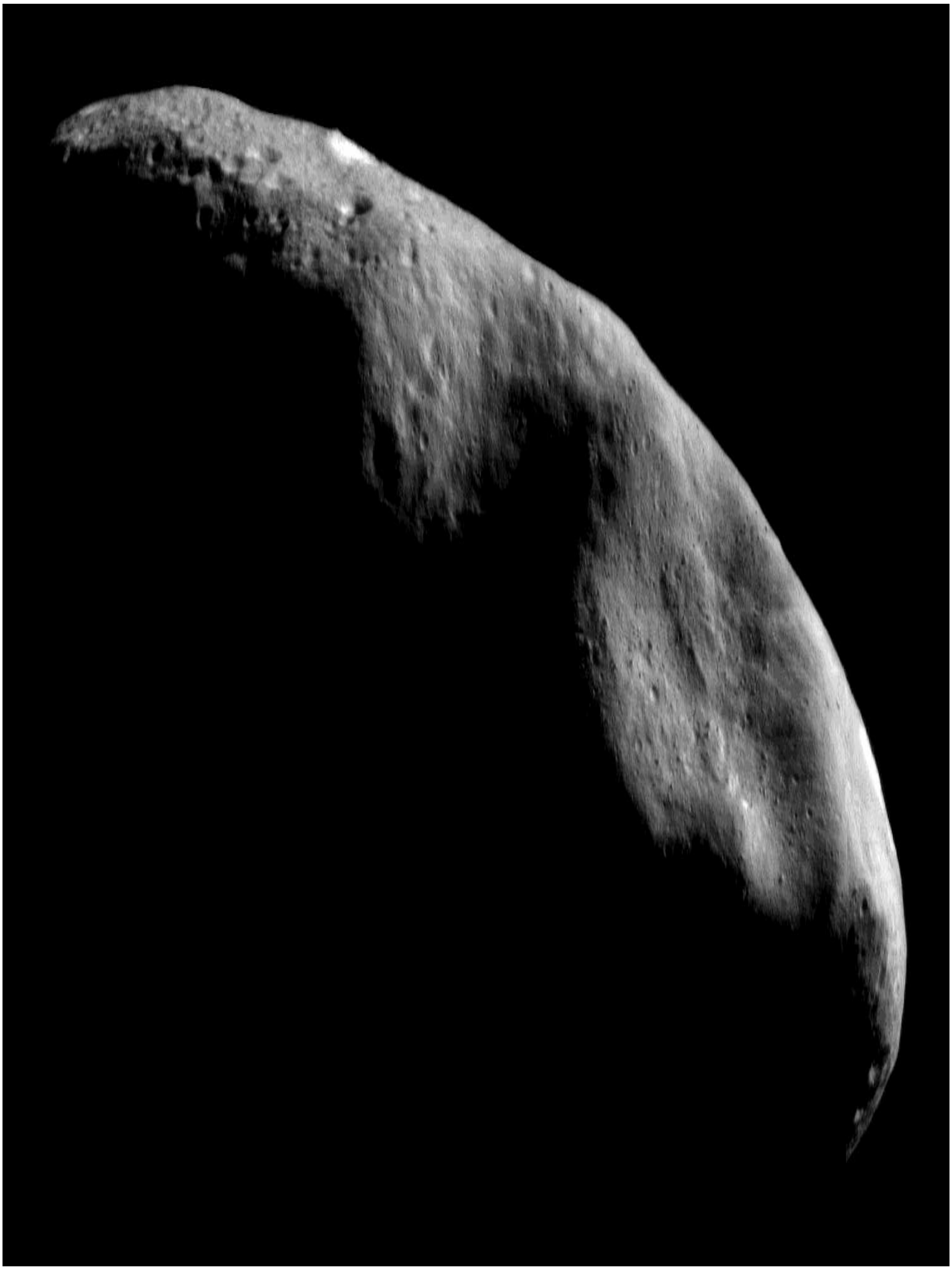

Figure 3.17: L'asteroide NEO 433 Eros (dall'archivio immagini della NASA)

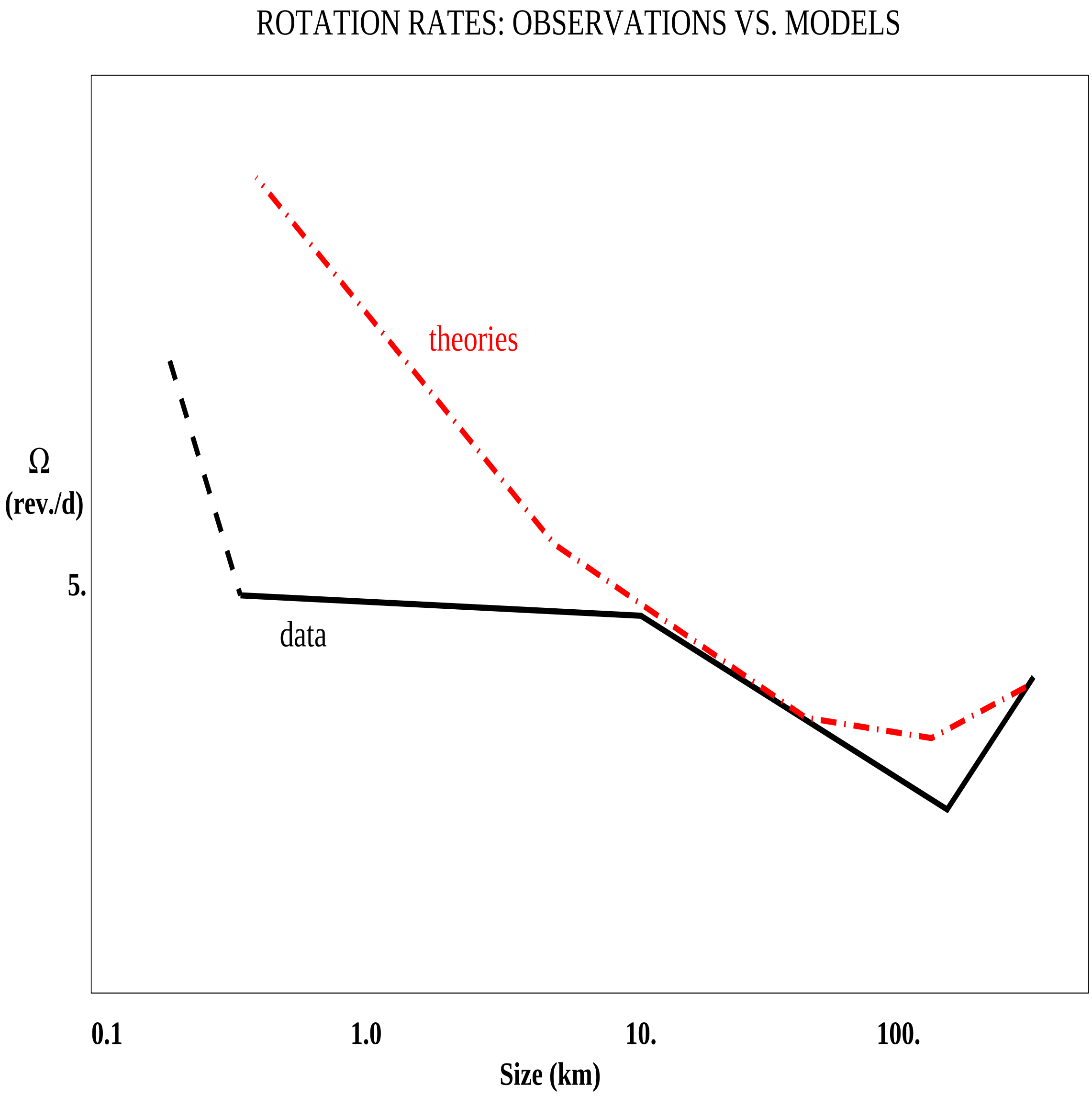

Figure 3.18: Andamento della frequenza rotazionale media degli asteroidi in funzione del diametro; confrontate le previsioni teoriche senza rubble piles e le osservazioni (da Memorie SAIt, Suppl.6, 110,2005).

orbitale. Alcuni oggetti –tra i più piccoli, mostrano chiare conseguenze dirette o indirette degli effetti dinamici non gravitazionali di cui parleremo nel Cap.4 (Yarkovsky,YORP).

3.7 La fascia di Kuiper-Edgeworth

Nel Sistema Solare esterno, oltre Giove, ci sono molti altri interessanti corpi minori, anche se per ovvie ragioni osservative la loro scoperta è cominciata negli ultimi venti anni circa. I **Centauri** sono corpi in orbite comprese fra Giove e Nettuno. La zona è dinamicamente instabile e porta spesso in orbite cometarie. I Centauri stessi possono anche essere classificati come corpi cometari. Oltre Nettuno si hanno invece i **TNO** (Trans-Neptunian Objects) che costituiscono anche la cosiddetta *Fascia di Kuiper-Edgeworth* (dal nome dei due scienziati che ne avevano suggerito l'esistenza alcuni decenni prima della sua effettiva scoperta). La probabile esistenza di una fascia di oggetti oltre Nettuno era stata inizialmente legata alla difficoltà di pensare che il processo di formazione oltre Nettuno si fosse limitato a produrre il solo Plutone, ma l'idea era stata rinforzata dalla necessità di trovare una regione di origine alle numerose comete della famiglia di Giove con bassa inclinazione, difficilmente prodotte dalla isotropa nube di Oort (v. il paragrafo dedicato alle comete).

Le scoperte, con ritmo crescente, dei TNO sono però avvenute solo dall'inizio degli anni '90; data la distanza dal Sole, grossi telescopi sono necessari per scoprire e studiare questi oggetti, e la difficoltà cresce progressivamente a mano a mano che ci si allontana dal Sole. Oggi si ritiene che la fascia dei TNO comprenda moltissimi oggetti, per una massa complessiva superiore di alcuni ordini di grandezza a quella della fascia asteroidale.

La struttura complessiva è abbastanza simile a quella asteroidale (i Centauri giocano un ruolo simile ai NEA), ma la mancanza di un grosso pianeta esterno, come Giove, introduce due differenze: la prima è la mancanza dei Troiani; la seconda è la mancanza di un bordo esterno, e la possibilità di trovare oggetti anche a grande distanza. Per completezza di informazione è opportuno precisare che sono stati cercati i possibili Troiani dei pianeti esterni, anche se certamente la loro regione di stabilità è molto minore, data la massa più ridotta del pianeta di riferimento e le più intense perturbazioni esterne dovute a Giove. Al momento è stato catalogato un piccolo gruppo di Troiani di Nettuno. In sintesi i TNO sono distinti in alcuni sottogruppi.

- La fascia "classica" si estende più o meno da 40 a 48 A.U., ed è caratterizzata da propietà generali di "eccitazione dinamica" non molto diverse da quelle discusse per gli asteroidi (in parte legata alla primordiale migrazione di Nettuno verso l'esterno). Le eccentricità sono limitate dalla condizione che non ci sia un incontro troppo ravvicinato con Nettuno. L'eccitazione è legata alla cattura nelle risonanze. Per un oggetto in una risonanza con Nettuno $j : j + 1$, per esempio, si puo dimostrare che l'eccentricità viene eccitata da un livello iniziale e_0 au livello e secondo la formula (Malhotra, 1995, AJ, 110,420):

$$e^2 = e_0^2 + (1/j + 1)ln(a_{Nettuno,fin.}/a_{Nettuno,in.}) \tag{3.72}$$

  dove i due semiassi maggiori di Nettuno si riferiscono all'inizio e alla fine del processo di migrazione. L'eccitazione dinamica nella parte esterna della fascia classica sembra però dover essere attribuita ad una causa diversa, probabilmente l'effetto della primordiale presenza nella regione di grossi embrioni planetari (uno dei quali potrebbe aver colpito Plutone, formando il sistema Plutone–Caronte).

- I **Plutinos** sono in risonanza orbitale 3:2 con Nettuno, esattamente come Plutone (che ne è il capofila). In questo caso la risonanza introduce un meccanismo di protezione, in quanto rende impossibili, per un certo range di condizioni iniziali, incontri ravvicinati o collisioni con Nettuno anche per grandi eccentricità (per altre condizioni invece le collisioni sono quasi immediate). Nel piano a, e i Plutinos occupano una striscia in cui l'eccentricità può arrivare a valori intorno a 0.4, per i quali diventano possibili incontri ravvicinati (destabilizzanti) o addirittura collisioni con Urano.

- In negativo, va notata la la mancanza di oggetti anche in orbite quasi circolari e poco inclinate sotto le 39 A.U.. Da un punto di vista dinamico sarebbero stabili (almeno fino a 36 A.U.); la mancanza sembra da attribuire ancora una volta all'effetto della migrazione di Nettuno.

- Oltre il limite della risonanza 2:1 con Nettuno non si sa se la fascia classica si estenda ancora. C'è sicuramente il cosiddetto "scattered disc", con una distribuzione tendente allo sferico, e che costituisce probabilmente una zona di transizione verso la nube di Oort (con meccanismi analoghi di riempimento). In questa regione si sono trovati alcuni dei corpi più grossi della fascia.

Nelle figure (tratte dal sito Astdys) rappresentiamo la distribuzione degli elementi propri dei TNO. È utile anche consultare il sito http://www.johnstonsarchive.net/astro/tnos.html per ulteriori grafici.

La distribuzione di massa dei TNO non è ben conosciuta, ma sicuramente nella regione la massa totale contenuta è molto più alta di quella contenuta nella fascia asteroidale, e forse dell'ordine della massa terrestre. L'evoluzione collisionale è presente (e ci sono probabilmente anche delle famiglie) ma in generale il "metabolismo" è assai più lento, sia per le dimensioni molto più grandi della fascia, sia per le velocità relative molto più piccole. Anche le conseguenze delle collisioni sono diverse, sia per le diverse velocità, sia per la diversa struttura fisico chimica degli oggetti, con maggiore abbondanza di ghiacci rispetto alla roccia. Il metabolismo più lento è compensato dalla maggiore abbondanza di oggetti.

La distribuzione di massa suggerisce un andamento simile a quello di regime per dimensioni intorno a $50km$ (o poco meno). Questo dovrebbe dare un'idea del livello di evoluzione della fascia, leggermente meno intenso di quello della fascia asteroidale (o simile se l'evoluzione della fascia asteroidale è valutata ai livelli minimi ipotizzati in letteratura). La distribuzione di massa degli oggetti più grandi (con $q \simeq 2.1$) sarebbe invece quella originaria, e potrebbe fornire utili informazioni sui tempi dei processi di accrescimento partendo dai "planetesimi" (v. Cap.6).

Tra i TNO sono piuttosto frequenti i sistemi binari, con orbite spesso piuttosto larghe. Circa un TNO su trenta ha un satellite rilevato: la percentuale reale deve essere piuttosto alta (probabilmente non inferiore al 10%). A differenza dei sistemi asteroidali binari, questi oggetti non hanno probabilmente una origine collisionale, ma potrebbero essere il prodotto di una complessa catena di processi dinamici (v.per es. Astakhov et al, MNRAS 360,401, 2005).

Le proprietà fisiche dei TNO sono complesse; probabilmente anch'essi possono essere classificati in due o più gruppi. I TNO di taglia medio–piccola hanno di regola una bassa albedo ($\simeq 0.1$)

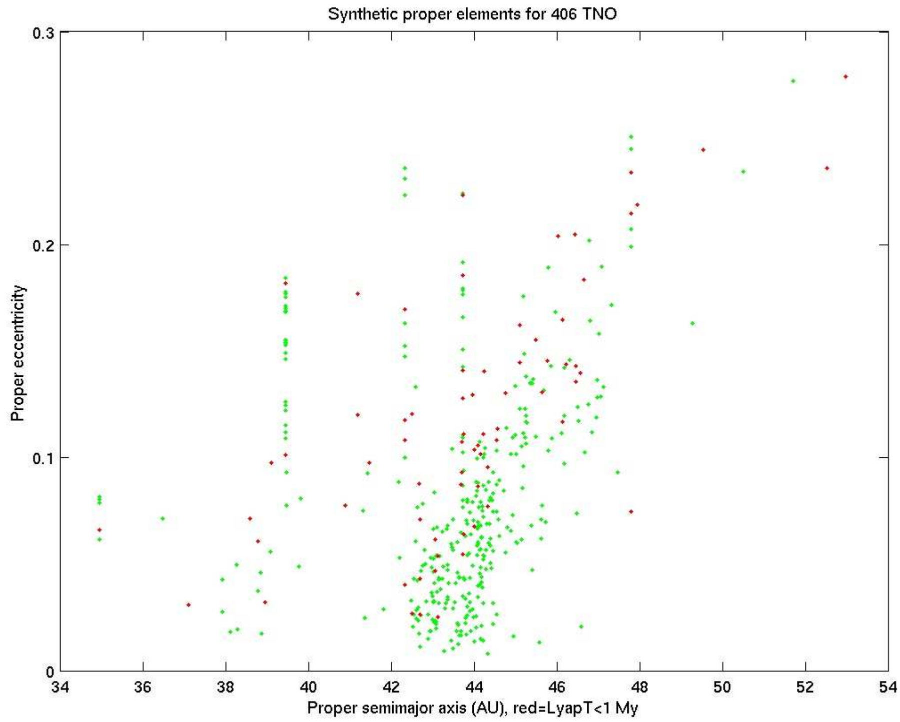

Figure 3.19: Distribuzione degli elementi propri dei TNO nel piano $a--e$; gli elementi indicati in rosso sono meno stabili (rosso= tempo di Lyapounov minore di $1My$); dal sito Astdys.

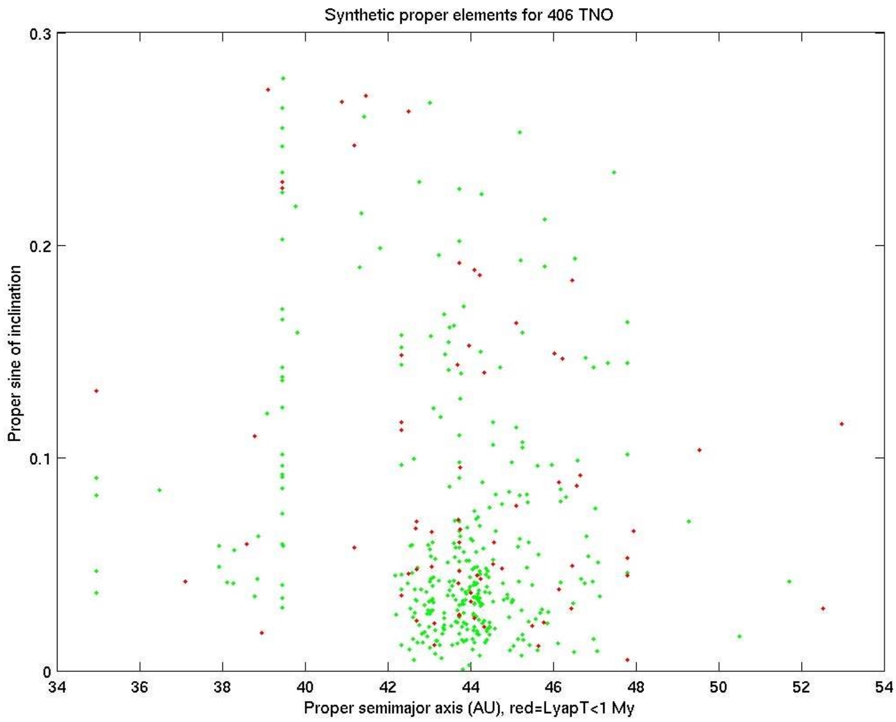

Figure 3.20: Distribuzione degli elementi propri dei TNO nel piano $a - -sinI$; gli elementi indicati in rosso sono meno stabili (rosso= tempo di Lyapounov minore di $1My$); dal sito Astdys.

e sono abbastanza simili spettroscopicamente agli asteroidi di tipo D (probabile prevalenza superficiale di composti carbonacei). L'albedo aumenta in media con le dimensioni (crescente presenza di ghiacci) , e gli oggetti più grandi hanno valori all'intorno di 0.5. Anche variazioni di albedo con il tempo sono state osservate (per es. su Plutone). I ghiacci superficiali non sono necessariamente di acqua; il ghiaccio d'acqua domina su alcuni dei Plutoidi più grandi, come Haumea, ma non su altri: su altri si ha abbondanza superficiale di azoto, metano, ecc..

Le rotazioni sono a volte molto veloci, e ci sono diversi rotatori veloci (3–5h), non lontani, date le densità, dai limiti per formare oggetti triassiali o per la fissione.

Si veda, per maggiori dettagli [1, cap.14].

3.8 Le comete

Un altro interessante campione osservativo è costituito dalle comete, pianetini ricchi di sostanze volatili immessi per lo più in orbite estremamente eccentriche, e le cui proprietà variano drammaticamente nel processo di avvicinamento al Sole, facendo apparire la chioma e la coda. Dal punto di vista dinamico e fisico le comete sono probabilmente originarie di una fascia esterna di corpi minori, simile a quella attuale dei TNO, anche se forse estesa in tutta la regione dei pianeti giganti. Da questa regione meccanismi di forte perturbazione hanno causato (in tempi di poco successivi alle fasi di formazione) la perdita di quasi tutta la massa. Parte di questa, nella successiva evoluzione dovuta prevalentemente a passaggi ravvicinati con i pianeti maggiori, si è spostata su orbite più interne. Una parte maggiore si è invece assestata su orbite che escono, all'afelio, dalla zona dei pianeti conosciuti e si spingono ai confini del Sistema Solare (dinamicamente il Sistema Solare finisce quando diventa prevalente l'attrazione delle stelle vicine. Ciò succede a circa $10^5 A.U.$, ossia a distanze dell'ordine dell'anno luce).

Tale zona esterna del Sistema prende anche il nome di **nube di Oort**.

La classificazione dinamica, superata la tradizionale divisione in lungo e corto periodo, separati dalla soglia dei 200 anni, può essere fatta sulla base dell'invariante di Tisserand rispetto a Giove. Quando $T > 2$ si hanno comete tendenzialmente su orbite vicino al piano dell'eclittica, e che possono poi essere divise in tre sottogruppi. Se $T < 3$ sono possibili incontri ravvicinati con Giove: le comete che hanno T compreso fra 2 e 3 vengono inserite nella cosiddetta "famiglia di Giove". Se invece $T > 3$ non sono possibili incontri ravvicinati con Giove. I due sottogruppi sono allora legati al valore del semiasse maggiore. Quelle tutte interne a Giove sono comete a corto periodo, dette "di tipo Encke", mentre quelle con $a > a_J$ sono chiamate "tipo Chirone", e vanno in sostanza a identificarsi, dinamicamente, con i Centauri. Le comete della famiglia di Giove sono rifornite dalla fascia dei TNO; anzi tutte le comete eclittiche passano da questa fase, e anche gli altri due sottogruppi sono riforniti, mediante complessi processi dinamici, da questo. Si ricordi che l'esistenza della fascia di Kuiper era stata postulata negli anni '80, prima della scoperta osservativa, proprio come sorgente delle comete eclittiche.

Le altre comete, caratterizzate da $T < 2$, hanno invece una distribuzione approssimativamente isotropa. Quelle con semiasse maggiore di $10000 AU$ vengono definite come "nuove" (il periodo corrispondente sarebbe sempre superiore a un milione di anni). Nel gruppo possono essere collocate anche le comete con orbite (realmente o apparentemente) paraboliche o iperboliche. Il valore di soglia scelto, oltre a essere collegato con la storia del genere umano sulla Terra (eventi di milioni di anni fa NON potrebbero essere stati osservati da esseri umani), è anche connesso alle proprietà della nube di Oort (più o meno per quei valori di semiasse maggiore zona sembra esserci il picco della distribuzione delle comete) e ai processi evolutivi legati all'ingresso di stelle all'interno del Sistema Solare. Comete con semiasse maggiore inferiore a $10000AU$ sono chiamate "ritornanti"; se hanno un semiasse maggiore inferiore a $40AU$ (sono insomma interne ai TNO classici) sono definite "tipo Halley"; altrimenti sono comete "esterne" o a lungo periodo.

La evoluzione della nube di Oort, formata inizialmente da oggetti ex TNO immessi in una regione esterna del Sistema Solare dopo incontri planetari ravvicinati, è influenzata in misura decisiva dall'interazione con l'esterno del Sistema Solare, non tanto dagli effetti mareali complessivi della Galassia, quanto dall'interazione con stelle di passaggio vicine al Sole. Per valutare ogni quanto tempo una stella passi (casualmente) a una distanza minima d dal Sole si può usare la classica equazione per il libero cammino medio:

$$l = 1/(n\sigma) \tag{3.73}$$

dove n è la densità numerica di stelle e la sezione d'urto σ può essere definita come l'area del cerchio di raggio d. L'intervallo fra due incontri a distanza d diventa quindi:

$$\tau = l/v_{rel} \tag{3.74}$$

dove v_{rel} è la velocità relativa delle stelle vicine rispetto al Sole. Prendendo valori ragionevoli (densità intorno a $0.1pc^{-3}$ e velocità dell'ordine di $10km/s$) si ottengono tempi di passaggio a $10000AU$ dell'ordine di $0.5Gy$. Passaggi a questa distanza sono quindi avvenuti più volte nella storia del Sistema Solare, e hanno provocato una drammatica perturbazione delle orbite nella nube di Oort. Passaggi a distanze dell'ordine di 10^5AU avvengono invece ogni milione di anni.

In sintesi si pensa che le comete siano state immesse nella regione esterna da incontri planetari, e che la nube sia stata poi "ristrutturata" dai passaggi stellari, diventando la struttura più o meno isotropa che conosciamo. L'avvicinamento di altre stelle ha, da un punto di vista geocentrico, l'effetto principale di aumentare il flusso di comete nella zona del Sistema Solare interno.

In media, ogni anno diventano osservabili circa 10 nuove comete, che sono forse un decimo di quelle che entrano all'interno dell'orbita di Saturno, ma non sempre sono identificabili (se il perielio è più lontano non solo l'oggetto è più debole, ma coda e chioma, caratteristiche determinanti per l'identificazione di una cometa, non si formano o sono molto meno evidenti). Si può pensare quindi che ogni passaggio stellare ravvicinato immetta nel Sistema Solare interno $\simeq 10^8$ comete. Modelli dinamici suggeriscono che esse siano solo una piccola parte delle $\simeq 10^{12}$ comete presenti nella nube di Oort, con una massa totale maggiore di quella terrestre.

Dal punto di vista degli studi fisici, è abbastanza chiaro che le comete debbono avere una composizione abbastanza simile a quella dei TNO, con componenti rocciose mescolate a ghiacci di varia natura, anche se le osservazioni del nucleo sono sempre abbastanza difficili: se la cometa è vicina il nucleo è immerso nella chioma; se è lontana, il corpo è piccolo e poco luminoso. La conoscenza è stata fortemente migliorata da studi legati a missioni spaziali, in particolare la Missione **Giotto** che nel 1986 realizzò un *fly–by* (passaggio ravvicinato ad alta velocità relativa, distinto, nel gergo delle missioni spaziali, dal *rendez–vous* che comporta un passaggio a piccola velocità, potenzialmente il primo passo verso una immissione in orbita o una discesa al suolo) con la cometa di Halley. Successivamente ci sono state altre missioni, fra cui la serie **Deep Space**, mentre è in corso la missione europea Rosetta, che ha nell'estate 2010 incontrato l'asteroide Lutetia, e che dovrebbe raggiungere il suo target cometario, con conseguente discesa al suolo, nel 2014.

Il modello corrente è quello della "palla di neve sporca" dovuto a Whipple (1950) e solo parzialmente rivisto alla luce delle missioni spaziali. Il nucleo tipico di una cometa sarebbe dell'ordine di alcuni chilometri, debolmente legato (e quindi facile a frammentarsi anche per effetti mareali -come nel caso della celebre cometa **Shoemaker–Levy**) e spesso coperto in parte da uno strato scuro. Da alcuni "buchi" in questo strato le componenti volatili emergono quando la cometa viene scaldata dal Sole, producendo le classiche chioma e coda, ricche di gas - ma anche con una componente di polvere e ghiacci. A volte la coda è doppia, in relazione alle dimensioni delle particelle: il gas (compreso il vapore acqueo, spesso molto abbondante) è proiettato in direzione opposta al Sole dalla pressione di radiazione e forma una coda diritta; particelle più massicce sono invece immesse in "orbite" ritardate rispetto al nucleo cometario e formano una seconda coda incurvata.

L'emissione del gas provoca, per reazione, il cambiamento dell'orbita della cometa. In presenza di rotazione il materiale viene emesso in una direzione non esattamente allineata con la congiungente cometa–Sole (il meccanismo è simile a quello dell'effetto Yarkovsky –v. Cap.4). Questo permette il trasferimento di quantità di moto in direzione trasversa (lungo l'orbita) con una maggiore efficacia evolutiva. Gli elementi volatili vengono consumati dopo diversi passaggi vicino al Sole, e la cometa diventa a quel punto "spenta" e indistinguibile da corpi minori non cometari.

Si veda per maggiori dettagli, e per la discussione dei tempi caratteristici dei principali processi fisici [1, cap.14].