

1 Tidal Forces

Sulla Terra le maree, collegate con l'innalzamento e l'abbassamento del livello del mare, sono familiari ma possono essere strane in ambienti come le lune attorno agli altri pianeti. Le forze mareali sono molto più complesse di un semplice allungamento in un verso e sono causa di molti effetti nel nostro sistema solare, a partire da cambiamenti del livello del mare ad attività geologica come i vulcani e i geyser sulle lune, il tidal heating, la distruzione di corpi minori etc. In particolare le forze mareali hanno effetti molto forti sulle orbite delle lune attorno ai pianeti. Questi effetti sono secolari e si accumulano nel corso degli anni con importanti conseguenze sull'evoluzione del Sistema Solare.

La legge di gravità di Newton definisce la forza attrattiva tra due oggetti trattandoli come puntiformi, ma gli oggetti reali come i pianeti e i satelliti hanno dimensioni significative quindi la forza di gravità varia di molto se riferita alla superficie del corpo dal lato vicino al secondo corpo o a quella situata sul lato più lontano.

1.1 Forze mareali nel sistema Terra-Luna

Consideriamo il sistema Terra Luna anche se la sua vicinanza con il Sole rende gli effetti mareali causati da quest'ultimo trascurabili solo in prima approssimazione. Teniamo inoltre presente che la Terra e la Luna costituiscono un unico sistema che ruota attorno al proprio centro di massa quindi la forza mareale tra i due corpi risulta dalla combinazione dell'attrazione lunare e della forza centrifuga dovuta alla rotazione della Terra.

Per semplificare la trattazione trascuriamo per il momento:

- l'azione del Sole
- gli effetti della rotazione terrestre attorno al proprio asse
- supponiamo che la superficie della Terra sia solida (consideriamola come un unico corpo rigido), sia uniformemente coperta da uno strato d'acqua e che essa abbia la caratteristica di obbedire istantaneamente alla forza gravitazionale della Luna. Trascuriamo quindi le figure reali della Terra e della Luna (sono due sferoidi oblati)
- l'inclinazione dell'orbita della Luna sull'eclittica (circa 5°)
- l'obliquità della Terra (circa 23° e mezzo)

La Luna attira verso di se ciascuna particella della Terra solida e ciascuna particella d'acqua comunicando loro accelerazioni inversamente proporzionali al quadrato della distanza tra la particella in questione e il centro della Luna. L'accelerazione prodotta dalla Luna su una particella posta in A (parte più vicina) è:

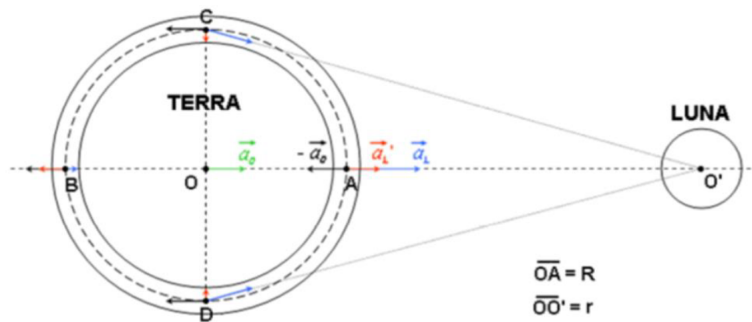


Figura 1: Forze mareali luna

$$a_A = \frac{Gm}{(r - R)^2}$$

dove m è la massa della Luna.

L'accelerazione prodotta su una particella posta al centro è

$$a_O = \frac{Gm}{r^2}$$

e quella prodotta in B è

$$a_B = \frac{Gm}{(r + R)^2}$$

con $a_A > a_B > a_C$.

In A l'accelerazione relativa rispetto al centro della Terra (detta accelerazione differenziale e che agisce nel sistema di riferimento solidale con la Terra) è la differenza tra i vettori a_A e a_O che, tenendo presente che $R \ll r$ (si può trascurare al numeratore il termine R^2 mentre al denominatore si può sostituire $(r - R)^2$ con r^2) si ha:

$$\Delta a_A = a_A - a_O \approx 2Gm \frac{R}{r^3}$$

Analogamente per il punto B si ottiene:

$$\Delta a_B - a_O \approx -2Gm \frac{R}{r^3}$$

che punta in verso opposto al centro della Terra. In A e in B la Luna indebolisce la forza di gravità mentre in C e in D le accelerazioni relative dovute alla Luna sono dirette verso il centro della Terra rafforzando dunque la forza di gravità. L'accelerazione differenziale è dunque direttamente proporzionale al raggio della Terra e inversamente proporzionale al cubo della distanza dalla Luna. Si hanno due rigonfiamenti in A e in B producendo un ellissoide allungato nella direzione della Luna.

La rotazione della Terra ha poi per effetto di spostare in ogni istante il rigonfiamento di marea (in un giorno lunare di 24 ore e 5 minuti si rilevano due alte maree e due basse maree).

Anche il Sole produce maree sulla Terra in modo analogo ma l'intensità delle forze generatrici è 2.2 volte più debole:

$$\frac{F_{M,L}}{F_{M,S}} = \frac{\frac{m_L}{r^3}}{\frac{m_S}{d^3}} = 2.2$$

L'accelerazione relativa dovuta al Sole è infatti $2Gm_S R/a^3$ dove m_S è la massa del Sole ed a è la distanza Terra-Sole.

Il gradiente gravitazionale soprattutto lunare provoca sul nostro pianeta un rigonfiamento sia delle masse d'acqua che della parte solida e probabilmente anche dell'atmosfera e del nucleo. Tuttavia la viscosità di questi fluidi e la non perfetta elasticità della litosfera comportano processi dissipativi che generano un ritardo nella risposta di marea e inoltre la Terra ruota più velocemente di quanto orbita la Luna quindi i rigonfiamenti mareali non risultano perfettamente allineati con la congiungente T-L. I due bulges sarebbero allineati se:

- la rotazione della Terra fosse sincrona con la Luna (rigonfiamenti fissi nel sdr solidale con la Terra, ovvero quello che avviene sulla Luna)
- la Terra fosse perfettamente elastica

I rigonfiamenti mareali sono quindi trascinati in avanti dalla rapida rotazione della Terra solida e perciò avanzano rispetto alla linea dei centri con un certo angolo. L'attrazione gravitazionale dà dunque luogo ad una coppia di forze e produce un momento di marea che tende a contrastare la rotazione della Terra, rallentandola.

Dato che il sistema Terra-Luna può essere considerato isolato, il momento angolare totale del sistema in buona approssimazione si conserva: la riduzione del momento angolare della Terra è accompagnato da un aumento del momento angolare orbitale J_L della Luna. Di conseguenza aumenta anche la distanza r e il satellite si sposta lentamente su un'orbita più alta mentre la sua velocità angolare orbitale ω_L progressivamente diminuisce.

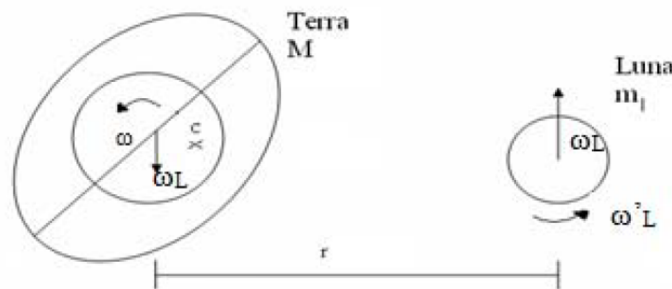


Figura 2: Rotazione del sistema Terra-Luna

Come si vede in Fig. 2 la Terra e la Luna ruotano attorno ai propri assi con velocità angolari ω e ω'_L mentre il sistema Terra-Luna ruota intorno al suo centro di gravità C con velocità angolare ω_L (attualmente risulta $\omega'_L = \omega_L$). Il reale moto di rotazione del sistema che ruota attorno al proprio baricentro (problema a due corpi) è equivalente a quello di un sistema composto da un'ipotetica terra di massa pari a quella totale del sistema non sottoposta ad alcuna forza e con il centro immobile nel baricentro del sistema e da una luna fittizia di massa pari alla massa ridotta del sistema

$$\mu = \frac{m_L M}{m_L + M}$$

che le ruota attorno soggetta ad una forza $F = Gm_L M/r^2$. L'equazione del moto del satellite è allora

$$F = \mu a$$

dove $a = \omega_L^2 r$ è l'accelerazione centripeta dovuta alla rotazione attorno al centro della terra ed F è la forza gravitazionale. Deve quindi risultare

$$G \frac{m_L M}{r^2} = \frac{m_L M}{m_L + M} \omega_L^2 r$$

e semplificando si ottiene

$$\omega_L^2 r^3 = G(m_L + M) \quad \Rightarrow \quad \omega_L^2 = \frac{G(m_L + M)}{r^3}$$

da cui si vede che la velocità angolare orbitale ω_L del satellite diminuisce all'aumentare della distanza r dalla Terra. Per definizione del momento angolare orbitale $J_L = \mu \omega_L r^2$, si ha:

$$J_L = \mu \sqrt{G(m_L + M)r}$$

Il momento angolare del sistema Terra-Luna è dato da

$$J_{TOT} = J + J_L + J'_L \simeq J + J_L$$

dove J_L è il momento angolare assiale della Terra, J_L è il momento angolare orbitale del sistema e J'_L è il momento angolare assiale della Luna (trascurabile). Il momento angolare totale si conserva quindi se J diminuisce allora J_L aumenta e anche r aumenta.

1.2 Evoluzione mareale del sistema Terra-Luna e di altri sistemi pianeta-satellite

Una possibile teoria è che la Luna si sia formata in un'orbita equatoriale per accrezione e inizialmente si trovava molto più vicina alla Terra quindi con un periodo molto breve ma le forze mareali esercitate dalla Terra sulla Luna hanno rallentato la rotazione lunare allontanandola e dissipando energia sotto forma di calore. Tale processo dissipativo si fermò al raggiungimento di una situazione di corotazione ($\omega'_L = \omega_L$). Il tempo necessari per raggiungere questa situazione si stima essere stato dell'ordine di 10 milioni di anni. Una volta che si stabilisce la corotazione del satellite, l'evoluzione successiva può seguire due strade a seconda che il periodo di rivoluzione del satellite (P_{riv}) risulti minore o maggiore del periodo di rotazione assiale del pianeta (P_{rot}).

Il caso $P_{riv} < P_{rot}$ non è molto comune e nel Sistema Solare è realizzato solamente in pochi casi, tra cui il satellite di Marte Phobos: i rigonfiamenti mareali del pianeta anzichè essere trasportati in avanti, restano indietro rispetto. alla linea dei centri quindi la diversa attrazione gravitazionale di Phobos provoca su due punti agli antipodi una coppia di forze ovvero un momento di marea che tende ad accelerare la rotazione del pianeta. Di conseguenza si riduce anche il raggio orbitale del satellite e ciò avviene con una rapidità sempre maggiore dato che la velocità di avvicinamento vale:

$$\frac{dr}{dt} = r_0 \left(\frac{r_0}{r} \right)^6$$

Phobos è dunque destinato a cadere sul pianeta o ad essere distrutto al superamento del limite di Roche. Questo tipo di meccanismo può portare alla formazione di anelli attorno al pianeta stesso.

Il caso $P_{riv} > P_{rot}$ come nel caso del sistema Terra-Luna. In tal caso a causa dell'attrito di marea sul pianeta il satellite tende ad allontanarsi rallentando la rotazione del suo pianeta fino a quando "giorno" e "mese" avranno la stessa durata, l'orbita sarà circolare ed i rigonfiamenti mareali saranno allineati sulla linea dei centri: raggiunta questa configurazione non viene dissipata energia né sul satellite né sul pianeta e il sistema si trova in una fase di equilibrio stabile. Se consideriamo i satelliti destinati ad avere questo tipo di evoluzione mareale e facciamo una stima del tempo necessario per raggiungere la fase finale otteniamo valori di gran lunga maggiori dell'età del sistema solare quindi i sistemi considerati sono ben lontani dall'essere sincroni.

L'unica eccezione è il sistema Plutone-Charonte ($P_{riv} = P_{rot}$): il satellite rivolge sempre la stessa faccia al pianeta e viceversa dimostrando dunque di essere un sistema sincrono.

1.3 Conseguenze delle forze mareali

In generale la forza che agisce tra un satellite e il suo pianeta primario è

$$F = \frac{2GMmR}{r^3}$$

dove M è la massa del primario e m del satellite, r è la distanza tra i due centri e R il raggio del primario.

Le forze mareali risultano dalla differenza nella forza di gravità in punti diversi di un corpo in movimento cioè la forza con cui un corpo è attratto o respinto lungo la congiungente i due corpi. Sono forze differenziali e sono molto comuni nel Sistema Solare causando molti processi dinamici.

Tidal locking (risonanze): le forze mareali portano la rotazione e l'orbita dei corpi ad essere sincronizzati in rapporti interi. Il caso più evidente è la **rotazione sincrona** (risonanza 1:1) dove un satellite ruota con lo stesso ritmo del suo periodo orbitale. L'orbita del satellite si modifica in modo tale da conservare il momento angolare dell'intero sistema. Questo fenomeno è chiamato **ingabbiamento mareale** perché nel suo stadio finale i due oggetti girano attorno al comune centro di massa rivolgendosi sempre la stessa faccia.

Tidal heating: le forze mareali possono anche riscaldare l'interno di un satellite. I satelliti ruotano ad una velocità costante in orbite eccentriche e la loro velocità varia con la distanza dal pianeta. Il rigonfiamento mareale non si trova costantemente sulla congiungente tra i due centri quindi in certi punti dell'orbita il rigonfiamento si troverà più avanti o più indietro rispetto a dove si dovrebbe trovare e il pianeta esercita una piccola forza sul rigonfiamento stesso. La frizione causata dal rigonfiamento che viene spostato avanti e indietro attraverso il corpo solido del satellite riscalda il suo interno.

Io è un esempio estremo di riscaldamento mareale. Lungo la sua orbita incontra frequentemente Europa e Ganimede causando una temporanea variazione delle forze mareali che vengono esercitate su di esso, spostando il rigonfiamento lungo la superficie del satellite. Ne consegue un intenso vulcanismo e temperature interne di 2000 K.

Il riscaldamento mareale è anche probabilmente responsabile del mantenimento dell'interno di Europa abbastanza caldo da garantire la presenza di acqua liquida. La superficie di questa luna è ricoperta di spaccature dovute allo stress mareale e al di sotto della crosta si ipotizza che il riscaldamento dovuto alla frizione porti ad un oceano molto sottile.

Anche Encelado, una luna di Saturno, è un'evidenza del riscaldamento mareale, presentando dei geyser di ghiaccio.

1.4 Il limite di Roche

Nel 1848, l'astronomo Edouard Roche notò che se un satellite è tenuto insieme principalmente dalla sua stessa forza di gravità (legami elettrochimici deboli), esiste una distanza minima dal pianeta entro la quale le forze mareali del pianeta sono superiori alle forze di legame del satellite e quindi lo distruggono. Il limite di Roche si applica solamente a cori fluidi tenuti insieme unicamente da forze di gravitazione. Satelliti piccoli possono esistere all'interno del limite di Roche del primario dal momento che i loro legami elettrochimici sono più forti dei loro legami gravitazionali. per piccoli satelliti rocciosi il limite di Roche è approssimato a $1.44 R_{planet}$.

Tutti i grandi satelliti orbitano all'esterno del limite di Roche del pianeta mentre i piccoli satelliti rocciosi possono esistere anche al suo interno. Bisogna considerare la dimensione della luna dal momento che più piccolo è un oggetto, minore è la differenza tra i suoi due estremi e le forze mareali sono troppo deboli. Queste lune possono esistere all'interno degli anelli ma bisogna tener conto che sono molto piccole.

1.5 Recap tidal forces

Le forze mareali deformano ogni corpo sul quale vengono esercitate forze gravitazionali differenziali. Le forze mareali sono reciproche e tale fenomeno ha generalmente i seguenti effetti:

- Riscaldamento dell'interno indotto dalle maree: probabilmente è ciò che mantiene l'acqua liquida su Europa
- Ingabbiamento gravitazionale

Esiste un raggio limite, il limite di Roche, entro il quale i satelliti possono essere distrutti dalle forze mareali e i corpi solidi non possono crescere per accrezione.

2 Corpi minori

Oltre ai pianeti e a corpi di grandi dimensioni, il Sistema Solare contiene moltissimi corpi più piccoli ma non per questo meno importanti. Questi corpi sono:

- Meteoriti
- Asteroidi
- Transnettuniani e Centauri
- Comete
- Oggetti di transizione

Vi sono regioni con maggiore concentrazione di questi corpi: i Near Earth Objects (< 1.5 AU), la Main Belt (2.2-3.3 AU), la Kuiper Belt (> 40 AU) e la Nube di Oort ($10^4 - 10^5$ AU). Vi sono anche altre regioni tra le principali concentrazioni (Troiani, Centauri, oggetti di transizione...)

I corpi minori hanno un alta valenza scientifica dal momento che sono gli oggetti più primitivi del SS e quindi il loro studio consente di investigare le fasi primordiali della formazione ed evoluzione del SS. In particolare le comete conservano un ricordo praticamente immutato della composizione, temperatura e densità della nube da cui si formò il SS. Le comete consentono di studiare il vento solare dallo studio della coda di ioni dalla quale si ottengono informazioni sulla densità e velocità del vento. Gli asteroidi invece consentono di investigare l'evoluzione termica e dinamica del SS.

Rappresentano inoltre le principali sorgenti di meteoriti che arrivano sulla Terra e gli impatti con questi oggetti sono la causa principale della craterizzazione dei corpi nella regione interna del SS, compresa la Terra rappresentando dunque anche un fattore di rischio (possono essere stati responsabili di estinzioni di massa). Sono stati inoltre veicoli di molecole organiche e di acqua e forse responsabili del sorgere della vita sulla Terra.

2.1 Origine di comete e asteroidi

Asteroidi e comete sono il materiale rimanente delle prime fasi di accrezione della nebulosa solare. Nel caso degli asteroidi una delle prime ipotesi suggeriva che fossero i resti della distruzione catastrofica di un pianeta ma data la grande varietà di questi oggetti, la provenienza da un unico progenitore è ormai completamente abbandonata anche alla luce dei modelli di evoluzione Grand Tack e Nizza.

Gli asteroidi e le comete sono quindi materiale che non riuscì ad unirsi a formare un pianeta, per questo motivo sono materiali primitivi. Si ritiene che se tutta la massa degli asteroidi stimati venisse messa insieme si otterrebbe un oggetto con un diametro di circa 1500 km, metà di quello della Luna.

L'azione perturbativa dei pianeti giganti lasciò indisturbata una parte di questi planetesimi mentre una grande quantità di essi ebbe vari destini: molti caddero sul Sole, altri andarono a collidere con i pianeti stessi, altri furono deflessi in orbite esterne al Sistema Solare (TNO scattered region) e altri ancora furono deflessi in orbite stabili ma più lontane (Nube di Oort).

Il modello di Nizza è il modello fisico che simula l'evoluzione dinamica del sistema solare nelle fasi immediatamente successive alla sua formazione (il Grand Tack invece descrive le fasi di formazione). Il modello propone che, dopo la dissipazione del gas dal disco protoplanetario, i quattro giganti gassosi abbiano subito una migrazione verso le attuali orbite partendo da una configurazione orbitale più compatta e vicina al Sole. Il modello spiega alcuni avvenimenti come il bombardamento asteroidale del sistema solare interno, la formazione della Nube di Oort, la fascia di Kuiper, gli asteroidi troiani di Giove e Nettuno e gli oggetti transnettuniani risonanti.

Il gran numero di crateri da impatto rinvenuti sulla Luna e sui pianeti rocciosi (4.1-3.8 mld di anni fa) è una delle principali evidenze del late heavy bombardment, un periodo caratterizzato da un'intensificazione del numero di impatto. Il numero di planetesimi che hanno raggiunto la Luna secondo il modello di Nizza è coerente con quello dedotto dai crateri.

La migrazione dei pianeti più esterni, la risonanza tra Giove e Saturno e le interazioni con Giove sono necessarie per spiegare la struttura delle regioni più esterne del sistema solare. Secondo il modello gli oggetti costretti da Giove in orbite altamente ellittiche andarono a formare la nube di Oort, serbatoio della gran parte delle comete del sistema solare, mentre gli oggetti vincolati da Nettuno durante la sua migrazione andarono a costituire l'attuale cintura di Kuiper.

Originariamente al limite esterno del sistema solare era già presente una cintura asteroidale considerata l'antenata della cintura di Kuiper, più densa e vicina al Sole di quanto oggi non sia la sua "discendente": il suo bordo esterno si estendeva fino a circa 30-35 UA. Anche Urano e Nettuno si trovavano in orbite più interne ma in posizioni invertite.

Durante la migrazione alcuni degli oggetti, tra cui Plutone, vennero ad interagire con l'orbita di Nettuno instaurando con essa una risonanza orbitale. Il modello di Nizza è in grado di spiegare l'occupazione delle attuali risonanze nella cintura di Kuiper.

Durante tutta la "fase dispersiva" la piccola percentuale di planetesimi rimanenti occuparono essenzialmente tre regioni principali del sistema solare, dinamicamente stabili:

- la fascia asteroidale
- la fascia di Kuiper
- la nube di Oort

Sulla base dei modelli visti la nube di Oort risulterebbe quindi costituita da oggetti che si sono formati più vicino al Sole (tra i pianeti giganti) della popolazione della Kuiper Belt (materiale che non ha subito migrazioni).

Esistono quindi due classi di proto-comete che sono sopravvissute alla formazione del sistema solare:

- quelli formati nel disco proto-planetario transnettuniano
- quelli che sono stati trasferiti dalle perturbazioni planetarie nella nube di Oort tra $2 \cdot 10^4$ e 10^5 AU, dove non sono affetti dalle perturbazioni dei pianeti.

La nube sembra avere un limite interno. Calcoli numerici dimostrano che il numero di protocomete catturate diventa molto basso a $< 1.7 \cdot 10^4$. Si ipotizza che durante il trasferimento alla nube di Oort le comete furono in grado di trattenere i gas ghiacciati di cui sono largamente composte. Nelle comete si hanno rapporti isotopici costanti che dimostrano che sono state formate all'interno del sistema solare.

3 Le comete

Ogni volta che viene scoperta una cometa le viene assegnato un nome. Dapprima si tratta dell'anno della scoperta seguito da una lettera dell'alfabeto a seconda che sia la prima (a), la seconda (b) e così via (ad esempio la prima cometa del 2007 è 2007a). Inoltre la cometa riceve il nome del suo scopritore, che possono essere più di uno se la scoperta è stata fatta contemporaneamente da più persone.

La cometa viene poi studiata e quando sono noti gli elementi orbitali definitivi l'Unione Astronomica Internazionale assegna il nome definitivo che identifica anche l'epoca del passaggio al perielio, cioè il momento in cui la cometa aggira il Sole e comincia il viaggio di ritorno. Vengono allora usati i numeri romani (1956 VI è la sesta cometa ad essere passata al perielio nel 1956).

3.1 Classificazione

Le comete vengono classificate sulla base delle loro orbite:

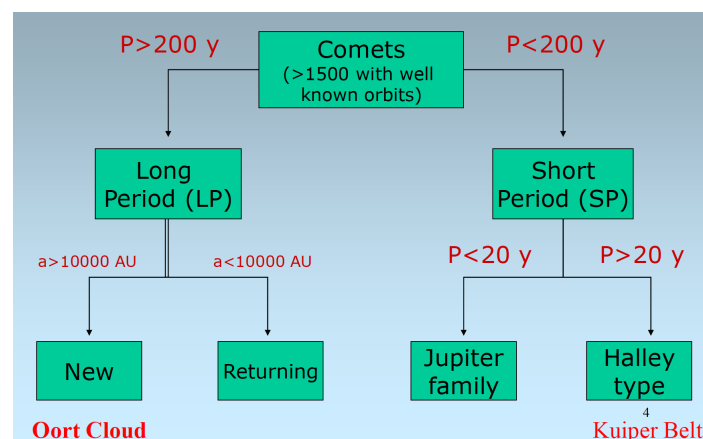


Figura 3: Classificazione comete

Le comete di corto periodo hanno un periodo più breve di 200 anni, il 60% hanno un periodo compreso tra 5 e 6.5 anni. Il loro afelio tipico è di 40-70 AU e hanno orbite ellittiche. Le loro inclinazioni sono basse, vicino al piano equatoriale.

Circa il 7% sono retrograde ma la maggior parte sono prograde.

Le comete di lungo periodo hanno un periodo che varia tra i 200 anni e i 10^7 , La maggior parte non sono viste due volte. Se il corpo proviene da regioni esterne al sistema solare o lo sta lasciando la sua orbita sarà iperbolica o parabolica ma è difficile stabilire con certezza che non sia un'orbita ellittica fortemente eccentrica. Le loro inclinazioni sono casuali e il moto è solitamente retrogrado. Il rilascio di materiali volatili nel momento in cui si avvicinano al sole perturba l'orbita (valido anche per comete di corto periodo ma solitamente sono meno attive).

La bassa inclinazione delle comete a corto periodo era difficile da spiegare con un'origine dalla nube di Oort dove le inclinazioni sono del tutto casuali e le orbite tipicamente retrograde. Sulla base di queste considerazioni Edgeworth e Kuiper postularono l'esistenza della Kuiper Belt. Allo stesso tempo Oort presentò un modello in cui le comete a lungo periodo deriverebbero da una nube cometaria di forma sferica (da cui le inclinazioni casuali) localizzata tra $10^4 - 10^5$ AU (≈ 0.5 pc) contenente circa 10^{12} comete con periodi di $10^6 - 10^7$ anni. Oort propose che stelle di passaggio possano essere responsabili delle modifiche delle orbite di alcune comete facendole penetrare nella regione planetaria. Dato che la nube di Oort ha forma sferica, le comete possono entrare nel ss da qualunque direzioni quindi le inclinazioni orbitali possono assumere qualunque valore. Pertanto possiamo avere comete a lungo periodo prograde o retrograde e appaiono senza previsioni.

Esiste un altro modo per classificare le comete da un punto di vista dinamico utilizzando l'**invariante di Tisserand** che consente anche il riconoscimento delle comete periodiche. Le comete periodiche, dopo il primo passaggio, si ripresentano nei passaggi successivi con i parametri orbitali mutati in maniera più o meno marcata. Le cause sono principalmente due:

1. La perdita di materiale da parte della cometa nel passaggio attorno al Sole (e conseguente diminuzione della massa del nucleo cometario)
2. perturbazioni che i pianeti (in particolare Giove) esercitano sulla cometa

Il riconoscimento di una cometa periodica, nei passaggi successivi al primo, è un problema complicato in quanto bisogna calcolare di volta in volta gli effetti dovuti alle perturbazioni. Tisserand ha cercato un'espressione matematica invariante che accompagnasse la cometa periodica durante tutti i suoi passaggi e ne sancisse la sua identità. Questo invariante è utile quando si tratta di riconoscere un corpo che tra due successive osservazioni ha subito un incontro con un pianeta che ne ha alterato sensibilmente l'orbita. È utile in particolare per le comete della famiglia di Giove.

L'**invariante di Tisserand** si ottiene studiando il caso di un sistema a tre corpi formato da Sole, Giove e cometa. Tisserand osserva che le maggiori perturbazioni sulle comete provengono da Giove pertanto il moto della cometa si può considerare come un caso particolare del problema dei tre corpi. Si possono fare delle semplificazioni:

1. massa della cometa trascurabile
2. eccentricità orbitale di Giove nulla

Sotto queste ipotesi semplificative il problema dei tre corpi ammette una soluzione, denominata **integrale di Jacobi** sulla quale operando Tisserand giunge all'espressione dell'invariante:

$$\frac{a_J}{a} + 2\sqrt{\frac{a(1-e^2)}{a_J}} \cos i = T$$

dove a è il semiasse maggiore dell'orbita della cometa, a_J quello di Giove, e l'eccentricità e i l'inclinazione dell'orbita della cometa sul piano dell'eclittica.

L'invariante di Tisserand fornisce pertanto un test per verificare che due oggetti visti in due successive apparizioni siano la stessa cometa indipendentemente dal cambiamento degli elementi orbitali.

L'invariante di Tisserand può essere usata per fare una suddivisione delle comete, vedi Fig. 4:

- comete con $T > 2$ sono comete eclittiche dato che la maggior parte dei membri ha piccole inclinazioni
- Comete con $T < 2$ sono comete quasi isotropiche, riflettendo la loro distribuzione di inclinazioni

T è quasi costante se si considera solo la perturbazione di Giove, che è la principale e cambia poco a causa delle perturbazioni planetarie o degli effetti non gravitazionali. Simulazioni numeriche dimostrano che T è quasi costante sui tempi di vita dinamici delle orbite cometarie ($5 \cdot 10^5$ y) e ciò rende la suddivisione significativa.

Le comete eclittiche si suddividono a loro volta in tre gruppi:

- la famiglia di Giove con $2 < T < 3$

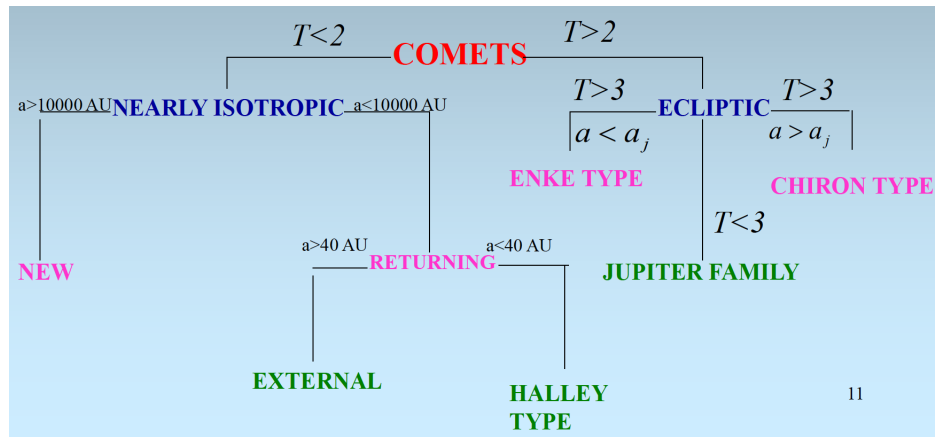


Figura 4: Classificazione Tisserand

- le comete di tipo Encke con $T > 3$ e $a < a_J$
- le comete di tipo Chirone con $T > 3$ e $a > a_J$

Da notare che solo le comete con $T \leq 3$ incontrano Giove mentre gli altri due gruppi sono interamente dentro o fuori. L'evoluzione attraverso la soglia $T = 3$ è possibile quindi le orbite di tipo Chirone possono evolvere in orbite di tipo JFC. Dto che le prime sono fornite dalla regione transnettuniana, quest'ultima è la possibile origine di tutte le comete eclittiche. Il problema più difficile è tracciare l'evoluzione verso orbite di tipo Encke dato che le forze non gravitazionali sembrano giocare un ruolo importante.

Le comete quasi isotropiche sono suddivise in due gruppi: nuove e ricorrenti. Il gruppo delle ricorrenti ricopre un range elevato di comete, da quelle con $a < 10000$ AU fino a quelle con periodi orbitali vicini a 20 y. Include anche alcune che di solito appartengono a quelle di tipi Halley. Le loro orbite sono distribuite isotropicamente nello spazio. Come per le comete eclittiche, le orbite possono cambiare sottoclasse quando arrivano e vengono catturate. La nube di Oort è la sorgente delle comete quasi isotropiche e una parte di queste comete viene perturbata in seguito a passaggi di stelle e dense nubi interstellari e anche a causa di perturbazioni galattiche.

Sul lungo termine diventano osservabili ogni anno circa 10 nuove comete.

3.2 Orbite cometarie

Una volta deflesse nel sistema solare interno, le comete seguono orbite che le portano vicino al Sole per poi tornare nelle regioni esterne dove trascorrono la maggior parte della loro vita. Nel corso del passaggio attorno al Sole le comete incontrano i pianeti, soprattutto Giove, il che aumenta il rischio di collisioni o cattura.

Più a lungo una cometa orbita attorno al Sole maggiore sarà la probabilità di interagire con pianeti che ne perturberanno l'orbita. La conseguenza tipica è la cattura di un'orbita più piccola diventando una cometa a corto periodo di tipo JFC.

Le comete a corto periodo solitamente lasciano una scia di polvere nella loro orbita attraverso la quale la terra passa occasionalmente dando vita agli "sciame meteorici". L'aspettativa di vita di una cometa dopo la cattura in un'orbita a corto periodo è tipicamente solo di poche migliaia di anni. Essenzialmente sono possibili tre destini:

- Impatto diretto su un pianeta (vedi Shoemaker-Levy su Giove, la quale ha creato nuovi composti lasciando visibili le tracce dell'impatto sulla superficie del pianeta)
- Ulteriori interazioni con i pianeti giganti possono provocare un continuo decadimento dell'orbita e un impatto finale diretto sul Sole ("sun-grazers")
- Esaurimento dei volatili e/o disintegrazione del nucleo dopo numerosi passaggi al perielio

3.3 Perturbazioni planetarie e forze non gravitazionali

Il moto di una cometa è influenzato, oltre che dal campo gravitazionale solare, che è la forza più intensa, anche dai pianeti quando entra nel sistema solare (in particolare Giove e Saturno) e dalle forze non gravitazionali. Nelle regioni esterne invece il moto cometario subisce perturbazioni dovute a stelle.

L'orbita di una cometa è dunque in generale perturbata fortemente dai pianeti quando entra nel sistema solare interno. La perturbazione prodotta da tali incontri può essere incorporata nel calcolo dell'orbita cioè nell'equazione del moto che diventa:

$$\frac{d^2 r}{dt^2} = -GM_{\odot} \frac{\rho}{r^3} + \nabla R$$

dove r è il raggio vettore, G la costante gravitazionale e ∇R la forza che rappresenta la perturbazione gravitazionale dei pianeti con il potenziale R dato da

$$R = G \sum_i m_i \left(\frac{1}{d_i} - \frac{xx_i + yy_i + zz_i}{r_i^3} \right)$$

con m_i masse dei pianeti perturbanti, d_i distanze pianeta-cometa, r_i distanza pianeta-Sole, (x, y, z) coordinate eliocentriche della cometa e (x_i, y_i, z_i) coordinate eliocentriche dei pianeti.

L'influenza dei pianeti sul moto delle comete si fa sentire soprattutto negli incontri ravvicinati. per ogni pianeta è possibile definire una sfera di influenza di raggio $R = m^{2/5} r$ che per la Terra vale $R = 6.19 \cdot 10^{-3}$ AU e per Giove $R = 0.322$ AU.

Tuttavia si è visto che, nonostante si tenga conto delle perturbazioni planetarie, gli elementi orbitali cambiano tipicamente ad ogni rivoluzione e predire la futura esatta posizione della cometa sulla sua orbita ad un dato tempo risulta molto complesso.

Una cometa molto nota per cui tale effetto è molto evidente è la cometa Encke con un periodo di 3.3 anni. Ad ogni rivoluzione torna circa 2 ore e mezza troppo presto. Si è anche notato che circa metà delle comete studiate arriva prima del tempo previsto mentre l'altra metà arriva più tardi dunque metà risultano accelerate e metà decelerate, il che dimostra che esiste una forza addizionale di tipo non gravitazionale che agisce sulla cometa. Questa forza diminuisce sostanzialmente con l'aumento della distanza della cometa dal Sole. Si ha dunque che nel corso dell'outgassing mentre le comete si avvicinano al perielio, l'emissione di gas e polvere sotto forma di getti o improvvise esplosioni applica una piccola forza al nucleo detta forza non gravitazionale e queste forze sono sufficienti per alterare sensibilmente l'orbita della cometa. Questi getti producono delle forze di reazione, come un effetto razzo, sul nucleo modificando il suo periodo orbitale.

Dunque l'equazione del moto di una cometa che tiene conto sia delle perturbazioni planetarie che delle forze non gravitazionali diventa:

$$\frac{d^2 r}{dt^2} = -GM_{\odot} \frac{\rho_r}{r^3} + \nabla R + \frac{\rho}{F_r} + \frac{\rho}{F_t} + \frac{\rho}{F_n}$$

Gli ultimi tre termini tengono conto dell'accelerazione dovuta alle forze non gravitazionali. Se il nucleo non fosse in rotazione l'unica componente della forza non gravitazionale che agirebbe su di esso sarebbe la componente radiale. Sul nucleo in rotazione, invece, si può trascurare quella normale, la componente radiale produce una semplice riduzione apparente della gravitazione solare mentre la componente tangenziale produce un aumento o diminuzione del periodo orbitale. Non si tratta di variazioni costanti.

Siccome non si può conoscere esattamente l'orientazione dell'emissione cometaria sulla superficie non possiamo predire se le forze non gravitazionali agiscono per accelerare o decelerare la cometa nella sua orbita, si ha dunque una notevole incertezza nel predire con precisione il comportamento dell'orbita di una cometa attiva.

Dato che la natura delle tre componenti F_r , F_t , F_n non era nota si pone

$$F_i = A_i f(r)$$

con $A_i = (A_r, A_t, A_n)$ parametri non gravitazionali e si è visto che la funzione empirica $f(r)$ è in buon accordo con la funzione

$$g(r) \propto \alpha \left(\frac{r}{r_0} \right)^{-m} \left[1 + \left(\frac{r}{r_0} \right)^n \right]^{-k}$$

che proviene dalla teoria della vaporizzazione. Conoscendo la funzione $f(r)$ si possono calcolare le costanti A_i in modo da fittare con le osservazioni. Per la maggior parte delle comete $A_n = 0$ e il termine corrispondente ad A_t è quello che influenza l'energia orbitale della cometa.

3.4 Effetto razzo

Se la rotazione del nucleo è concorde con il moto di rivoluzione (figura A) la reazione del getto spingerà la cometa in avanti sull'orbita, allargandola e aumentandone il periodo (ritardo al passaggio successivo). Se il nucleo ruota

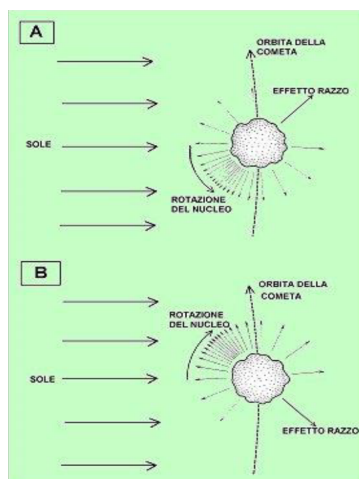


Figura 5: Effetto razzo

in direzione opposta al suo moto orbitale intorno al Sole (figura B), l'effetto razzo causerà una forza frenante che spingerà la cometa verso l'interno in direzione del Sole, con la conseguente diminuzione del periodo (anticipo al passaggio successivo). Quindi, quando la radiazione solare colpisce il nucleo, il materiale evapora dalla superficie e si muove nella direzione della radiazione incidente. Se il nucleo è in rotazione allora ci sarà un ritardo tra il riscaldamento e l'emissione del gas da ogni punto della superficie. Se si assume che gli assi di rotazione del nucleo siano distribuiti a caso allora ci si aspetta che metà di esse siano accelerate e metà ritardate e ciò è consistente con le osservazioni. I parametri gravitazionali A_r e A_t rappresentano i tassi relativi di perdita di massa. Circa l'1% del materiale viene perso dalla cometa in una rivoluzione.

4 Kuiper Belt

Si estende da 30 AU dal Sole, oltre l'orbita di Nettuno, con alta concentrazione nella fascia compresa tra 30 e 50 AU. La sua estensione non si conosce ancora con certezza dal momento che si ha una brusca interruzione a circa 50 AU. Le possibili spiegazioni di questa interruzione sono:

- Albedo sistematicamente più basse oltre a 50 AU
- Decrescita di r_{max} dei KBOs: ci si potrebbero aspettare degli effetti basati sulla crescita dei planetesimi
- Troncamento mareale dovuto al passaggio di una stella con periasse di 150-200 AU.

È costituita da due popolazioni principali: quella di oggetti con bassa inclinazione e bassa eccentricità (**cold population**) e quella di oggetti con alta inclinazione e alta eccentricità (**hot population**). Dodici pianeti minori con un semiasse maggiore più grande di 150 AU e un perielio maggiore di 30 AU sono chiamati extreme trans-Neptunian objects (ETNOs). Il piano della fascia è vicino all'eclittica. Probabilmente contiene più di 100 mila oggetti e la massa totale è circa il 10% di quella terrestre. La maggior parte degli oggetti hanno un diametro di 100 km ma ce ne sono anche di più grandi. Hanno magnitudini molto basse, dell'ordine di 20-28 mag ma sono visibili anche da terra. Si muovono molto lentamente e hanno una temperatura di circa 40 K con emissione termica nel radio submillimetrico.

Gli oggetti transnettuniani (chiamati anche classici o cubewani) possono essere suddivisi in una classificazione dinamica: Gli oggetti si dividono in tre grandi classi:

- **Classici o cubewani** (orbite blu): circa il 60% di quelli osservati, la maggior parte hanno inclinazione bassa. Hanno orbite molto stabili
- **Risonanti** (orbite rosse): sono intrappolati in risonanze di moto medio con Nettuno in orbite stabili, divisi in Plutini (circa 10% di tutti i transnettuniani, possono attraversare l'orbita di Nettuno) e Twotini
- **Scatterati** (orbite grige): contiene oggetti con orbite irregolari con eccentricità e inclinazioni elevate, probabilmente un gruppo di oggetti espulso da Nettuno durante i primi stadi di migrazione planetaria. Hanno caratteristiche orbitali molto simili a quelle delle comete a corto periodo quindi potrebbero essere la sorgente di queste comete.

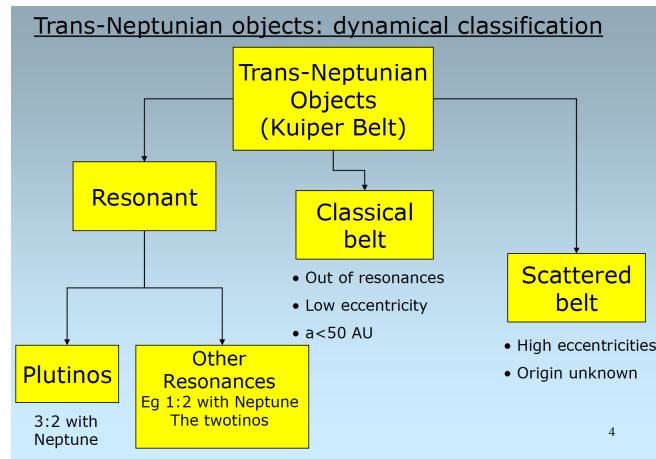


Figura 6: Classificazione oggetti trans-nettuniani

4.1 Formazione della Kuiper Belt

La fascia di Kuiper classica sembra essere composta da due diverse popolazioni. La prima, nota come **popolazione dinamicamente fredda** è composta da oggetti con orbite quasi circolari, con eccentricità orbitale inferiore a 0.1 e inclinazioni orbitali non superiori a 10° . La seconda, la **popolazione dinamicamente calda** ha orbite molto più inclinate rispetto all'eclittica. Le due popolazioni non solo possiedono orbite diversi ma anche diversi colori: la popolazione fredda è decisamente più rossa di quella calda. Se il colore riflette diverse composizioni indica che esse si siano formate in diverse regioni. La popolazione calda si ritiene che si sia formata nei pressi di Giove e sia successivamente stata espulsa dai movimenti e dalle interazioni gravitazionali dei giganti gassosi. La popolazione fredda invece si pensa che si sia formata più o meno nella posizione attuale anche se potrebbe essere stata scagliata verso l'esterno successivamente durante la migrazione di Nettuno.

4.2 Oggetti risonanti (Plutini e altri)

Un numero significativo di TNOs osservati sono intrappolati in risonanze di moto medio con Nettuno. La maggior parte di essi si trovano in una risonanza di moto medio 3:2 con Nettuno e vengono chiamati Plutini ($\approx 10\%$ dei KBOs). Le loro orbite sono stabili e molto eccentriche. Molti Plutini attraversano l'orbita di Nettuno ma la loro risonanza impedisce gli incontri ravvicinati con il pianeta.

4.3 Oggetti scatterati

Sono oggetti più lontani dal Sole, solitamente con orbite irregolari (molto inclinate ed eclittiche). Un tipico esempio è il più grande KBO conosciuto: Eris. Probabilmente rappresenta un caotico insieme di corpi scagliato da Nettuno durante i primi stadi di formazione del sistema solare.

Gli oggetti del disco scatterato sono ulteriormente suddivisi in:

- Scattered-near: orbite non risonanti, non attraversano orbite planetarie e hanno $T < 2$
- Scattered-extended: $T > 3$ e un eccentricità maggiore di 0.2
- Sednoids: orbite con distanze perieliche molto elevate non spiegabili con le perturbazioni dei giganti nemmeno dalle maree galattiche. Potrebbero essere oggetti della nube di Oort interna

5 Centauri

I centauri sono corpi che hanno forti interazioni con i pianeti giganti. Sono identificati per il fatto di avere sia il perielio che l'asse maggiore tra le orbite di Giove $a_J = 5.2$ AU e Nettuno $a_N = 30$ AU, con una distanza intermedia tra le comete a corto periodo e gli oggetti della Kuiper Belt. Il primo oggetto scoperto in questa categoria è 944 Hidalgo ma circa 450 centauri sono stati scoperti e si stima che esistano circa 44000 centauri nel sistema solare con diametri maggiori di 1 km.

Tipicamente hanno caratteristiche sia delle comete che degli asteroidi. Alcuni hanno mostrato la presenza di chiome quindi sono stati considerati anche come delle comete. Tendono ad avere una dimensione intermedia tra il nucleo delle comete e gli oggetti della Kuiper belt.

Le loro orbite mostrano un ampio range di eccentricità e sono instabili dal momento che non sono protetti da risonanze orbitali.

Probabilmente sono oggetti della Kuiper belt che hanno oltrepassato l'orbita di Nettuno e hanno interagito gravitazionalmente con il pianeta. Tuttavia le loro orbite sono molto caotiche ed evolvono in maniera molto rapida dal momento che si avvicinano molto spesso ai pianeti esterni.

Modelli dinamici dimostrano che i centauri hanno aspettative di vita limitate dallo scattering o da impatti con i pianeti giganti. Il loro destino più frequente è essere scaraventati nel mezzo interstellare in un tempo scala di 10^8 yr oppure venire catturati da Giove ed entrare a far parte delle comete a corto periodo.

In termini di albedo i centauri assomigliano ai KBOs: sono di colore scuro perché le loro superfici ghiacciate sono state scurite dalla lunga esposizione con la radiazione solare e il vento solare, tuttavia la presenza di crateri recenti espone il ghiaccio sottostante.

Gli indici di colore e i loro spettri possono dare informazioni sulla composizione superficiale e delle ipotesi sulla formazione di questi corpi. I colori dei centauri sono molto vari rendendo difficile qualsiasi modello per la composizione superficiale.

Essi sono divisi in due classi:

- molto rossi: ad esempio 5145 Pholus
- blu (o blu-grigi): ad esempio 2060 Chiron

Ci sono molte teorie per spiegare queste differenze ma sostanzialmente si distinguono due principali ipotesi:

- la differenza di colore risulta da una differenza nell'origine e/o nella composizione del centauro
- la differenza di colore riflette una diversa evoluzione e quindi la radiazione e/o l'attività cometaria ha agito in maniera diversa sull'oggetto

Come esempio di questa seconda ipotesi si ha il colore rossastro di Pholus che potrebbe essere spiegato come un possibile manto di ghiacci contenenti anche carbonio che una volta irradiati producono dei materiali che si scuriscono e di conseguenza si arrossano. Chirone invece potrebbe avere del ghiaccio esposto a causa della sua attività cometaria (andamento spettrale piatto).

Alternativamente Pholus potrebbe essere stato solo recentemente espulso dalla Kuiper belt quindi i processi di trasformazione della superficie non hanno ancora avuto luogo.

Si nota inoltre che la distribuzione dei colori ottici dei centauri non è continua ma suggerisce una sorta di bimodalità mentre i KBOs non hanno questo comportamento. Si può pesare che questo effetto potrebbe essere causato da un'attività presente o passata del centauro.

L'interpretazione degli spettri è condizionata da molte proprietà come ad esempio la dimensione delle particelle ma dà molte informazioni sulla composizione superficiale. Segni di ghiaccio d'acqua sono stati confermati in molti centauri mentre la superficie di Chariklo potrebbe essere un insieme di toline e carbonio amorfo. Pholus potrebbe essere coperto da un mix di toline, olivine, ghiaccio di metanolo e carbone scuro. Chiron è invece più complesso dal momento che gli spettri dipendono dal momento di osservazione: ghiaccio d'acqua è stato trovato durante un periodo di bassa attività ed è scomparso durante un periodo di alta attività. Mostrò una chioma vicino al perielio tra il 1988 e il 1989.

6 TNOs in sistemi binari

Vi sono molti sistemi binari tra i TNOs. La condizione per avere dei veri sistemi binari è che il baricentro del sistema si trovi al di fuori del raggio del primario e dunque

$$a_1 > r_1 \left(1 + \frac{m_1}{m_2} \right)$$

dove r_1 è il raggio del primario e a_1 è la distanza del primario dal centro di massa. Nella Kuiper belt molti oggetti sono di massa quasi equivalente e sono separati da una grande distanza come Plutone e Caronte.

Quando le velocità relative sono più piccole o paragonabili alla velocità di fuga questi oggetti possono "incollarsi" diventando delle binarie di contatto con una forma simile ad un'arachide. Altri oggetti possono invece rimbalzare con un conseguente rilascio di massa ed energia permettendo la formazione di binarie. Altre ancora possono rimbalzare ma non perdere abbastanza energia per formare il legame. In questo scenario i KBOs binari sono il prodotto di impatti a bassa velocità (100 m/s). Le collisioni tra KBOs con dimensioni di 100 km sono molto rare. Statisticamente sono più frequenti i sistemi binari formati da corpi con masse molto diverse e ad una distanza molto piccola (0.1-2" di

separazione).

Plutone è un esempio di un sistema quadruplo formato da lui stesso, Caronte e due satelliti.

La massa dei sistemi binari è data da

$$m_a + m_b = \frac{4\pi^2 a^3}{GP^2}$$

Le albedo e le densità dei sistemi binari sono collegate alla massa: l'albedo è proporzionale alla potenza $2/3$ della densità.

Dall'osservazione di binarie non si osservano particolari trend dell'albedo con la dimensione e nemmeno con l'inclinazione. Non ci sono nemmeno correlazioni tra l'albedo e il colore ottico e non ci sono grosse differenze spettrali tra le componenti delle binarie.

7 Plutone

Plutone è il primo TNO osservato, la cui orbita lo può portare all'interno dell'orbita di Nettuno. È il secondo TNO per massa, superato solamente da Eris nel disco scatterato. Ha una distanza media dal sole pari a 39.5 AU e un periodo orbitale di 250 anni. La sua eccentricità è molto elevata, pari a 0.25, e ha un'orbita retrograda come Venere e Urano. Ha una densità media di 1900 kg/m^3 ed è formato di roccia e ghiaccio. La sua massa è pari a 0.0021 masse terrestri e presenta una tenue atmosfera di N_2 probabilmente non in equilibrio e prodotta da attività intrinseca. Plutone si trova in risonanza 3:2 con Nettuno che dunque rende la sua orbita stabile.

La sua unica luna è Caronte, che in realtà è più grande di Plutone stesso, rendendo possibile la sua identificazione come sistema doppio Plutone-Caronte.

La prima missione che ha raggiunto Plutone nel 2015 è **New Horizon**, lanciata nel 2006, che ha eseguito un fly-by a 12500 km da Plutone con una velocità relativa di 13.78 km/s. In tale occasione ha mappato Plutone e Caronte con una risoluzione di 40 km, ne ha caratterizzato la superficie, l'atmosfera e analizzato gli effetti del vento solare. La massa di Plutone è stata stimata dalle interazioni che ha avuto con la navicella.

La missione evidenziò anche la presenza di ghiaccio di monossido di carbonio nella parte ovest della regione chiamata Tombaugh Regio.

I principali risultati della missione furono:

- Differenze regionali in termini di ghiacci volatili superficiali e dunque presenza di ghiaccio di metano e di monossido di carbonio
- Plutone e Caronte sono geologicamente attivi: nel primo si sono evidenziati ghiacci mobili nella regione ovest della Tombaugh Regio
- La mancanza di crateri nella Sputnik Plutonium mostra che tale area viene costantemente rimodellata, probabilmente da forze tettoniche. Una teoria attribuisce queste forze al calore interno prodotto dal decadimento radioattivo di materiale roccioso nel core di Plutone

New Horizon ha anche mappato le altre lune di Plutone:

- **Caronte**: la sua superficie è molto diversa da quella di Plutone e mostra un insieme di profondi crateri e una regione polare di colore scuro che potrebbe essere causata dalla cattura di materiale volatile da Plutone che è stato trasformato in toline.
- **Kerberos**: superficie altamente riflettente che suggerisce la presenza di ghiaccio d'acqua relativamente puro
- **Nix**: mostra un grande cratere centrale di colore rossastro, come se fosse il risultato di un impatto che ha portato alla luce del materiale più scuro sottostante alla superficie della luna
- **Hydra**: appare composto di due lobi, il che indica che potrebbe essere il risultato della fusione di due oggetti inizialmente separati

Nel Gennaio 2019 New Horizon incontra Ultima Thule. La "vecchia visione" di quest'oggetto lo identificava come due sfere quasi perfette che si incontrano a malapena. Tuttavia, man mano che si sono analizzati i dati è emersa una nuova visione della forma dell'oggetto che suggerisce che Ultima assomigli più ad un "pancake" e Thule ad una "noce ammaccata".

8 Altri oggetti minori

8.1 Sedna

Un oggetto molto distante dal sole, circa a 90 AU da esso dunque agli estremi dell'eliosfera ma la sua orbita lo porta anche oltre. Ha il perielio a 75 AU e un'orbita molto elongata ed inclinata con $a = 530$ AU, $e = 0.85$ e $i = 11$. Non presenta lune e nemmeno si trova in un sistema binario. È grande circa 1200 km ed è molto rosso, la sua composizione è ignota ma probabilmente non presenta molto ghiaccio. Si trova troppo lontano dal Sole per essere considerato un KBOs, potrebbe essere un oggetto della nube di Oort interna dimostrando dunque che la nube di Oort si estende più internamente di quanto si credeva, oppure potrebbe semplicemente essere un oggetto scatterato.

8.2 2003 EL61-Haumea

Haumea è il più grande TNO della Kuiper belt e presenta una luna che gli orbita attorno. Ha una massa pari a circa il 32 % di quella di Plutone. La sua veloce rotazione e la sua forma indicano che deve essere composto quasi totalmente di roccia altrimenti sarebbe completamente stretchato. Dal suo spettro la superficie appare essere composta totalmente di ghiaccio puro quindi potrebbe essere un grande corpo roccioso ricoperto di un sottile strato di ghiaccio.

8.3 136199 Eris

Eris è il più grande pianeta nano nel sistema solare e il nono corpo più grande ad orbitare attorno al Sole direttamente. Ha un diametro compreso tra 2400 e 3000 km e la sua massa è del 27 % più grande di quella di Plutone. È un TNO nativo del disco scatterato. Eris ha una luna, Dysnomia. La distanza dal Sole attuale è di 97 AU, circa tre volte quella di Plutone. Con l'eccezione di alcune comete, il sistema è attualmente il più distante corpo conosciuto nel sistema solare.

La scoperta di Eris fu annunciata nel Luglio del 2005 e venne definito come un pianeta nano e un SDO. Presenta un'orbita molto inclinata, con un'eccentricità pari a 0.44 e un periodo orbitale di 557 anni. La sua albedo elevata indica che probabilmente è composto di ghiaccio, acqua e metano.

9 Proprietà fisiche dei KBOs

Questi corpi sono talmente deboli che per caratterizzarli sulla base di osservazioni dirette come la determinazione del colore superficiale, sono necessari telescopi della classe 4m.

Per tutti gli studi sulla composizione superficiale sono necessarie osservazioni spettrometriche prevalentemente nel vicino IR, le quali possono essere ottenute solamente per gli oggetti più brillanti ($m_v > 23$) usando telescopi della classe 8-10m. La caratterizzazione fisica dei TNOs è ancora in uno stato di investigazione molto primitivo.

Le dimensioni dei TNOs non possono essere misurate direttamente dato che non si possono risolvere. Questa quantità viene pertanto dedotta da misure della luce solare riflessa dal corpo. La correlazione tra la magnitudine apparente, le dimensioni e l'albedo geometrica di un corpo osservato in luce riflessa è espressa dalla relazione

$$pr^2\Phi(\alpha) = 2.25 \cdot 10^{16} R^2 \Delta^2 10^{-0.4(m_{obj}-m_{\odot})}$$

con p albedo geometrica, r raggio dell'oggetto in km, $\Phi(\alpha)$ funzione di fase, R e Δ le distanze eliocentriche e geocentriche in AU, m_{obj} e m_{\odot} le magnitudini apparenti dell'oggetto e del Sole.

Il raggio si determina dunque solo se si conoscono gli altri due parametri: albedo e magnitudine. Di solito si derivano albedo e dimensione combinando insieme osservazioni nel visibile e nell'infrarosso termico. A causa delle grandi distanze le temperature superficiali dei TNOs sono attorno ai 75 K e quindi il picco della loro emissione termica sarebbe nel range 60-100 micron, difficile da Terra. Quindi l'emissione termica dei TNOs si può misurare bene praticamente solo dallo spazio.

Analizzando le albedo di alcuni TNOs, Centauri e comete a corto periodo si nota che la maggior parte di esse sono basse e quindi si presume che questi oggetti siano collegati.

9.1 Curva di luce, rotazione e forma

La forma e la rotazione di un corpo solido si possono stimare dalle variazioni nella brillantezza osservata dal momento che qualunque variabilità a breve termine nella curva di luce di un oggetto è causata da cambiamenti nella sua area proiettata illuminata e da variazioni di albedo mentre ruota. Per gli asteroidi sono stati sviluppati metodi per ottenere i periodi di rotazione e le curve di luce già da molto tempo. Per i TNOs invece esistono le curve di luce per un numero

molto limitato di oggetti e parte di essi non mostra variazioni a breve termine misurabili, pertanto sono molto pochi gli oggetti di cui si è stimato il periodo di rotazione.

9.2 Caratterizzazione della composizione superficiale

Per capire l'origine e l'evoluzione dei TNOs è importante confrontare le proprietà composizionali di un campione statisticamente rilevante di oggetti per trovare possibili differenze o somiglianze. Dall'osservazione della luce riflessa dalle superfici dei TNOs abbiamo visto che le loro superfici non sembrano tutte simili e ci si pone la domanda se queste differenze, anche molto marcate, siano intrinseche o prodotte dall'evoluzione.

La luce proveniente da un oggetto porta con sé informazioni sulla composizione e natura della superficie. Solitamente i TNOs hanno magnitudini molto basse quindi le osservazioni spettroscopiche sono molto complicate. Le maggiori informazioni sulla loro composizione provengono dai colori, dedotti da fotometria a banda larga e i colori finora ottenuti hanno mostrato un'ampia dispersione suggerendo che i TNOs possono riflettere un ampio range di colori. Ci sono inoltre parecchie differenze tra i differenti surveys che portano a conclusioni anche contraddittorie. In generale si ottengono distribuzioni praticamente continue dei colori dei TNOs con qualche outlayers.

Anche i colori visibili-infrarossi coprono un range ampio di valori suggerendo composizioni superficiali diverse. La maggior parte dei TNO ha colori più rossi del Sole. Colori arrossati della superficie vengono interpretati come il risultato dell'invecchiamento superficiale a causa della radiazione ad alta energia. Esperimenti di laboratorio mostrano che l'irraggiamento ionico di ghiacci semplici contenenti carbonio possono produrre complessi refrattari organici e quindi coprire il corpo con una crosta scura e organica (arrossata). Questo potrebbe spiegare la superficie arrossata dei TNOs perché questi oggetti, una volta formati, sono stati esposti ai raggi cosmici per lungo tempo. Questo scenario non spiega tuttavia la differenza tra i colori dei TNOs che potrebbe riflettere diverse composizioni, il che non è molto chiaro dato che si ritiene si siano formati a simili distanze eliocentriche e a simili basse temperature.

Tale differenza potrebbe essere dovuta ad un bilancio tra reddening (e darkening) prodotto dai raggi cosmici e l'escavazione di materiale fresco per collisione. Il materiale emesso per resurfacing sarebbe meno rosso e meno scuro della superficie primitiva. I tempi scala per questi effetti sono dell'ordine di qualche milione fino a 100 milioni di anni e il range di colori osservato può essere riprodotto da simulazioni di entrambi gli effetti. Questo scenario porta ad una distribuzione continua di colori tra i TNOs. I tre colori principali si possono spiegare come:

- Rosso: radiazioni ad alta energia (tempi scala $10^6 - 10^7$ y)
- Grigio: impact resurfacing (tempi scala $10^6 - 10^7$ y) o attività intrinseca (come Plutone) e rimodellamento sulla superficie

Riassumendo i colori dei TNOs:

- TNOs hanno diversi colori superficiali: da colori neutri a molto rossi che potrebbero essere un'indicazione di diversa composizione superficiale dovuta a diversi gradi di processi ai quali sono stati sottoposti
- Si possono classificare gli oggetti in gruppi relativi alla tassonomia dei colori derivata sulla base dei loro indici di colore.
- Il trend da neutri a molto rossi indica una possibile sequenza di processi di alterazione (collisioni, resurfacing, crateri, irradiazione di UV e/o bombardamenti di particelle energetiche, attività cometaria etc.)
- I TNOs classici con basse eccentricità ed inclinazioni hanno un colore molto rosso (popolazione fredda) mentre gli oggetti classici con risonanza, alta eccentricità e inclinazione hanno solitamente colori neutri o poco rossi (popolazione calda)
- Non si ha un chiaro trend per i TNOs scattered e nemmeno per i plutini
- Non si hanno correlazioni del colore con le dimensioni o con le distanze eliocentriche

9.3 Analisi spettrale

Solamente i TNOs più brillanti possono essere osservati spettroscopicamente, con un range diagnostico di lunghezze d'onda compreso tra 0.4 e 2.5 micron. Nel visibile (0.4-1 micron) le osservazioni sono importanti per ricercare materiale organico e minerali che hanno subito alterazione acquosa come i filosilicati sulla superficie. Le osservazioni nel vicino infrarosso (1-2.5 micron), invece, possono determinare la presenza di ghiaccio.

La riflettanza (o riflettività), quantità che serve per analisi spettroscopiche, si ottiene eliminando il contributo dello spettro solare. Per fare ciò si utilizza una stella che si chiama analogo solare ovvero una stella che ha uno spettro di

tipo G2-V.

La riflettanza è definita come:

$$\mathcal{R}(\lambda) = 10^{-0.4[m(\lambda)-m_{\odot}(\lambda)]}$$

Si può normalizzare a 1 in banda V

$$\mathcal{R}(\lambda) = 10^{-0.4[(m(\lambda)-m(V))-(m_{\odot}(\lambda)-m_{\odot}(V))]}$$

L'altra quantità utile è la spectral slope ovvero la pendenza di questi spettri, che in genere si misura in %/100 nm o %/1000 Å ed è definita come

$$\mathcal{S}(\lambda_1, \lambda_2) = 100 \times \frac{\mathcal{R}(\lambda_2) - \mathcal{R}(\lambda_1)}{(\lambda_2 - \lambda_1)/1000}$$

In base alla spectral slope (colori) si può fare una classifica:

- Cubewani: popolazione rossa con una coda blu
- Plutini e SDOs: moderatamente rossa (comparabile con le comete)
- Centauri: due gruppi di colore

Sono state individuate tre principali classi di spettri dei TNOs: i mondi d'acqua, i metanoidi e i featureless.

Mondi d'acqua: oggetti che mostrano la presenza di ghiaccio d'acqua sulla superficie (tipiche bande del ghiaccio d'acqua a 2 e 1.5 micron, nel ghiaccio cristallino si ha anche una banda a 1.65 micron che non è presente nel ghiaccio amorfo). Il fatto di trovare ghiaccio cristallino è ancora senza una spiegazione dal momento che le temperature alla quale si trovano i KBOs sono tipiche del ghiaccio amorfo: probabilmente vi è stato un innalzamento delle temperature forse tramite l'azione passata di criovulcanismo dovuto al calore interno di questi oggetti causato dal decadimento del nucleo radioattivo o a causa di urti. Il ghiaccio cristallino esposto a gran lungo ai raggi cosmici dovrebbe inoltre tornare al suo stato amorfo ma ciò non è avvenuto e non si ha ancora una spiegazione valida.

Metanoidi: hanno evidenze di metano in superficie, con bande distinte nella banda del vicino infrarosso (Tritone, che probabilmente è un KBO massivo catturato da Nettuno, ha uno spettro ricco di metano). Il metano è interessante per due ragioni: per prima cosa è instabile alla sublimazione su lunghi tempi scala alle distanze e alle temperature della maggior parte dei KBOs. Questa instabilità è stata analizzata nel dettaglio per Plutone dove si è verificato che la fuga di metano è limitata dal flusso della radiazione solare energetica. Come seconda ragione l'origine del metano è problematica: le basse temperature nella nebulosa solare si pensa che abbiano favorito l'incorporamento di atomi di carbonio in forma ossidata come CO e CO_2 piuttosto che in forma ridotta come il CH_4 . Inoltre, sembra poco probabile che il metano sia stato portato su questi corpi dalla nebulosa solare. Una possibilità è che il metano sia arrivato sotto forma di clatrato (una gabbia fisica di ghiaccio d'acqua nella quale molecole sufficientemente piccole possono essere intrappolate).

Featureless: non hanno evidenze di nessun elemento in particolare, alcuni presentano delle particolari bande di assorbimento che indicano delle alterazioni acquose di silicati (acqua liquida?).

Per studiare la composizione di questi oggetti bisogna fare dei modelli collegati a varie condizioni (presenza o assenza di bande di assorbimento prodotte da minerali/ghiacci etc., gradiente spettrale, supporre un'albedo superficiale). Con varie combinazioni di spettri sintetici si cerca di approssimare al meglio possibile gli spettri misurati. La soluzione non è unica dal momento che anche diverse combinazioni di materiali possono portare allo stesso risultato.

9.4 Composti organici nei corpi del Sistema Solare

I composti organici possono essere:

- Primordiali
- Risultato di reazioni chimiche in corso dovute all'irraggiamento di particelle ad alta energia, bombardamento radiazioni ad alta energia di ghiacci di CH_3OH , CH_4 , H_2O , CO_2 , CO , NH_3 che produce un mantello radiativo povero di idrogeno, ricco di carbonio e molto scuro (spiegazione delle basse albedo)

10 Comete

Le comete sono oggetti di piccole dimensioni composti di roccia e ghiaccio. Il loro core viene chiamato **nucleo**. L'atmosfera che fugge dalla superficie di una cometa attiva si chiama **chioma**, si estende per 100000 km ed è una grande nube di gas e polveri che include un'estesa nube di idrogeno. Le particelle di polvere accelerate dall'acqua che sublima, tenute insieme dal moto della cometa formano una **coda di polvere** mentre il gas ionizzato che si sposta in direzione radiale a causa dell'accelerazione dovuta al vento solare forma una **coda di plasma**.

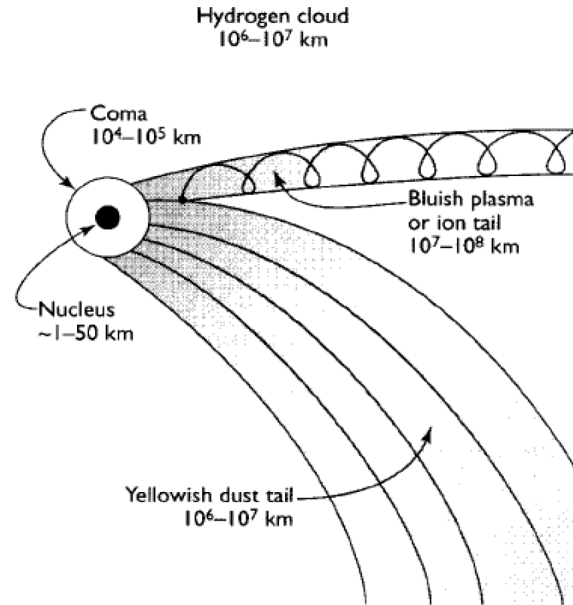


Figura 7: Struttura delle comete

10.1 Magnitudine delle comete

Quando le comete non sono attive e dunque sono lontano dal Sole, queste brillano soltanto di luce riflessa e la brillantezza dipende sostanzialmente da tre fattori: la distanza della cometa dal Sole, la natura della cometa e la distanza dalla Terra. Si possono identificare due tipologie di magnitudine: la magnitudine totale e quella nucleare. La prima riguarda solamente il nucleo ed è pari alla totale quando la cometa non è attiva. La seconda, invece, include tutti i fenomeni di radiazione causati dal passaggio al perielio.

La magnitudine nucleare è data da

$$m_n = m_0 + 5 \log \Delta + 5 \log R$$

con Δ distanza geocentrica in AU, r distanza eliocentrica in AU e m_0 magnitudine nucleare a una distanza di 1 AU in assenza di attività.

Quando la cometa è attiva si ricorre a formule empiriche, dal momento che il flusso osservato è costituito da emissioni del gas e da luce solare diffusa dalla polvere, e si introduce un parametro libero n perché la luminosità di una cometa dipende da tanti fattori. Si ha quindi:

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

dove n dipende da fenomeni di riflessione, emissione, età della cometa etc. Dalle osservazioni n varia tra 2 e 6 mentre per le comete più vecchie varia tra 4 e 6.

10.2 Nucleo cometario

La chioma e le code sono fenomeni transitori che durano qualche settimana o qualche mese e risultano dall'interazione della radiazione solare e del vento solare con il nucleo cometario. Il nucleo solitamente è di dimensioni troppo piccole per essere risolto da Terra. La sonda Giotto si avvicinò maggiormente alla Halley e fornì le immagini del primo nucleo cometario visitato da una sonda con la più alta risoluzione.

La missione Giotto sulla cometa di Halley: molte missioni hanno incontrato la cometa di Halley nel 1986 ma quella più significativa è stata la europea Giotto. lanciata nel Luglio del 1985 è riuscita ad arrivare al nucleo di 600

km della cometa nel Marzo 1986. Si vide che il nucleo presenta monti e valli sebbene la sua superficie sia costantemente alterata dai getti di gas provenienti dalla superficie che formano la chioma e la coda. Non presenta crateri da impatto.

10.3 Dirty Iceberg or Dirty Snowball Model

Le proprietà del nucleo cometario sono consistenti con il modello della "palla di neve sporca": il nucleo sembra essere composto di ghiaccio e roccia. La struttura è probabilmente molto debole quindi la veloce rotazione del nucleo tende a distruggerlo. Le più recenti missioni spaziali, tuttavia, hanno dimostrato che la componente dominante nel nucleo è la roccia e dunque il nucleo è prevalentemente un corpo inattivo la cui forza fisica è controllata dalle polveri. Solitamente i nuclei cometari sono porosi e con bassa densità.

10.4 Struttura interna del nucleo

Evidenze osservate sembrano suggerire che non vi sia una differenziazione radiale ovvero non hanno un interno stratificato con un core e un mantello differenziato come accade per i pianeti, infatti:

- La composizione rimane la stessa nel tempo
- Rapporto polvere-gas: il rapporto di intensità della radiazione diffusa dalle polveri (continuo), rispetto a quella del gas (bande molecolari), stimato dagli spettri cometari, non cambia da comete poco evolute a comete evolute, non cambia cioè con la profondità del nucleo
- Abbondanze atomiche e molecolari: gli spettri di emissione di comete a lungo e corto periodo sono simili \Rightarrow gli strati più profondi sembrano contenere le stesse molecole nelle stesse proporzioni
- Probabilità di fissione: comete giovani, a lungo periodo, comete a corto periodo, si spezzano con le stesse probabilità (circa 3 % ad ogni passaggio) \Rightarrow gli strati più interni hanno quindi la stessa forza strutturale di quelli più esterni.

10.5 Strato esterno del nucleo, formazione dei mantelli

Le comete, a causa della grande distanza dal sole, sono irradiate dai raggi cosmici per lungo tempo dando luogo a materiali molto scuri che diventano spettroscopicamente rossi. Potrebbero dunque sviluppare un mantello detto **mantello di irradiazione** che poi viene disgregato quando la cometa entra per la prima volta nel sistema solare; questo mantello dunque si forma nel periodo di inattività della cometa. Il **mantello rubble**, composto di roccia, si comincia a formare nel corso dei passaggi successivi di una cometa nelle vicinanze del Sole ed è composto di una crosta di materia refrattaria. In pratica con la fuga di gas dal nucleo per azione del calore solare le particelle più grosse non riescono a fuggire e ricadono sul nucleo; è dunque una diretta conseguenza della sublimazione. Il loro accumulo preferenziale nelle zone meno attive forma una specie di schermo isolante di spessore variabile che protegge i ghiacci sottostanti dalla radiazione incidente. La formazione progressiva della crosta può spiegare l'indebolimento progressivo dell'attività cometaria fino ad arrivare anche allo spegnimento definitivo della cometa.

L'evoluzione termica dei nuclei cometari può in genere essere divisa in due parti:

1. una fase lunga, dell'ordine dell'età del sistema solare, trascorsa a grandi distanze dal Sole
2. una fase molto più corta, trascorsa in orbita nel sistema planetario

Il processo di evoluzione termica comincia veramente quando una cometa entra nella seconda fase della sua vita ovvero nel Sistema Solare interno, per quelle che vi entrano. Per questo motivo le comete nuove o giovani vengono spesso descritte come oggetti primitivi che hanno subito poco o nullo cambiamento durante la loro permanenza nelle lontane regioni del Sistema Solare e costituiscono una preziosa sorgente di materiale primordiale.

Le comete possono terminare la loro esistenza diventando inattive (tipo asteroidi) oppure spaccandosi in vari frammenti di vita breve.

10.6 Sorgenti di energia per un nucleo cometario

I nuclei cometari evolvono grazie all'azione di sorgenti di calore interne ed esterne che agiscono su di essi. Queste sono:

- la radiazione solare
- i raggi cosmici
- decadimenti radiativi

- processi endogeni ed esogeni: sublimazione, reazioni chimiche, transizioni di fase

Ognuno di questi processi dominano a seconda della fase in cui si trova la cometa. È ovvio che la maggior parte della radiazione solare assorbita è utilizzata per la sublimazione del ghiaccio cometario e tutte le sorgenti di energia radiogenica come pure l'effetto dei raggi cosmici si possono trascurare durante la seconda fase evolutiva di una cometa.

10.7 Dimensioni, massa e densità di un nucleo cometario

Le dimensioni di un nucleo di una cometa sono difficili da ottenersi direttamente da Terra dato che non si è generalmente in grado di risolverlo otticamente. Il metodo utilizzato è la fotometria della cometa a grandi distanze dal Sole quando la temperatura del nucleo è così bassa da non permettere la sublimazione dei ghiacci e quindi la formazione di una chioma. Ciò che si osserva è essenzialmente il nucleo e la radiazione osservata a queste distanze deriva dalla riflessione della radiazione solare incidente da parte del nucleo. In questa situazione la brillantezza varia come $r^{-2}\Delta^{-2}$. Da queste osservazioni fotometriche, il raggio R del nucleo può essere ottenuto dalla relazione:

$$R^2 = r^2 A^{-1} \phi^{-1}(\alpha) 10^{0.4[V_{\odot} - (V_c - 5 \log \Delta)]}$$

con $\phi(\alpha)$ funzione di fase, A albedo del nucleo che non è nota e non facilmente ottenibile, V_{\odot} e V_c le magnitudini assolute del Sole e della cometa.

L'**albedo** è una quantità generalmente non nota per le comete e si assume per essa un certo intervallo di valori plausibili ovvero $0.7 < A < 0.02$ corrispondenti all'albedo del ghiaccio d'acqua e quella del corpo più oscuro del Sistema Solare. Applicando questa tecnica ad una serie di comete si è trovato un valor medio di R compreso tra 1 km e 5 km. Nel caso della cometa di Halley, le immagini fornite dalla HMC a bordo della sonda Giotto hanno rivelato una forma del nucleo piuttosto irregolare e dimensioni maggiori di quanto ci si aspettasse e un albedo attorno a 0.04.

Per quanto riguarda la **massa dei nuclei cometari** attualmente non esistono determinazioni dirette dato che per la loro piccolezza non si è mai stati in grado di rilevare perturbazioni gravitazionali nei confronti degli altri corpi del Sistema Solare nel corso della loro orbita. Anche il **periodo di rotazione** è difficile da determinare. In teoria si può ottenere dalle variazioni nella curva di luce ma nella pratica i risultati sono incerti perché la curva di luce di un nucleo si può effettuare solamente quando è lontano e dunque molto debole.

10.8 Evoluzione della cometa attorno al Sole

Il loro aspetto e brillantezza variano molto con la distanza dal Sole: lontano dal Sole (5-6 AU) hanno un aspetto stellare, ossia si osserva solo il nucleo che riflette la luce solare; con l'avvicinarsi al Sole il nucleo si circonda di una chioma a causa del riscaldamento solare che favorisce la sublimazione dei ghiacci. I gas che così escono sfuggono all'attrazione gravitazionale del nucleo con una velocità di circa 0.5 km/s e formano una chioma praticamente sferica e neutra. Con l'aumentare della distanza dal nucleo la densità diminuisce fino a rendere inefficienti le collisioni e viene favorita la ionizzazione da parte dei fotoni UV solari.

La chioma ionizzata viene spinta dal vento solare in direzione antisolare a formare la coda di ioni o di tipo I. Tale coda tende al blu per fluorescenza dei gas ionizzati. Lo ione dominante è il CO^+ . La sublimazione dei gas ha anche l'effetto di trascinare con sé particelle di polvere che a sua volta riempiono la chioma e vengono spinte dalla pressione di radiazione solare all'indietro formando la coda di polvere o di tipo II che si dispone a ventaglio sul piano orbitale. Il suo colore è quello giallastro della luce solare che la polvere diffonde. La chioma diventa solitamente ben visibile a circa 3 AU e la sua estensione aumenta con l'avvicinamento al Sole fino a raggiungere qualche milione di km. La componente di polvere riflette lo spettro continuo solare al quale si sovrappone uno spettro di forti righe e bande di emissione da parte dei gas neutri che formano la chioma. Alla luce solare riflessa la chioma di polvere aggiunge anche la propria emissività termica che è situata nell'IR lontano. Invisibile da Terra è anche una chioma di idrogeno e una chioma di OH di estensione minore, entrambe derivanti dalla dissociazione dell'acqua.

La **nube di idrogeno** si forma quando la cometa si avvicina al Sole e il suo comincia a vaporizzare creando un avvolgimento di idrogeno gassoso attorno ad esso. Tale nube non è visibile ad occhio nudo. L'idrogeno gassoso deriva dalle molecole d'acqua che si rompono quando assorbono i fotoni ultravioletti dal Sole. Gli atomi di idrogeno stessi assorbono fotoni ultravioletti ed emettono radiazione UV che può essere vista solamente da telescopi in orbita dal momento che l'atmosfera terrestre assorbe questo tipo di radiazioni. Questa è l'evidenza più forte della presenza di acqua nel nucleo delle comete.

10.9 Code delle comete

Quando una cometa si avvicina al Sistema Solare interno si formano due code:

- **Coda blu di ioni:** formata da atomi ionizzati spazzati via dal vento solare. Punta in direzione radiale rispetto al Sole e non corrisponde all'orbita della cometa
- **Coda di polveri:** viene prodotta quando i fotoni provenienti dal Sole investono le particelle di polvere e producono una pressione di radiazione su di essi. Questo fa sì che le particelle di polvere escano dalla chioma. L'effetto del vento solare sulle particelle di polvere è meno forte di quello che si ha sugli ioni, per questo motivo la coda di polveri assume una forma curvata

10.10 Composizione chimica del nucleo

I nuclei cometari sono molto difficili da osservare perciò la loro composizione chimica può essere derivata solamente dalla composizione chimica della chioma. Le specie osservate in essa (molecole figlie) sono per la maggior parte frammenti molecolari provenienti da molecole più complesse costituenti il nucleo (molecole madri o genitrici). Gli elementi fondamentali delle sostanze volatili provenienti dal nucleo sono C , H , O , N . L' H_2O è il costituente principale (80-90 %) e la successiva molecola più abbondante è il CO .

Dalla missione Halley è stata rilevata una grande quantità di polvere organica (particelle $CHON$) ovvero contenenti materiale organico oltre ai silicati.

Sono stati trovati anche dei gas nobili come Argon, Krypton e Xenon che reagiscono raramente con gli altri elementi e sono dunque indicativi dello stato originale di formazione della cometa. Si hanno valori di $^{36}Ar/^{38}Ar = 5.4 \pm 1.4$ comparabili con i valori trovati nel Sistema Solare ma il rapporto Ar/H_2O ha ordini di grandezza maggiori rispetto a quelli rilevati sulla Terra il che indica che l'acqua terrestre non è solamente di origine cometaria. Inoltre questa grande abbondanza di Ar ha una buona correlazione con N il che indica che la cometa si potrebbe essere formata in zone fredde del Sistema Solare (sulla base di modelli termici e chimici).

È stata individuata anche glicina, il più semplice degli amminoacidi e presente in quasi tutte le proteine che servono per la duplicazione del DNA.

Si ha presenza di O_2 che essendo molto reattivo deve essere stato intrappolato nel ghiaccio al tempo di formazione della cometa ed è rimasto inalterato fino ad oggi ed indica dunque che la cometa è composta da materiali antichissimi. Inoltre la presenza di N_2 indica che la cometa si è formata lontano dal sole, dove le temperature basse permettono a questa molecola di essere intrappolata nel ghiaccio.

10.11 Chioma cometaria

La chioma è costituita da:

- polvere (grani di materiale refrattario ricoperto da ghiacci)
- molecole
- radicali neutri
- specie atomiche e ioni molecolari rilasciati dalla chioma più interna con velocità di circa 0.5-1 km/s

La sorgente del materiale osservato nella chioma è il nucleo. Il gas viene rilasciato anche da grani strappati dal nucleo nel corso della loro sublimazione.

Le molecole genitrici vengono prodotte direttamente dalla sublimazione dei ghiacci nucleari. L'attività del nucleo è caratterizzata dal numero di molecole emesse per unità di tempo, o tasso di produzione Q , il quale è controllato dalla temperatura del nucleo.

Se consideriamo una chioma asimmetrica sferica circondante un nucleo di raggio R_n che emette in modo isotropo Q molecole per secondo, esse si allontaneranno con una velocità v corrispondente alla temperatura di equilibrio della superficie nucleare. Il numero totale di molecole che attraversa in un secondo una sfera di raggio R molto maggiore di R_n centrata sul nucleo, uguale anch'esso a Q , si può scrivere come il prodotto della superficie di questa sfera per il flusso di particelle alla distanza R , $n(R)v$ (numero di particelle attraversanti in un secondo una superficie di 1 cm^2 , normale al raggio R ; $n(R)$ è la densità numerica alla distanza R):

$$Q = 4\pi R^2 n(R) v$$

10.12 Meccanismi di produzione delle specie osservate, struttura della chioma

In base alle osservazioni, per la maggior parte delle comete è possibile suddividere la chioma in tre regioni principali:

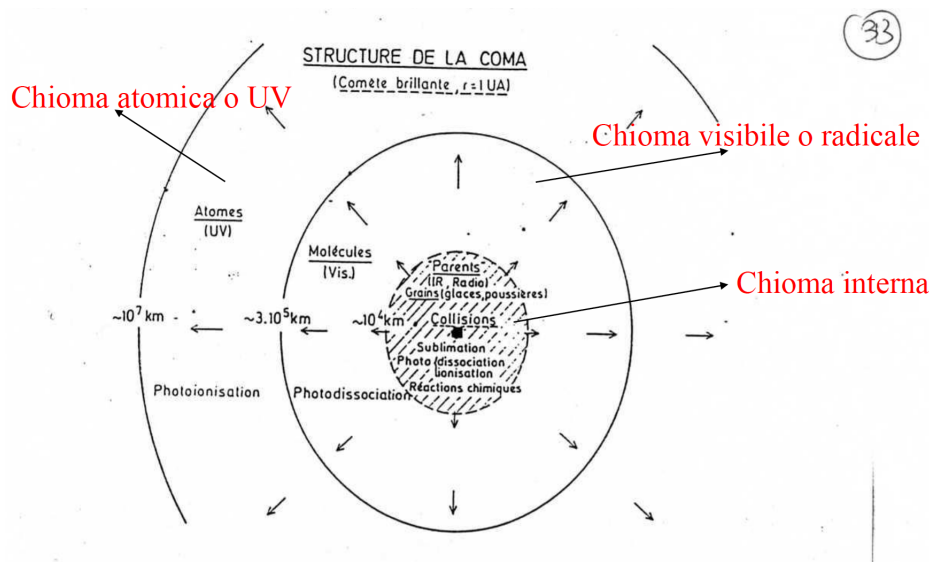
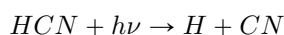
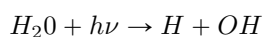


Figura 8: Struttura della chioma delle comete

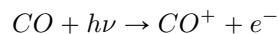
- **Chioma interna:** molecolare, chimica o fotochimica che è la zona di produzione, a simmetria sferica e poco estesa, tipicamente con un raggio di 10^4 km
- **Chioma visibile o radicale:** la zona di espansione delle specie prodotte. L'estensione di questa zona è determinata dalla velocità e dal tempo di vita delle particelle, in media poco più di 10^5 km di raggio. Le specie prodotte sono dette molecole figlie
- **Chioma atomica o UV:** zona di distruzione per ionizzazione e scambio di carica con il vento solare, con dimensioni da 10^5 a 10^7 km circa. Questo schema è relativo a ciò che la teoria prevede nel caso di una dissociazione semplice. Per certi atomi (in particolare O e H) la situazione può essere molto più complessa perché non solo essi possono derivare da dissociazioni multiple, ma anche da molecole aprenti di tipo diverso

Il meccanismo principale di produzione delle specie osservate (CN , NH , CH , C_2 , C_3 , OH ,...) nelle comete è la **fotodissociazione e fotoionizzazione** delle molecole parenti sotto l'irraggiamento solare dando così origine alle molecole figlie che a loro volta finiscono per essere fotodissociate e fotoionizzate. All'espansione generale de gas si sovrappone dunque da una parte una zona di produzione e dall'altra una zona di distruzione dei radicali osservati.

Esempi del processo di fotodissociazione sono:

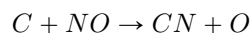
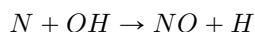


e del processo di fotoionizzazione



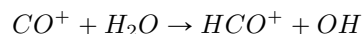
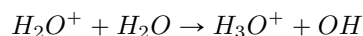
Altri processi chimici importanti riguardano le reazione neutro-neutro e quelle ione-neutro:

- **Reazioni neutro-neutro:** esempi di queste reazioni sono



che sono importanti a piccole distanze dal nucleo, già a 10^3 km sono trascurabili

- **Reazioni ione-neutro:** decisamente più importanti di quelle neutro-neutro, alcuni esempi sono:



10.13 Gli spettri cometari

La conoscenza attuale di molti aspetti dei fenomeni cometari deriva direttamente o indirettamente dallo studio e analisi dei loro spettri. Il continuo miglioramento delle tecniche spettro-fotometriche e l'utilizzo di veicoli spaziali hanno reso l'identificazione e lo studio delle specie presenti negli spettri cometari uno dei campi più attivi nello studio delle comete. Molte specie atomiche e molecolari, infatti, sono state identificate in tali spettri grazie al continuo miglioramento delle risoluzioni spettrali e all'estensione del range spettrale dall'usuale regione ottica all'UV, all'IR e al radio.

Lo spettro di una cometa brillante è costituito da diversi tipi di emissione: un'emissione continua, detta "continuo" ed emissione discrete (righe e bande) dovute sia ad atomi e molecole neutre sia a ioni atomici o molecolari.

Il **continuo** è un'emissione stretta, proveniente dalla regione centrale della cometa e dovuto alla diffusione della radiazione solare da parte della polvere che i gas sublimanti trascinano con sé allontanandosi dal nucleo. Vi sono righe di assorbimento che possono essere identificate come righe di Fraunhofer solari. La distribuzione di intensità I del continuo è praticamente uguale a quella dell'irraggiamento solare anche se spesso leggermente più arrossata. La larghezza del continuo corrisponde, sulla cometa, ad un diametro che varia da cometa a cometa, da qualche migliaio a qualche decina di migliaia di chilometri. Esso si estende poi nella direzione della coda di polvere.

Al continuo si sovrappone un gran numero di **emissioni discrete** (righe e bande) dovute ad atomi e molecole neutri o ionizzati una volta. Le emissioni neutre, che provengono dalla chioma, si ripartiscono in modo quasi simmetrico rispetto al continuo: alcune di estendono su pochi chilometri, altre sono molto più lunghe. Le emissioni dovute agli ioni costituiscono, al contrario, una ripartizione nettamente asimmetrica: sono formate nella coda di plasma e sono in effetti molto più lunghe nella direzione opposta al Sole.

Regione ottica. Generalmente l'atmosfera neutra di una cometa, ovvero la chioma, comincia a formarsi a distanze eliocentriche $r \leq 3$ UA. Infatti a grandi distanze eliocentriche lo spettro della cometa è costituito essenzialmente da radiazione continua (radiazione solare diffusa dalle particelle di polvere presenti nella chioma o dal nucleo stesso, con alcune eccezioni). Le righe e bande di emissione delle varie molecole appaiono quasi in successione mentre la cometa si avvicina al Sole nella seguente serie:

1. a circa 3 UA appare la banda del radicale CN che definisce l'estensione della chioma neutra
2. per $2 < r < 3$ UA seguono le emissioni del C_3eNH_2 , le quali non sono molto estese
3. ad $r < 1.5$ UA appaiono nello spettro le emissioni del C_2 , OH , NH , CH
4. ad $r < 1$ UA appaiono le righe dell' $[OI]$ e il doppietto del sodio atomico

Oltre a queste emissioni atomiche si osservano anche delle righe metalliche (Cr , Mn , Fe , Co , Ni , Cu , K , Ca) ma solamente in un gruppo molto particolare di comete dette "comete radenti" perché le loro distanze perieliche sono molto piccole.

Anche gli elementi H , C , N , S , cosmicamente abbondanti, sono sicuramente presenti ma generalmente si riesce ad individuarli solamente nelle comete radenti dal momento che vicino al Sole il calore diviene talmente alto da sublimare la componente refrattaria della polvere e far apparire questi elementi metallici che, in condizioni normali, rimangono racchiusi nei grani di polvere, principalmente sotto forma di silicati e non sono osservabili come atomi singoli.

Lo spettro di una coda di plasma mostra soprattutto la presenza di **specie ionizzate** (H_2O^+ , CO^+ , etc) le quali vengono deviate dalla chioma in direzione radiale antisolare a causa della interazione con il vento solare. La formazione di tali code si osserva per $r \leq 2$ UA. Tra gli ioni osservati nella coda di plasma di una cometa, le emissioni del CO^+ sono quelle dominanti.

Regione ultravioletta. Ci sono le cosiddette transizioni di risonanza da parte delle specie atomiche e molecolari.

Regione infrarossa e radio. Ci sono le transizioni di rotazione/vibrazione di molte molecole.

Si può affermare quindi che la chioma cometaria contenga quasi sicuramente molte più molecole di quelle finora identificate, in particolare:

- Le molecole finora identificate sono composte soprattutto dagli elementi più abbondanti dell'universo: H , C , O , N
- La maggior parte delle specie rilevate sono di natura organica indicando l'importanza del carbonio nella costituzione delle comete, come nel caso delle molecole interstellari
- Un importante elemento di difficile identificazione è l'azoto. Ciò è dovuto al fatto che la transizione di risonanza dell'azoto, che è circa 1200 Å, è molto vicina alla forte riga di Lyman dell'idrogeno perciò è difficile identificare tale riga. Tuttavia le forti emissioni del CN suggeriscono la presenza di N

- La maggior parte delle specie osservate sono radicali o ioni che sono fisicamente stabili ma chimicamente molto reattivi. Ciò significa che non possono esistere come tali nel nucleo: si ritiene quindi che questi radicali siano i sottoprodotti della distruzione di molecole più complesse
- Il predominio di radicali implica basse densità nella chioma che a sua volta implica che le collisioni in tale regione non siano molto importanti, mentre lo sono vicino al nucleo
- Sono stati osservati tutti i prodotti della fotodissociazione dell'acqua
- Le specie neutre sono state individuate in una regione più o meno sferica attorno al nucleo. Esso a una distanza eliocentrica di circa 1 UA ha dimensioni tipiche di circa 10^5 km per tutte le specie tranne che per l'idrogeno atomico la cui emissione $\text{Ly}\alpha$ si estende su una regione che è più di un ordine di grandezza superiore. Gli ioni si trovano sia nella chioma che nella coda di plasma. La grande estensione degli ioni verso la coda è dovuta alla loro forte interazione con il vento solare.
- Se gli spettri cometari possiedono incontestabilmente un certo numero di caratteristiche comuni, vi sono ugualmente differenze tra loro: ad esempio, l'importanza relativa del continuo rispetto alle emissioni discrete può essere completamente diversa in due comete osservate alla medesima distanza eliocentrica (il che significa maggiore o minore quantità di polvere), oppure rapporti come C_3/CN , NH_2/C_2 , eccetera possono mostrare importanti variazioni da una cometa ad un'altra. In più i dati quantitativi forniti dalle osservazioni fotometriche o spettrofotometriche indicano che le leggi di variazione delle diverse emissioni in funzione della distanza eliocentrica non sono le stesse per tutte le comete. In ogni caso non sembrano esistere distinzioni spettrofotometriche essenziali tra comete di età dinamica diversa, che siano nuove o più o meno evolute. Così ad esempio esistono spettri a debole continuo o a continuo intenso, tanto tra le comete a periodo molto lungo, quanto alle comete a corto periodo.

10.14 Rapporto riga-continuo

Il rapporto polvere/gas è una importante quantità fisica per distinguere le varie comete e aiuta a capire la natura e la struttura del nucleo. Questo rapporto può essere determinato da misure spettrofotometriche nella regione spettrale del visibile e tipicamente si chiama rapporto riga-continuo che si può derivare dalle osservazioni dell'intensità relativa delle righe di emissione e del continuo.

Gli spettri cometari osservati nella regione del visibile si possono classificare in due categorie: forte continuo e forti emissioni molecolari.

Ciò che interessa per quanto riguarda questo rapporto è vedere anche se esso cambia con l'età della cometa. Da un'analisi del rapporto riga-continuo su vari spettri cometari sembra che non ci sia cambiamento negli spettri delle comete con l'età. Ciò a sua volta implica che la composizione del nucleo sia omogenea e quindi che il nucleo abbia una natura indifferenziata. Cambia comunque da cometa a cometa e si dice quindi che una cometa è più polverosa di un'altra.

10.15 Spettri della chioma: meccanismi di eccitazione ed emissione

Per poter analizzare gli spettri cometari è necessario conoscere i meccanismi responsabili dell'eccitazione delle emissioni cometari. Se ne possono individuare essenzialmente tre:

- Collisioni anelastiche con atomi, molecole o elettroni
- Eccitazioni radiative prodotte dalla radiazione solare (risonanza-fluorescenza)
- Dissociazione collisionale o fotodissociazione di molecole genitrici che lasciano i radicali osservati in livelli eccitati

Come già rilevato, le densità nella chioma sono generalmente molto basse per cui, in generale, le collisioni non rivestono un ruolo importante tra i meccanismi di eccitazione. Si ritiene che la maggior parte delle emissioni osservate negli spettri cometari sia dovuta ad un processo di risonanza-fluorescenza che consiste nell'assorbimento di un fotone solare che eccita la molecola o atomo, seguito dall'emissione spontanea di uno o più fotoni mediante una o più transizioni che possono condurre allo stato fondamentale. Precisamente, se la riemissione avviene alla stessa lunghezza d'onda dell'assorbimento si parla di **risonanza**, se a lunghezze d'onda diverse, di **fluorescenza**. In ogni caso i processi dominanti sono quelli che avvengono nella più breve scala di tempo.

10.16 Rapporti isotopici

Lo studio dei rapporti isotopici nelle comete è particolarmente importante in quanto strettamente connesso con l'origine delle comete stesse e il loro legame con il Sistema Solare e i corpi che lo costituiscono. A causa delle difficoltà incontrare in questo tipo di studio, attualmente i risultati sono limitati a poche specie isotopiche, come ad esempio il radicale C_2 . Servono spettri ad alta risoluzione perché solitamente le bande sono blended.

Dai rapporti isotopici D/H (deuterio/idrogeno, che per la Terra ha un valore ben preciso) si ricavano informazioni sull'origine dell'acqua degli oceani terrestri che quindi non sembra solamente di origine cometaria. Solo alcune comete hanno un rapporto D/H compatibile con quello terrestre. Gli asteroidi invece hanno valori molto simili a quelli terrestri.

11 Asteroidi

Anche gli asteroidi, come le comete, fanno parte degli oggetti primitivi del Sistema Solare. Nel Sistema Solare si distribuiscono in tre zone principali:

- **Near Earth Asteroids:** orbitano vicino alla Terra con orbite che intersecano quella terrestre o orbitano all'interno di essa. Si distinguono in Amor, Apollo e Aten sulla base delle loro orbite e distanza perielica
- **Asteroidi della fascia principale:** si estende tra 2.1 e 3.3 UA
- **Troiani:** asteroidi che orbitano solidali con Giove ad una distanza di 5.1 UA

La maggior abbondanza di asteroidi si ha tra Marte e Giove, tra 2.1 e 3.3 UA e la maggior parte delle loro orbite ha inclinazioni molto basse rispetto al piano dell'eclittica. Alcuni di essi hanno delle orbite abbastanza ellittiche da penetrare all'interno del Sistema Solare interno.

11.1 Caratteristiche generali degli asteroidi

Gli asteroidi sono planetesimi residui del sistema planetario più interno con una variazione composizionale che dipende dalla distanza eliocentrica e che riflette un gradiente di temperatura della nebulosa solare. Più di 500000 asteroidi hanno attualmente orbite note: generalmente hanno eccentricità compresa tra 0.1 e 0.3 e inclinazione tra 0 e 35 gradi. Il numero di asteroidi diminuisce con l'aumentare della massa. Circa 100000 di quelli noti ha un diametro maggiore di 1 km ma il totale della loro massa è solamente 1/2000 della massa della Terra ($2.97 \cdot 10^{21}$ kg).

Gli asteroidi maggiori sono **Cerere**, **Pallade** e **Vesta** con diametri pari a 941,523 e 501 km. I tre asteroidi concentrano circa la metà della massa totale della fascia asteroidale ovvero $0.0005 M_{\oplus}$.

La maggior parte degli asteroidi ha forma irregolare. La forma dipende dalla forza dei materiali, dalla forza gravitazionale e dalla forza centrifuga. Maggiore è il corpo, più grande è la pressione nel suo interno e al suo centro. Dove la pressione eccede la forza del materiale, esso si deforma (deformazione plastica) o si frattura. Calcoli dimostrano che ciò inizierebbe quando il corpo ha un diametro di 400-700 km quindi se il suo diametro è maggiore di 1000 km esso sarà sicuramente sferico. La maggior parte degli asteroidi non è grande abbastanza per essere sferica.

Il periodo di rotazione è noto per pochi e varia da circa 2 ore a 1200 ore. La loro struttura interna è abbastanza ignota, vi sono ipotesi che essa sia stratificata, rubble pile o monolitica.

11.2 Risonanze secolari

Due corpi sono in risonanza secolare quando hanno sincronizzate le precessioni del perielio o le precessioni del nodo ascendente o entrambe. Un piccolo corpo in risonanza secolare con uno molto più grande (per esempio un pianeta), precesserà allo stesso modo o secondo un rapporto di numeri interi rispetto al corpo maggiore. In un periodo di tempo molto lungo la risonanza secolare cambierà l'eccentricità e l'inclinazione del corpo più piccolo.

Esistono due tipi di risonanze secolari:

- **Risonanza secolare lineare:** tra un corpo e un altro più grande
- **Risonanza secolare non lineare:** quando riguarda più di un solo grande corpo

Nel caso degli asteroidi le modifiche dei parametri orbitali (eccentricità ed inclinazione) avvengono con tempi scala di $10^4 - 10^5$ anni per le risonanze di moto medio e anche 10^9 anni per quelle secolari, ma non sono meno efficienti.

Nella fascia principale degli asteroidi si possono individuare tre importanti risonanze secolari:

- ν_5 , quando la precessione dell'argomento del perielio dell'oggetto è simile a quella di Giove
- ν_6 , quando la precessione dell'argomento del perielio dell'oggetto è simile a quella di Saturno

- ν_{16} quando la precessione della longitudine del nodo ascendente dell'oggetto è simile a quella di Giove

Particolarmente interessante è la risonanza ν_6 tra gli asteroidi e Saturno. Quando un asteroide si avvicina a questa risonanza la sua eccentricità aumenta lentamente fino a diventare un asteroide la cui orbita incrocia quella di Marte. A questo punto viene solitamente espulso dalla fascia principale a causa di un passaggio ravvicinato con Marte. Questo tipo di risonanza secolare forma il bordo interno della fascia principale, intorno alle 2 UA e ai 20° di inclinazione.

Sia le risonanze di moto medio sia alcune risonanze secolari (prima tra tutte la risonanza ν_6) "fanno aumentare" in modo formidabile l'eccentricità dell'orbita degli asteroidi su una scala temporale dell'ordine del milione di anni.

L'aumento del valore dell'eccentricità dei corpi che si avvicinano a queste risonanze finisce praticamente con il trasformare le orbite da quasi circolari (confinare tra Marte e Giove) a fortemente ellittiche e ciò può comportare, talvolta, che le nuove orbite attraversino quelle dei pianeti, Terra compresa, diventando planet-crossing.

11.3 Distribuzione degli asteroidi

Gli asteroidi occupano essenzialmente la regione di transizione tra i pianeti terrestri di tipo roccioso e i più esterni giganti gassosi, tra le orbite di Marte, 1.52 UA, e Giove, 5.2 UA, con una maggiore concentrazione nella **main belt** tra 2.1 e 3.3 UA.

Al di fuori della fascia principale esistono vari gruppi discreti e famiglie: i **Near Earth Objects**, gruppi come gli **Hungaria**, **Cibele**, **Troiani**, famiglie come **Eos** e **Koronis**, oggetti di natura incerta su orbite caotiche di tipo cometario.

I **gruppi** sono associazioni legate dinamicamente in modo blando mentre le **famiglie** sono fortemente legate dinamicamente e provengono forse dalla distruzione catastrofica di un grande parente.

La struttura generale della fascia asteroidale è collegata alle **risonanze orbitali**, principalmente con Giove e queste risonanze sono essenzialmente divise in due classi: le risonanze di moto medio e le risonanze secolari. Queste risonanze determinano i bordi della fascia principale e anche la struttura interna.

L'esistenza di questi effetti divenne evidente quando nel 1867 Kirkwood trovò delle discontinuità nella fascia degli asteroidi, precisamente nelle zone in cui mancano del tutto gli asteroidi, dette **lacune di Kirkwood**, che corrispondono a risonanze col periodo orbitale di Giove, cioè regioni in cui il periodo orbitale dell'oggetto sta in un rapporto intero esatto col periodo orbitale di Giove.

Altre risonanze tendono invece ad isolare e a stabilizzare gli asteroidi in gruppi: queste risonanze sono le risonanze di moto medio al primo ordine (1:1, 3:2, 4:3) con Giove. Queste regioni limitano regioni stabili dove gli asteroidi possono rimanere indisturbati per miliardi di anni (es: i Troiani che si trovano nei due punti lagrangiani L4 ed L5 di Giove).

Un altro gruppo interessante di asteroidi sul bordo esterno della fascia asteroidale, appena al di là della risonanza 2:1, è il **gruppo dei Cybele**.

Integrazioni a lungo termine delle orbite degli asteroidi mostrano anche che quegli oggetti con distanze medie molto vicine ad alcune delle lacune di risonanza hanno spesso orbite molto caotiche (diventano sempre più eccentriche, finiscono per collidere con altri asteroidi e per essere spazzati via), mentre le orbite degli asteroidi nei gruppi sono molto stabili su lunghi intervalli di tempo.

La zona caotica associata alla risonanza 3:1 può dunque trasferire rapidamente (qualche milione di anni) oggetti con semiasse maggiore vicino a 2.5 AU ad orbite che attraversano quelle terrestri (NEO).

Oltre alle ampie risonanze di moto medio con Giove, la main belt è attraversata da centinaia di strette risonanze: risonanze di moto medio di ordine elevato con Giove, risonanze a tre corpi con Giove e Saturno e risonanze di moto medio con Marte.

11.4 Troiani

I Troiani sono un caso limite e sono in realtà oggetti coorbitanti con Giove. L'origine di questi oggetti non è ancora chiara ovvero non si sa se si siano formati dove si trovano attualmente o se siano stati catturati successivamente.

I Troiani in risonanza 1:1 con Giove sono sempre al vertice di un triangolo equilatero i cui altri due vertici sono occupati dal Sole e da Giove. È un caso previsto del problema ristretto dei 3 corpi studiato da Lagrange: dimostrò che un corpo di massa trascurabile soggetto all'attrazione di altri due corpi avrebbe potuto trovare una configurazione stabile in 5 punti, due dei quali sono ai vertici di un triangolo equilatero i cui altri due vertici sono occupati dai due corpi di massa maggiore.

Sono stati scoperti anche Troiani di Nettuno e ci si aspetta che tutti i pianeti giganti abbiano dei Troiani.

11.5 Main Belt

La main belt può essere suddivisa in tre zone principali:

- **Fascia asteroidale interna (inner main belt):** hanno un semiasse maggiore tra 2.06 e 2.50 UA. I confini di questa fascia sono definiti dalle risonanze di moto medio 4:1 e 3:1. All'interno di questa fascia si trova il gruppo dei Phocaea
- **Fascia asteroidale media (middle main belt):** contiene asteroidi con semiasse tra 2.50 e 2.82 UA e i suoi confini sono definiti dalle risonanze 3:1 e 5:2
- **Fascia asteroidale esterna (outer main belt):** con asteroidi con semiasse tra 2.82 e 3.28 UA. I suoi confini sono definiti dalle risonanze 5:2 e 2:1 e al suo interno si trovano le famiglie di Koronis, Eos e Themis

Gli asteroidi Cibeles hanno raggio orbitale medio tra 3.28 e 3.70, una eccentricità minore di 0.3 e un'inclinazione inferiore a 25°, sembrano clusterarsi attorno alla risonanza 4:7 con Giove.

11.6 Effetto Yarkovsky

L'effetto Yarkovsky o **effetto diurno** fu previsto dall'omonimo astronomo polacco attorno al 1900 il quale osservò che il riscaldamento diurno di un oggetto in rotazione provoca su di esso una forza che, sebbene debole, porterebbe a notevoli effetti secolari sull'orbita. È l'equivalente dell'effetto razzo sulle comete ed è efficace solamente su oggetti molto piccoli.

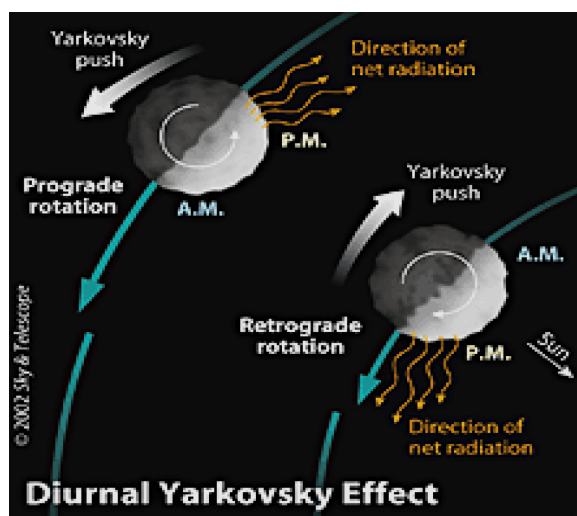


Figura 9: Effetto Yarkovsky

L'idea base dell'effetto diurno è che la radiazione solare riscalda il lato rivolto verso il Sole che successivamente, "nel pomeriggio", riemette nello spazio (tipicamente nella parte infrarossa dello spettro). Un fotone infrarosso porta via momento quando lascia l'asteroide secondo la relazione $p = E/c$ dove p è il momento del fotone ed E la sua energia. L'emissione di questi fotoni dalla parte più calda dell'oggetto provoca una netta spinta nella direzione opposta rispetto alla parte più calda.

Se il meteoroido non ruotasse, risentirebbe di una forza netta radiale verso l'esterno rispetto al Sole. Dato che invece ruota la forza sul meteoroido non ha solo una componente radiale in senso opposto al Sole, ma anche una componente che provoca una accelerazione o decelerazione dell'oggetto. Questa componente causa un aumento secolare del semiasse maggiore e in parte dell'eccentricità nel caso di una rotazione prograde (rotazione e rivoluzione concordi, l'oggetto è accelerato e si sposta su un'orbita più grande), cosicché col tempo il debole effetto Yarkovsky può cambiare profondamente l'orbita dell'oggetto. Se il meteoroido invece ruota in senso retrogrado, l'orbita si restringe. Se infine l'asse di rotazione è sul piano orbitale, l'effetto diurno non ci sarebbe.

L'effetto Yarkovsky è dunque la variazione dell'orbita di un corpo del Sistema Solare, dovuto alla combinazione dell'illuminazione da parte del Sole e della rotazione del corpo su se stesso. L'asteroide acquista o perde momento angolare a seconda che ruoti nello stesso senso o in senso opposto rispetto al suo moto di rivoluzione rispettivamente. Il fenomeno si basa sul fatto che un corpo che disperde calore nello spazio riceve una sorta di rinculo pari alla quantità di moto della radiazione emessa.

Naturalmente, a causa delle minuscole forze in gioco, l'effetto Yarkovsky è di piccola entità e dipende da vari fattori fra i quali: orientamento ed entità della rotazione, forma, albedo e capacità termica dell'asteroide.

Esiste anche un **effetto Yarkovsky stagionale** che dipende anche dall'inclinazione dell'asse di spin ed è essenzialmente analogo all'alternarsi delle stagioni sulla Terra: uno dei due emisferi viene riscaldato maggiormente dalla radiazione solare e questo calore accumulato viene reirradiato dall'emisfero "estivo" spingendo l'oggetto tanto più intensamente quanto maggiore è l'area riscaldata. L'effetto interessa maggiormente meteoroidi di dimensioni inferiori al centimetro perchè in queste condizioni la spinta impressa dall'effetto stagionale è più intensa di quella dovuta all'effetto diurno. L'intensità non dipende dal moto di rotazione ma dalla capacità termica del materiale di cui sono composti i meteoroidi e dalla loro albedo.

In generale l'effetto è dipendente molto dalle dimensioni e influenzerà il semiasse maggiore degli asteroidi più piccoli lasciando praticamente indisturbati quelli più grandi. Per asteroidi dell'ordine di chilometri l'effetto Yarkovsky è molto piccolo su periodi corti ma è un effetto duraturo per cui su milioni di anni la sua orbita può essere perturbata abbastanza per trasportarlo dalla main belt al Sistema Solare interno.

11.7 Famiglie di asteroidi

Le famiglie di asteroidi furono riconosciute per la prima volta da Hirayama nel 1918 e sono identificate come concentrazioni di oggetti nello spazio delle fasi degli elementi propri: semiasse maggiore a , eccentricità e ed inclinazione i , ovvero gruppi di asteroidi aventi elementi orbitali propri molto simili.

Hirayama suggerì che l'origine di ciascuna di queste famiglie di asteroidi poteva essere ricondotta alla distruzione collisionale di un corpo parente i cui frammenti sono stati emessi in orbite eliocentriche con velocità relative molto più basse delle loro velocità orbitali. Con il crescere della conoscenza di orbite asteroidali è aumentato il numero di famiglie asteroidali identificate nella main belt. Prendono di solito il nome dal membro più grande.

Vari studi spettroscopici hanno dimostrato che i membri delle famiglie più popolate e famose hanno composizioni superficiali simili, supportando l'ipotesi di un'origine comune. Ciò ha aperto anche la possibilità di investigare direttamente con osservazioni astronomiche la struttura interna dei corpi parenti.

La **frammentazione collisionale** è considerato ormai un plausibile processo di formazione delle famiglie. Vengono suggeriti anche diversi metodi di collisione:

- Distruzione totale del corpo parente da parte di un proiettile di massa comparabile (un esempio è la famiglia Koronis)
- Famiglie composte da uno sciame di piccoli asteroidi, forse tutti emessi da un grande corpo parente colpito da un piccolo proiettile (esempio è la famiglia di Vesta)

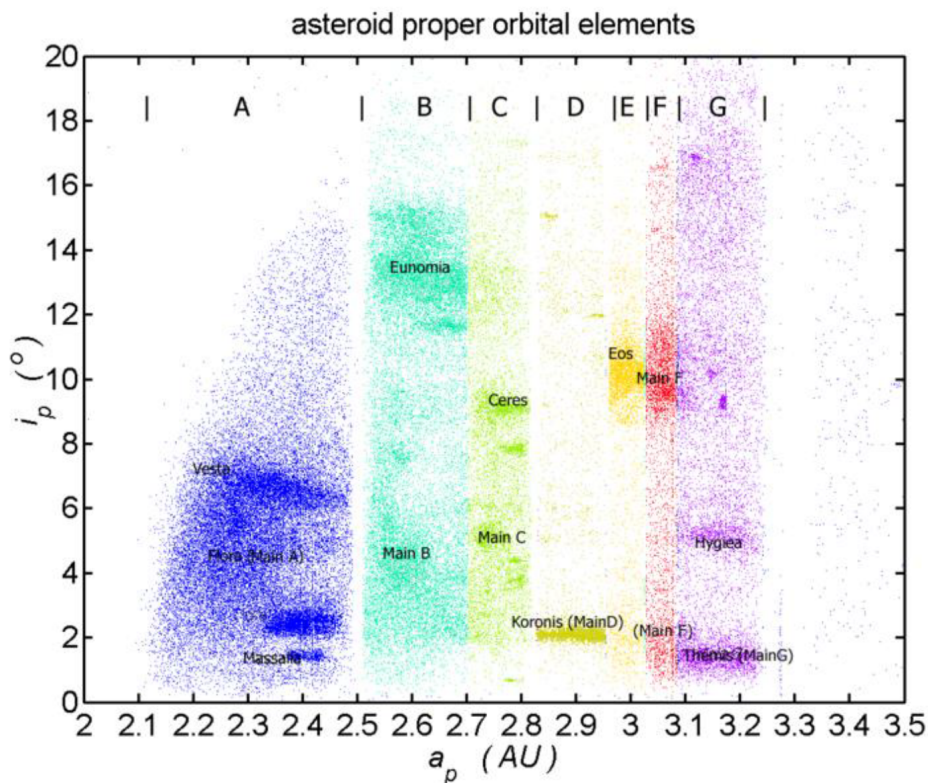


Figura 10: Famiglie di asteroidi

11.8 Albedo, massa e densità

L'albedo degli asteroidi varia da 0.02 (dark) a 0.40 (bright). Le loro dimensioni sono stimate indirettamente dal momento che pochissimi di essi possono essere risolti nelle osservazioni.

Gli asteroidi interagiscono gravitazionalmente uno con l'altro e ciò fornisce la possibilità, purtroppo solo per pochi casi, di determinare le masse dei corpi interagenti. Le masse di 1 Ceres, 2 Pallas, 4 Vesta e 10 Hygiea furono determinate con questi metodi pari a 5.9, 1.08, 1.38 e 0.47 in unità di 10^{-10} masse solari Ceres, Pallas e Vesta concentrano circa la metà della massa totale della fascia asteroidale, ossia circa $0.0005 M_{\oplus}$. La massa totale degli asteroidi è inferiore a quella della Luna.

In generale la determinazione della massa degli asteroidi è un compito assai complesso dato che, a causa delle loro piccole dimensioni, in generale non producono perturbazione, né ne subiscono.

Le densità si derivano conoscendo il diametro e la massa. Con valori di 941 km, 523 km, 501 km e 429 km si ottengono densità di 3.0, 3.6, 4.5 e 2.3 rispettivamente per i quattro asteroidi.

11.9 Magnitudine di un asteroide e dimensioni

La luminosità degli asteroidi nel range spettrale 0.4-2.5 μm (visuale-vicino IR) è completamente dovuta alla luce solare riflessa (diffusa dalla superficie). La magnitudine apparente di un asteroide dipende dalla distanza tra la Terra e l'oggetto e dalle proprietà fisiche e ottiche del corpo, come le dimensioni e l'albedo. Bisogna inoltre considerare la configurazione geometrica Sole-Terra-Asteroidi all'istante di osservazione, cioè l'angolo di fase dato che dalla terra vediamo solo una parte della sua superficie illuminata.

L'angolo di fase α è dunque l'angolo tra la direzione della Terra e quella del Sole visti dall'asteroide. La magnitudine apparente m_v dell'oggetto nello spettro visibile è data dalla relazione:

$$m_v = m_{v,\odot} - 2.5 \log \left(\frac{p_v (D/2)^2 \Phi(\alpha)}{2.24 \cdot 10^{16} R^2 \Delta^2} \right)$$

con p_v albedo geometrica nella banda V, D diametro dell'asteroide in km, R e Δ distanze elio e geocentriche in AU. La magnitudine assoluta H di un asteroide non dipende dalla configurazione geometrica (angolo di fase nullo) ed è definita come la magnitudine per $R = \Delta = 1$ AU:

$$H = (m_v)_{\Phi=1, R=1, \Delta=1} = m_{v,\odot} - 2.5 \log \left(\frac{p_v (D/2)^2}{2.24 \cdot 10^{16}} \right)$$
$$\log(p_v D^2) = 6.259 - 0.4H$$

Si noti come il concetto di magnitudine assoluta sia da intendersi in senso astratto dato che non è geometricamente possibile osservare alcun asteroide reale quando si trova ad una distanza di 1 AU dal Sole e dalla Terra contemporaneamente e ad un angolo di fase con zero gradi (un oggetto reale perfettamente all'opposizione e ad una distanza di 1 AU dalla terra avrà una distanza dal Sole di circa 2 AU).

11.10 Curva di luce di un asteroide

Se gli asteroidi fossero sferici avrebbero un'albedo uniforme su tutta la loro superficie, la magnitudine di qualsiasi oggetto sarebbe costante nel tempo, a parte l'effetto del diverso illuminamento per diversi angoli di fase. Gli asteroidi in realtà hanno una forma molto irregolare e ruotando attorno al loro asse di massimo momento d'inerzia mostrano all'osservatore estensioni differenti di superficie illuminata in istanti diversi.

Ne consegue che, osservando fotometricamente un asteroide durante una o più notti o anche solo ore si ottiene la curva di luce ovvero la variazione di energia luminosa riflessa al variare dello stato di rotazione. L'ampiezza complessiva della curva di luce di un asteroide da informazioni sulla variazione di superficie illuminata rivolta verso l'osservatore a diverse fasi di rotazione. Questo si interpreta in termini di forma complessiva dell'oggetto, oltre che in termini di orientazione dell'asse di spin.

Una volta nota H e l'albedo si potrebbe calcolare il diametro $\log(p_v D^2) = 6.259 - 0.4H$. Con la fotometria si riesce a determinare solo il prodotto $p_v D^2$, non è possibile conoscere le due variabili indipendentemente.

11.11 Tassonomia degli asteroidi

Il proposito di una classificazione tassonomica non è diversa da quella del sistema di classificazione spettrale delle stelle. Si tratta cioè di sintetizzare per mezzo dell'uso di una semplice lettera, indicante l'appartenenza ad una delle sottoclassi identificate, le principali caratteristiche fisiche di un dato oggetto.

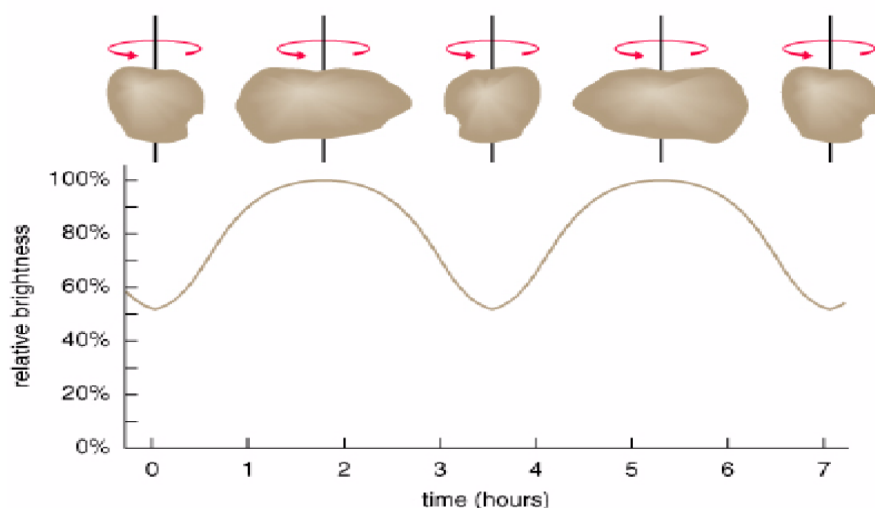


Figura 11: Curva di luce

Nel caso degli asteroidi, le proprietà osservative utilizzate per caratterizzare l'esistenza di separate classi tassonomiche sono state fino a tempi recenti essenzialmente gli indici di colore, diagnostici di determinate morfologie della curva di riflettività spettrale, e l'albedo. Sono questi infatti i parametri osservativi noti per il maggior numero di oggetti, il che consente di avere un'adeguata base statistica per i propositi di classificazione. I dati usati provengono dai risultati di varie survey di osservazione fotometrica usando vari filtri tipicamente nell'intervallo di λ tra 0.3 e 1.1 μm .

Storicamente, le classificazioni tassonomiche più generalmente accettate nella letteratura sono state basate sul catalogo di magnitudini in otto colori denominato **ECAS (eight color asteroid survey)**, mentre per l'albedo la principale sorgente di dati è l'**Infrared Minor Planet Survey (IMPS)** basata sui dati raccolti dal satellite IRAS. Vi sono varie classificazioni tassonomiche degli asteroidi proposte da diversi autori.

Classificazione di Tholen (1984). Analizza 589 oggetti tramite ECAS. Individua tre classi principali: A, C, D, S e T. Vi sono inoltre delle classi contenenti asteroidi particolari: V, R e Q; e dei sottogruppi nella classe C: B, F, G.

Tre classi sono spettralmente degenerate e sono separate da albedo crescenti (P, M ed E).

Lo svantaggio è che è poco applicabile a oggetti nuovi dal momento che necessita di un paragone con gli oggetti più vicini. Il vantaggio è invece che le classi sono flessibili quindi non si hanno problemi di sbagliare classificazione a causa delle variabili multiple.

Bus and Binzel (2002): SMASS II. È basata sugli spettri CCD con banda tra 0.44-0.92 μm (visibile, recentemente estesa all'infrarosso). Per fare questa classificazione sono stati usati 1447 oggetti e sono state individuate 26 classi, inclusa la nuova classe L, espandendo la tassonomia di Tholen. Gli oggetti che appartengono a queste classi hanno caratteristiche mineralogiche e composizioni superficiali molto simili. I nuovi oggetti sono facilmente classificabili ma questa classificazione richiede degli spettri con una risoluzione molto alta.

Le classi principali sono la C, la S e la X:

- **Classe C (carbonacei):** è la classe maggiore che comprende circa il 40% degli asteroidi. Sono oggetti di colore scuro con un'albedo di circa 0.04, uno spettro piatto o leggermente arrossato. Vi sono delle bande di assorbimento nell'UV che indicano la presenza di silicati idrati (alterazione acquosa), per questi sono anche chiamati **metamorfici**. Lo spettro di riflettanza è generalmente simile ai meteoriti condriti carbonacei.
- **Classe S (rocciosi):** la seconda classe più numerosa, circa il 30% degli asteroidi. Sono più brillanti degli oggetti di classe C con albedo di circa 0.15. Hanno bande di riflessione nell'IR molto simili a quelle dei pirosseni e delle olivine e sono generalmente modificati termicamente e cristallizzati (come le rocce ignee) o sono stati modificati dall'ambiente spaziale.
- **Classe D e P:** comprendono il 5-10% degli asteroidi. Sono oggetti scuri con albedo di 0.04 e arrossati, con spettri che sono generalmente privi di caratteristiche e perciò hanno una composizione difficile da identificare. Si pensa che quelli di tipo D contengano significative quantità di materiali organici mentre quelli di tipo P contengono metalli. Per ora non si è identificato un corrispettivo meteorico. Tutti i Troiani sono di tipo D, survey dedicate hanno mostrato spettri arrossati e assenza di bande nel visibile e nel nIR, segnale della presenza di materiale primitivo carbonaceo.

- **Classe M (metallici)**: oggetti brillanti con albedo pari a circa 0.15, privi di caratteristiche spettrali dei silicati quindi sono probabilmente ricchi di elementi metallici. Si trovano principalmente nella zona centrale della main belt. Include la sottoclasse W che presenta caratteristiche di idrati nelle lunghezze d'onda dell'infrarosso.
- **Classe E (enstatitiche)**: molto rari e solitamente presenti nella parte interna della main belt. Hanno la più alta albedo tra gli asteroidi (> 0.2), sono molto ricchi di pirosseni, come le condriti enstatitiche.
- **Classe U (non classificabili)**: contiene la maggior parte degli asteroidi più grandi e più conosciuti

11.12 Distribuzione delle classi nella main belt

Ogni classe tende ad occupare una certa zona e questo si collega all'evoluzione termica della nebulosa primordiale in cui i materiali silicatici prevalgono nella zona più interna e quelli carbonacei in quella più esterna. A 2.7 UA si osserva una transizione da oggetti di tipo S ricchi in silicati ed albedo medio alta presenti nella fascia più interna, ad oggetti di tipo C, ricchi in carbonio, materiali organici ed argille, di albedo più bassa. Oltre le 4 UA si trovano oggetti dominati da materiale organico debolmente processato (spettri arrossati), cioè le classi P e D.

Il fatto che la distribuzione delle classi mostri un gradiente composizionale con la distanza eliocentrica ha portato ad identificare tre superclassi, dette **superclassi di Bell** per provare ad interpretare in modo adeguato la tassonomia di Tholen: il gruppo **igneo**, **metamorfico** e **primitivo**.

Gli oggetti del **gruppo primitivo** si collocano nella zona esterna della fascia principale (Hilda, Troiani) e sono stati sottoposti ad un riscaldamento nullo o comunque limitato. L'acqua potrebbe essere presente solo come ghiaccio e le basse temperature non consentirebbero reazioni di idratazione per le quali è necessaria la presenza di acqua liquida.

Gli oggetti del **gruppo metamorfico** popolano la regione compresa tra la parte centrale e quella esterna della fascia principale e sono stati riscaldati quanto basta per mostrare cambiamenti spettrali che indicano l'azione di acqua liquida (alterazione liquida, presenza di materiali idrati).

Gli oggetti del **gruppo igneo** occupano la zona più interna della fascia principale ed hanno probabilmente subito anche processi di fusione.

La presenza di questi oggetti si annulla attorno alle 3.5 UA. Quindi prima delle 2.7 UA dominano oggetti provenienti da intensi processi di riscaldamento e fusione contenenti silicati. Oltre le 3 UA dominano oggetti metamorfici, cioè che hanno subito processi di riscaldamento che hanno prodotto silicati idrati.

11.13 Alterazione acquosa

La distribuzione composizionale lungo la fascia asteroidale suggerisce un forte gradiente in temperatura nella nebulosa solare e in particolare un qualche processo primordiale che abbia portato all'alterazione di una parte di questi oggetti ovvero l'alterazione acquosa.

L'alterazione acquosa è l'alterazione chimica a bassa temperatura di materiali da parte di acqua liquida che agisce come un solvente e produce materiali come fillosilicati, solfati, ossidi, carbonati ecc detti **silicati idrati**. Molte sono le ipotesi di questo fenomeno: la produzione di calore interno grazie a decadimenti radioattivi, il calore prodotto da collisioni, ma un'importante sorgente di riscaldamento fu sicuramente un forte vento solare durante le fasi finali di formazione del Sole. Questo fenomeno si osserva soprattutto in asteroidi di tipo C localizzati tra 2.6 e 3.5 UA, regione definita come **zona di alterazione acquosa**.

Questi materiali hanno bande tipiche di assorbimento sia nel visibile (0.7 micron la più evidente, poi 0.43, 0.6, 0.8 micron) che nel vicino infrarosso (3 micron la più evidente).